

# BIOCOMPLEJIDAD: Facetas y tendencias

Moisés Villegas Ivey • Lorena Caballero Coronado • Eduardo Vizcaya Xilotl  
(editores)

Octavio Miramontes Vidal ◊ Gustavo Martínez-Mekler ◊ Germinal Cocho Gil  
(Prólogo)

Alfredo Marcos • Alberto Lifshitz • Alexandre de Pomposo • Tom Froese • Michael D.  
Kirchhoff • Oswald Basurto • Moisés Villegas • Agustín Mercado Reyes • Benjamín  
Domínguez • Erik L. Mateos • José J. Reyes • Hermes Ilarraza • Dolores Rius • Rafael  
Chávez • Lilia Rodríguez • Aquiles C. Ilarraza • Octavio Valadez • Enrique  
Hernández-Lemus • Mario Siqueiros-García • Carlos E. Maldonado

**CopIt-arXives**  
Publishing Open Access  
with an Open Mind  
2019

Este libro contiene material protegido por leyes de autor

Todos los derechos reservados © 2019

Publicado electrónicamente en México, por CopIt-arXives.

Diseño de portada: Manolo Cocho Ursini.

*Biocomplejidad: facetas y tendencias* / editores Moisés Villegas Ivey, Lorena Caballero Coronado, Eduardo Vizcaya Xilotl; [autores] Alfredo Marcos ... [y diecinueve más]. — México CDMX: CopIt-arXives, 2019  
Incluye bibliografías e índice  
ISBN: 978-1-938128-21-9 ebook

### **Derechos y permisos**

Todo el contenido de este libro es propiedad intelectual de sus autores quienes, sin embargo, otorgan permiso al lector para copiar, distribuir e imprimir sus textos libremente, siempre y cuando se cumpla con lo siguiente: (i) el material no debe ser modificado ni alterado, (ii) la fuente debe ser citada siempre y los derechos intelectuales deben ser atribuidos a sus respectivos autores, (iii) estrictamente prohibido su uso con fines comerciales.

El contenido y puntos de vista planteados en cada capítulo es responsabilidad exclusiva de los autores y no corresponden necesariamente a los de los editores o a los de ninguna institución, incluidas CopIt-arXives o la UNAM.

Producido con software libre incluyendo  $\LaTeX$ . Indexado en el catálogo de publicaciones electrónicas de la UNAM y en Google Books.

Todas las figuras e imágenes son cortesía de [www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org) o bien de los autores, a menos que se señale lo contrario explícitamente.

Los editores agradecen el apoyo de DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIT IN-107619.

**ISBN: 978-1-938128-21-9 ebook**

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>

**Este libro ha pasado por revisión de pares**

### **CopIt-arXives**

Cd. de México - Cuernavaca - Madrid - Curitiba  
Viçosa - Washington DC - London - Oxford

Con el apoyo de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
Instituto de Física

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>IX</b>
<b>BIOCOMPLEJIDAD</b>	
<i>Alfredo Marcos</i>	<b>1</b>
1. Introducción . . . . .	1
2. Complejidad y organización . . . . .	3
3. Organización y función . . . . .	7
4. Función y sustancia . . . . .	9
5. Conclusión . . . . .	11
Bibliografía . . . . .	12
<b>BIOCOMPLEJIDAD DE LA ENFERMEDAD HUMANA</b>	
<i>Alberto Lifshitz</i>	<b>15</b>
Generalidades . . . . .	15
Las causas . . . . .	16
La fisiopatología . . . . .	17
La comorbilidad . . . . .	17
La enfermedad crónica . . . . .	18
El pronóstico . . . . .	18
Los tratamientos y la polifarmacia . . . . .	18
El organismo humano como un todo . . . . .	19
Influencia de la subjetividad . . . . .	19
Prevención, anticipación, previsión . . . . .	19
El caso de la diabetes . . . . .	20
Individuación del diagnóstico . . . . .	21
¿En dónde está el defecto? . . . . .	21
¿Prediabetes: condición de riesgo o etapa temprana de la enfermedad? . . . . .	22
Diabetes y salud reproductiva . . . . .	23
Problema de todos . . . . .	23
Epílogo . . . . .	23

Bibliografía . . . . .	24
<b>TOPOLOGÍA MÉDICA: LA LÓGICA DE LAS FORMAS VITALES</b>	
<i>Alexandre S.F. de Pomposo</i>	<b>25</b>
Introducción . . . . .	25
Las ideas de las formas y las formas de las ideas . . . . .	26
Las escalas de la realidad . . . . .	27
Topología molecular . . . . .	28
La arquitectura futurista de las células . . . . .	30
Las texturas de los tejidos . . . . .	33
La organización de las funciones . . . . .	35
La geometría del caos . . . . .	39
Bibliografía . . . . .	42
<b>FISIOPATOLOGÍA, ENFERMEDADES COMPLEJAS Y CÁNCER</b>	
<i>Moisés Villegas</i>	<b>45</b>
Complejidad, problema e intuición.	
Complejidad como explicación . . . . .	47
Homeostasis y enfermedad . . . . .	48
Enfermedades complejas . . . . .	49
Una nueva fisiopatología . . . . .	52
Cáncer y los procesos de desarrollo . . . . .	54
Conclusiones . . . . .	55
Bibliografía . . . . .	55
<b>EMOCIONES, ESTRÉS Y SALUD. DESDE EL PARADIGMA LINEAL AL DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS</b>	
<i>Benjamín Domínguez, Erik Leonardo Mateos, José Javier Reyes</i>	<b>57</b>
Introducción . . . . .	57
Estrés y salud . . . . .	59
Una nueva visión obtenida por la experiencia	
de investigación clínica psicológica en México . . . . .	59
Análisis no lineal de la variabilidad	
de la frecuencia cardiaca (VFC) . . . . .	64
Conclusiones . . . . .	66
Bibliografía . . . . .	67
<b>COMPLEXUS CORDIS: SALUD Y PATOLOGÍA CARDIOVASCULAR</b>	
<i>Hermes Ilarraza, María Dolores Rius, Rafael Chávez, Lilia Rodríguez, Aquiles C. Ilarraza</i>	<b>71</b>
Introducción . . . . .	71
El corazón a través de la historia . . . . .	71
El corazón de la Antigüedad y la Edad Media . . . . .	72

El corazón y el Renacimiento . . . . .	74
El método científico estudia al corazón . . . . .	75
Nacimiento de la homeostasis . . . . .	75
Los sistemas abiertos, no lineales y complejos . . . . .	76
‘De humani corporis fabrica’ a la fractalidad:	
la forma del corazón y sus vasos . . . . .	80
Generalidades anatómicas . . . . .	81
La banda ventricular y el nuevo concepto del movimiento del corazón . . . . .	84
Sistema de vasos sanguíneos . . . . .	86
Fractalidad en la disposición de los vasos sanguíneos . . . . .	88
Ultraestructura del corazón: los miocardiocitos . . . . .	92
Potencial de acción transmembrana . . . . .	94
Sistema miocárdico de conducción eléctrica . . . . .	96
Inervación del corazón . . . . .	98
La fisiología cardiovascular . . . . .	99
Homeostasis: estabilidad fuera del equilibrio . . . . .	99
El ciclo cardíaco . . . . .	99
Variabilidad de la frecuencia cardíaca . . . . .	101
Hemodinámica . . . . .	106
Auto-organización de la TA . . . . .	109
Ciclos circadianos . . . . .	110
Determinantes de la salud y factores de riesgo cardiovascular . . . . .	110
Causalidad . . . . .	110
Factores de riesgo . . . . .	112
La patología cardiovascular . . . . .	114
Cardiopatía isquémica . . . . .	114
Insuficiencia cardíaca . . . . .	116
Fibrilación atrial y ventricular . . . . .	116
Otras patologías . . . . .	118
Cardiopatías congénitas . . . . .	118
El diagnóstico cardiovascular . . . . .	119
El tratamiento de las patologías cardiovasculares . . . . .	119
Acciones para evitar la muerte súbita de origen cardíaco . . . . .	121
Evaluación del riesgo de enfermar del corazón . . . . .	122
Limitaciones de las ciencias de la complejidad . . . . .	122
Conclusión . . . . .	123
Bibliografía . . . . .	123
<b>LA COMPLEJIDAD TERMODINÁMICA DE LA MATERIA VIVA</b>	
<i>Enrique Hernández-Lemus, Mario Siqueiros-García</i> . . . . .	<b>131</b>
Introducción: Entendiendo la vida desde la física térmica . . . . .	131
Los orígenes conceptuales de la relación vida-energía . . . . .	133
Termodinámica fuera del equilibrio . . . . .	138

Irreversibilidad y simetría . . . . .	138
Fenomenología . . . . .	139
Procesos irreversibles y compensación . . . . .	140
Los espacios de estados y la clasificación termodinámica . . . . .	143
Termodinámica irreversible lineal . . . . .	145
Termodinámicas extendidas . . . . .	148
Termodinámica racional . . . . .	149
Variables internas . . . . .	150
El formalismo de la función de compensación . . . . .	154
Los orígenes: el trabajo de Clausius . . . . .	155
Forma local de la función de compensación . . . . .	156
Forma de Gibbs generalizada ( $T d\Psi$ ) . . . . .	158
La complejidad energética y entrópica de la vida . . . . .	159
Complejidad y regulación de los flujos celulares . . . . .	159
Señalización biológica y procesos de transporte . . . . .	160
Conclusiones . . . . .	164
Bibliografía . . . . .	165

**DONDE HAY VIDA, HAY MENTE: EN APOYO A UNA TESIS FUERTE DE LA CONTINUIDAD VIDA-MENTE**

<i>Michael D. Kirchhoff, Tom Froese</i> . . . . .	<b>171</b>
1. Introducción . . . . .	172
2. El principio de energía libre (PEL) . . . . .	175
2.1. La energía libre y la predicción cognitivista de minimización del error . . . . .	176
2.2. Minimización no cognitivista de la energía libre . . . . .	177
3. Del PEL cognitivista a la discontinuidad vida-mente . . . . .	178
3.1. Conceptos de computación . . . . .	178
3.2. Conceptos de información: hacia una consideración semántica de la computación . . . . .	180
3.3. Problemas de integración . . . . .	182
3.4. Problemas de significado . . . . .	182
4. De la minimización de energía libre a una perspectiva vida-mente demasiado generosa . . . . .	185
La ergodicidad y la manta de Markov . . . . .	185
5. Restringiendo el PEL no-cognitivista con la REC: una consideración de la mente evolutiva y tardía . . . . .	188
6. De la REC al EA y el PEL no-cognitivista: una fuerte continuidad vida-mente . . . . .	193
7. Conclusiones . . . . .	195
Agradecimientos . . . . .	196
Referencias . . . . .	196

<b>¿CÓMO ACTUAR EN CASO DE EMERGENCIA? GEOINGENIERÍA Y COMPLEJIDAD</b>	
<b>DAD</b>	
<i>Agustín Mercado-Reyes</i>	<b>199</b>
Bibliografía . . . . .	218
<b>¿EXISTE EL ORGANISMO INDIVIDUAL? LA SIMBIOSIS Y LA EMERGENCIA DE NUEVOS INDIVIDUOS</b>	
<i>Oswalth Basurto</i>	<b>221</b>
Líquenes . . . . .	224
Micorrizas y la rizosfera . . . . .	226
Las relaciones simbióticas entre termitas . . . . .	228
El microbioma humano . . . . .	231
El individuo como holobionte:	
su construcción a través de la sintrofia . . . . .	233
A manera de conclusión . . . . .	234
Bibliografía . . . . .	236
<b>BIOCOMPLEJIDAD: EL DESAFÍO TRANSDISCIPLINARIO DE LAS NATURALEZAS-CULTURAS</b>	
<i>Octavio Valadez-Blanco</i>	<b>239</b>
Introducción . . . . .	239
De la biocomplejidad del objeto	
a la biocomplejidad de los sujetos . . . . .	241
La biocomplejidad epistémica, ontológica y tecnológica . . . . .	242
La biocomplejidad: entre la crítica a la razón moderna	
y la emergencia de modelos no idealizados . . . . .	245
a) Complejidad en sentido amplio . . . . .	246
b) Complejidad como ciencias de la complejidad . . . . .	247
c) La biocomplejidad: desafío empírico e histórico . . . . .	248
La biocomplejidad como crítica	
y horizonte de transformación . . . . .	250
a) Ciencias de la biocomplejidad:	
de la curiosidad al compromiso académico . . . . .	251
b) De lo singular a lo genérico: la biocomplejidad	
como contenido de la transdisciplina . . . . .	253
La biocomplejidad y la transdisciplina:	
responsabilidad, crítica y alternativas	
contra la crisis planetaria . . . . .	254
Bibliografía . . . . .	255
<b>LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD SON CIENCIAS DE LA VIDA</b>	
<i>Carlos Eduardo Maldonado</i>	<b>259</b>
Introducción . . . . .	259

1. El origen y la filosofía de las ciencias de la complejidad: un contraste . . . . .	260
2. Qué son y qué hacen los sistemas vivos . . . . .	264
3. La vida, un evento raro . . . . .	268
4. ¿En qué sentido puede decirse que las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida? . . . . .	271
5. Conclusiones . . . . .	275
Bibliografía . . . . .	277



## PRÓLOGO

CUANDO Alexander Fleming notó en 1928 las propiedades bactericidas del *Penicillium rubens*<sup>1</sup> no tuvo noción de las implicaciones filosóficas de su hallazgo. Ganador del Premio Nobel por esto y por el descubrimiento de la acción antibiótica de la enzima lisozima, Fleming puso en evidencia un mecanismo de inhibición de la formación de la pared celular en cierto tipo de bacterias. Sin la protección rígida de una pared celular, la célula de la bacteria queda expuesta al medio ambiente que fácilmente acaba por romperla y matarla. ¿Cuál es la implicación filosófica? En la fracción de segundo que toma la ruptura de la membrana celular, la bacteria pasa de su condición viva a muerta. A pesar de que los componentes celulares están ahí reunidos, el contenido citoplasmático, los ribosomas, el nucleóide y los fragmentos de la membrana, eso ya no es una célula y pueden considerarse como componentes aislados. Lo más importante, esas partes son ya sólo moléculas aisladas y esas moléculas no están vivas. Entonces, ¿cómo es que juntas y ensambladas forman un ente vivo y por separado no lo están?

Por cientos de años se han gastado ríos de tinta en escribir definiciones o caracterizaciones de lo que es la vida. No hay hasta hoy una definición ampliamente aceptada. Una de ellas, que comienza a ser considerada con ímpetu creciente, es un novedoso paradigma científico que propone que de componentes no vivos, pero propiamente dispuestos en un orden espacio-temporal preciso, en el que existen entre ellos interacciones de naturaleza no-lineal, va a emerger colectivamente una propiedad común que es lo que conocemos usualmente como vida. Entonces lo vivo es emergente; pero no nos engañemos. Este paradigma tiene sus detractores, que pugnarán por argumentar que las moléculas por separado podrían tener vida e inclusive personalidad propia, por ejemplo, que un gen es egoísta y que usa a su favor toda la maquinaria celular para su propósito, que es prevalecer y perpetuarse. Esta última visión, llamada comúnmente reduccionismo, se enfrenta a otra visión moderna que es la de los sistemas complejos.

Como punto de partida consideremos, por ahora, que los sistemas complejos son aquellos formados por múltiples componentes en interacción y en los cuales emergen propiedades en escalas de tiempo y espacio diferentes a las de los componentes. La complejidad se presenta en el proceso mediante el cual esto ocurre, y hablamos de biocomplejidad cuando los sistemas complejos son de naturaleza

---

<sup>1</sup> Inicialmente se pensó que la especie del hongo era *P. notatum*, luego *P. chrysogenum*, pero finalmente se ha identificado correctamente como *P. rubens*.

biológica. En este sentido, la biocomplejidad involucra el estudio de interacciones de componentes, ya sean genes, proteínas, máquinas moleculares, células con otras células, tejidos con otros tejidos, órganos con otros órganos, individuos con otros individuos e interacciones entre especies y medioambiente en ensamblajes ecológicos. Se trata así de jerarquías de interacciones modulares, los comportamientos son altamente multifactoriales, no lineales y con frecuencia adaptativos. Una conjetura con indicios tanto en genética, como en metabolismo, fecundación, desarrollo, inmunología, sistema nervioso, ecología, evolución y movilidad colectiva, es que procesos biológicos fundamentales operan un en estado marginal en la frontera entre un régimen dinámico ordenado y otro desordenado, reminiscente a los puntos críticos en transiciones de fase termodinámicas, donde rasgos de robustez van de la mano con capacidad evolutiva; de allí que se haya acuñado la expresión: “la vida se encuentra en un régimen crítico”.

Así, pues, este libro cumple con su título: plantea una variedad de facetas y tendencias de la biocomplejidad. Se presentan, y en ocasiones, se comparan varias definiciones de biocomplejidad. Basta revisar el índice para apreciar la diversidad de temas abordados. Los escritos son fiel reflejo de las múltiples formaciones de los autores: biólogos, físicos, filósofos, médicos, psicólogos, entre otros. Todos ellos cautivados por la complejidad. En cierta medida, el libro puede ser considerado como semilla de varios libros, todos hilados entre sí por la biocomplejidad.

Un tema central es definir y entender: ¿qué es la vida? La medicina ocupa un lugar preponderante con contribuciones relacionadas con cáncer, diabetes, comportamientos cardiovasculares, estrés. Hay una marcada componente filosófica; la intervención de la física no se deja esperar; la visión desde las ciencias cognitivas es reveladora, y, por supuesto, la vertiente social ¡se ve, se siente y está presente!

El volumen tiene planteamientos conceptuales, metodológicos y prácticos. Pasajes novelescos se intercalan con formalismos matemáticos y físicos, desarrollos de formas de pensamiento y su evolución, así como técnicas experimentales, innovaciones computacionales y tratamientos clínicos; la lista es larga.

Es un libro cautivante, que invita a la reflexión, que despierta más preguntas de las que resuelve. Las discusiones son profundas y disímiles. A lo largo de su lectura se pone de manifiesto que la biocomplejidad viene acompañada de controversia, conflicto y sorpresa. Aunque cada capítulo es otra aventura, otro enfoque, otro lenguaje, otra herramienta, otro tema, otro formalismo, otro entorno, la biocomplejidad es aún más extensa que la aquí planteada y queda mucho más terreno que explorar. Con miras al futuro, no es aventurado decir que ahora estamos apenas en una punta del tímpano de hielo.

¿Y por qué tanto interés en los sistemas complejos? ¿Por qué el auge de su estudio? Por una parte, está la disponibilidad de impresionantes desarrollos experimentales, la capacidad de cómputo insospechable, el manejo de grandes datos, la transmisión y el análisis de información a escalas imprevistas, el desarrollo de nuevas formas de pensamiento, los avances matemáticos y tecnológicos. Por otra, están las repercusiones culturales, factores económicos y demandas ecológicas y sociales. Actualmente los tiempos cambian a ritmos tan acelerados que nos so-

brepasan, y las ciencias de la complejidad son una respuesta a este mundo que transitamos, con el propósito de proveer herramientas para su comprensión y su manejo, encaminado a un desarrollo sustentable y socialmente justo.

CDMX, 8 de mayo de 2019,  
Octavio Miramontes, Gustavo Martínez-Mekler, Germinal Cocho Gil.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## INTRODUCCIÓN

A MENUDO se dice que el significado de las palabras depende de los hablantes, de los lectores, de las comunidades académicas, de la interpretación. Si la forma de designar significados es única, y no hay lugar a la interpretación, se tiene un modo unívoco (o se habla de *univocidad*); por el contrario, si la forma de designar significados es ambigua o confusa, y puede prestarse a una interpretación incorrecta, se tiene un modo equívoco (o se habla de *equivocidad*). Aunado a ello, se dice que la analogía habita en el espacio que existe entre la univocidad y la equivocidad.

En su *Dialéctica de la analogía*, Mauricio Beuchot profundiza e indica que “la analogía es [...] un pensamiento triádico, y tiene una lógica dialéctica [...] una que no [necesariamente] tiene conciliación en una síntesis, sino que se mantiene abierta y vive de la tensión”; más aún, plantea que en la analogía se toman en cuenta las semejanzas, las similitudes, pero también que en ella predomina la diferencia. Así, una posible interpretación sugiere que al conceptualizar fenómenos que se ubican entre los polos de la dupla reduccionismo/holismo –como es el caso de los sistemas complejos–, una manera recurrente de hacerlo es a través del pensamiento analógico, en el que se dan “dinámicas en conflicto” que retan a la creatividad.

En el caso del término *biocomplejidad*, y más allá de su etimología, surgen muy pronto los debates acerca de los significados asociados, y los modos pertinentes (o no) para designar muchos de los fenómenos que se pretenden describir. Si uno se entrega a la univocidad se tiene una versión cargada de reduccionismo, con sabores y tonos quizás del siglo XXI, pero que en el fondo remiten a las caracterizaciones decimonónicas, por lo menos. Por otro lado, si uno se entrega sin resistencias al juego interpretativo de la diversidad y la diferencia propios de la equivocidad, puede uno llegar a separarse tanto que el efecto neto suena más a una divergencia (cognitiva, epistémica o hasta sociológica).

Por eso, sin pretender alcanzar la claridad de una definición, en las obras que abordan el comportamiento de sistemas complejos o de la complejidad de los mismos, es usual plantear debates acerca de las conceptualizaciones, las nociones y las genealogías que se pretenden significar. Todo ello con una finalidad muy loable: para poder comunicarse e incursionar en lo que de otra forma parecería una torre de Babel o un diálogo de sordos.

Incrustada en dicho debate conceptual, la obra de Germinal Cocho aconseja abordar muchas de tales nociones en clave analógica, ponderando lo genérico y

lo específico del fenómeno en cuestión, donde se conjugan en tensión dinámica, dialéctica (en lo que se refiere a sus aspectos teóricos), las duplas permanencia/cambio, heterogeneidad/homogeneidad, cualitativo/cuantitativo; asimismo, en cuanto a los aspectos prácticos, sugiere ponderar serenamente los encontronazos históricos que se han suscitado tanto por los especialistas frente a los generalistas, como por el debate del trabajo individual frente al colectivo; y aconseja partir de una cierta disposición respetuosa de la formación disciplinar ajena, en la que uno no es experto, y que llama a refrenar los ímpetus arrogantes de la disciplina propia, para establecer sitios de colaboración concreta y virtuosa.

En una docena de capítulos, y como su título lo indica, *Biocomplejidad: facetas y tendencias* reúne una variedad de enfoques y perspectivas alrededor del tema que nombra; se presentan distintos aspectos o facetas desde los que se puede abordar, ya sea en términos filosóficos, biomédicos, termodinámicos, etc. Asimismo, a lo largo de la lectura de este libro el lector percibirá de manera emergente algunas de las tendencias (metodológicas, epistemológicas e incluso ontológicas) que están presentes en los debates en curso y que, esperamos, se consoliden en el futuro.

Este libro constituye una culminación colectiva de intenciones, afinidades, y esfuerzos convergentes a lo largo de meses.

De entre los afluentes que han contribuido y acompañado a la germinación de este libro se deben mencionar: a) el Diplomado en Ciencia Médica y Ciencia de la Complejidad, desde su etapa previa como Diplomado de Medicina y Complejidad; b) los esfuerzos solidariamente generosos para contribuir al movimiento de acceso abierto, a cargo de la editorial digital CopIt-arXives. En cuanto a las labores de los editores de este libro, han concurrido: el proyecto de año sabático de M. Villegas en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, la estancia postdoctoral de L. Caballero en el Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM, y la labor de E. Vizcaya como investigador en el Centro de Estudios Filosóficos, Políticos y Sociales “Vicente Lombardo Toledano” de la Secretaría de Educación Pública (a pesar de que, como consecuencia de una austeridad presupuestal indiscriminada, lamentablemente se haya consumado la mutilación del mismo en mayo de 2019, al haberse suprimido su área de publicaciones y sus dos áreas de investigación).

De la misma manera, es pertinente mencionar que la génesis de este libro es larga. Un primer momento tuvo lugar durante el año 2014: alrededor de las labores del Diplomado de Medicina y Complejidad, que sesionaba en la Facultad de Medicina de la UNAM, se organizó una pequeña mesa redonda sobre el tema. La Dra. Lourdes Barrera, participante de dicho diplomado, propuso que sería pertinente dirigir nuestra atención ante el vasto panorama de los diversos sistemas biocomplejos, sobre la complejidad de lo vivo. Así, dicha mesa redonda tuvo lugar el 2 de julio de 2014, y contó con la participación de Alfredo Marcos (que estaba de visita en México), Alexandre de Pomposo y Octavio Valadez.

Un segundo momento tuvo lugar como acto de clausura de las actividades del Diplomado de Medicina y Complejidad 2015, en el que se organizó otra mesa redonda dedicada al tema, y que se llevó a cabo en el Auditorio 2 de la Unidad de Posgrado de la UNAM, el 25 de noviembre de 2015. En dicha ocasión se contó con la



Mesa de Biocomplejidad, 2015.

participación de Mario Casanueva López, Armando Aranda Anzaldo, Alexandre de Pomposo y Octavio Valadez, y fue coordinada por Gustavo Martínez-Mekler. Del interés de los participantes del diplomado y del público asistente surgió la propuesta de plasmar en un libro los planteamientos de los ponentes; en el desarrollo de tal intención, se vio que deberían participar tantas plumas como fuera posible para hablar de otras perspectivas que, además de enriquecer el panorama, mostrarán una pluralidad de enfoques y consideraciones, a la par de constituir en sí mismo un ejemplo concreto de colaboración colectiva interdisciplinaria.

En coherencia con la trayectoria editorial seguida, y convertida ya en tradición de CopIt, podemos decir que el lector tiene ante sí un libro cuyos autores ponen a su consideración, con la loable esperanza de brindar un texto ameno, con autoridad y generoso, por tratarse de un texto gratuito en acceso abierto.

En cuanto a la estructura final del libro, aquí sólo diremos que el orden de los capítulos siguió aproximadamente al orden cronológico en que se fueron integrando. De tal suerte que el libro puede leerse de muchas maneras, ya sea secuencialmente o de acuerdo a los intereses y la curiosidad del lector.

Desde estos párrafos, y antes de concluir esta introducción, queremos agradecer profundamente a todos los autores, tanto por haber aceptado efusivamente la invitación a participar en esta obra colectiva, como por su paciencia en la consecución de la publicación, pues distintos imprevistos amenzaron el desarrollo del proyecto y alargaron la espera. Además, agradecemos a los autores que sirvieron de enlace para sugerir e invitar a otros autores. Nuestro agradecimiento va también, por supuesto, para los revisores anónimos, la traductora Laura Rodríguez Benavidez, y el autor de la portada, Manolo Cocho Ursini.

Finalmente, para cerrar esta introducción, los editores de Copit y los de este libro queremos dedicar todo nuestro trabajo alrededor de esta obra a un compañero de mil batallas, a nuestro queridísimo amigo y admirado maestro, Germinal Cocho Gil, pues con su sorpresiva partida nos ha dejado desconcertados nuevamente. En

esa implacable dialéctica de vida/muerte, luces/sombras, se quedan con nosotros su sabiduría, su sonrisa, las mañanas o tardes de aprendizaje en su cubículo, su presencia en las sesiones de trabajo, su peculiar manera de tratar la formalidad; se quedan con nosotros sus luces (porque no le conocimos sombras), sus proyectos, su tesón, su humanismo y sus aspiraciones por la construcción de una sociedad más justa. Parfraseando a un tal Tomás Borge, extinto comandante de la revolución sandinista, “Germi es ya de los muertos que nunca mueren”.

CDMX, a 10 de junio de 2019,  
M Benítez, O Miramontes, M Villegas, L Caballero, E Vizcaya



Germinal Cocho (1933-2019).



## BIOCOMPLEJIDAD

Alfredo Marcos\*

RESUMEN.<sup>†</sup> La pregunta que guía todo el texto es ¿en qué medida la perspectiva de la complejidad nos ayuda a entender lo que es un viviente? Para acercarnos a la repuesta exploraremos en primer lugar las limitaciones de la perspectiva reduccionista. Son éstas las que favorecen la perspectiva de la complejidad. Después veremos lo que quiere decir complejidad cuando este término se aplica a seres vivos. Detectaremos que la biocomplejidad remite a otros conceptos, como el de organización, función, y, en último término, sustancia.

*Palabras clave:* reduccionismo, complejidad, orden, organización, función, sustancia.

### 1. INTRODUCCIÓN

A mediados del mes de septiembre de 1972, hace más de cuarenta años, se reunieron en una villa italiana un puñado de científicos y filósofos convocados por el genetista de la Universidad de California Francisco Ayala. La nómina del encuentro, leída hoy, resulta impresionante.<sup>1</sup> Desde Karl Popper, en el terreno de la filosofía, hasta Jacques Monod, en el de la biología, por citar sólo dos de entre ellos. El objetivo de la reunión era debatir sobre las posibilidades y limitaciones del reduccionismo en biología. La cuestión resultaba entonces de plena actualidad, ya que los éxitos contemporáneos de la biología molecular hacían pensar que toda la investigación biológica debería orientarse hacia niveles cada vez más elementales, que toda ella debería regirse por una metodología reduccionista. Sin embargo, como advierte Ayala, “una de las características más destacadas de la materia viva es la complejidad de su organización. Existe una jerarquía de complejidad que sigue un curso desde los átomos y las moléculas, pasando por las células, tejidos, organismos individuales, poblaciones, comunidades y ecosistemas, hasta la totalidad de la vida sobre la tierra” (Ayala y Dobzhansky, 1983, p.9).

---

\* Universidad de Valladolid, España. / amarcos@fyl.uva.es

<http://www.fyl.uva.es/~wfilosof/webMarcos/>

<sup>†</sup> Texto elaborado a partir de: Marcos, A., 2010. Biocomplejidad. En: Maldonado, C.E., (ed.), *Fronteras de la ciencia y complejidad*. Bogotá: Universidad del Rosario. Se reproduce aquí con permiso del autor y del editor.

<sup>1</sup> Los textos de esa reunión se publicaron como libro: Ayala y Dobzhansky (1974). Existe traducción al español: Ayala y Dobzhansky, 1983.

Podríamos preguntarnos si toda esta complejidad de lo viviente es en realidad tan sólo apariencia. Quizá tras el velo de la complejidad se encuentren tan sólo un conjunto de entidades sencillas con relaciones simples entre ellas. Es decir, tal vez podamos reducir toda la complejidad aparente de lo vivo a entidades y relaciones simples. Recordemos el viejo programa platónico para la astronomía. Recomienda “salvar los fenómenos” (*sotsein ta phainomena*), es decir, reducir la aparente complejidad de los movimientos planetarios a movimientos, no aparentes, sino reales, de carácter circular y uniforme. Tras el velo de los fenómenos encontraremos la elegante simplicidad matemática de la realidad nouménica. *Mutatis mutandis*, teníamos en los años 70 una especie de programa platónico para la biología. La simplicidad elemental de lo vivo debe ser desocultada. Hemos de quitar el velo de la aparente complejidad.

Hay que decir que la mayor parte de los asistentes a la reunión se mostraban escépticos respecto del programa pan-reduccionista. Reconocían los méritos y posibilidades de un enfoque reduccionista y analítico moderado, pero al mismo tiempo veían sus limitaciones. Venían a decirnos que la complejidad de los vivientes es real, que no es mera apariencia, que no puede ser completamente eliminada. Si queremos entender la vida, debemos estudiarla *también* desde la perspectiva de la complejidad.

Con el horizonte que nos dan cuatro décadas de distancia, hay que reconocer que las conclusiones del coloquio resultaron acertadas y premonitorias. Hoy nadie abogaría por el pan-reduccionismo, y está mucho más establecida que en los años 70 la necesidad de investigar también desde una perspectiva sintética de la complejidad. En las últimas décadas el reduccionismo ha mostrado sus posibilidades y también sus limitaciones. Mi pregunta ahora se refiere a las posibilidades y limitaciones de la perspectiva de la complejidad. No pretendo abordarla desde el punto de vista de la biomedicina, sino desde la filosofía de la biología. Es decir, no preguntaré por las posibilidades y limitaciones de la perspectiva de la complejidad para investigar el metabolismo, el cáncer<sup>2</sup> o los ecosistemas. Tan solo estoy capacitado para abordar la pregunta filosófica: ¿en qué medida la perspectiva de la complejidad nos ayuda a entender lo que es un viviente?

Precisemos. Ayala distingue tres tipos de reduccionismo: ontológico, epistemológico y metodológico.<sup>3</sup> El primero es una tesis acerca de la naturaleza de los vivientes. En el fondo, vendría a decir, un viviente *no es más que* un conjunto de moléculas. El segundo tipo de reduccionismo trata sobre nuestro conocimiento y sobre nuestras teorías. Afirma que unas teorías científicas son reductibles a otras. En particular las de más alto nivel a las de nivel más bajo de complejidad. Así, a la larga, la biología quedaría reducida a biología molecular, e incluso ésta a bioquímica. En el horizonte estaría la reducción de toda ciencia, y en especial la biomedicina, a la física. Por último, el reduccionismo metodológico es una tesis sobre estrategias de investigación. Aplicada a la biomedicina, nos dice que es mejor investigar los

---

<sup>2</sup> Sobre la perspectiva de la complejidad en el estudio del cáncer puede verse Bertolaso (2012, parte primera).

<sup>3</sup> Se podría añadir a estos el reduccionismo axiológico.

fenómenos biomédicos en los niveles de menor complejidad. Por ejemplo, si fuera posible, tendríamos que investigar el comportamiento animal a través de su base neurofisiológica, y ésta a través de la dinámica de las biomoléculas, y la investigación del cáncer debería reducirse a la búsqueda de oncogenes.

El problema del reduccionismo metodológico lo zanja Ayala con estas palabras: “Resulta improbable que un científico cuerdo abogue por la forma extrema ya sea del composicionalismo, ya sea del reduccionismo” (Dobzhansky, et al., 1983, p.488). La voz de la sensatez recomienda el pluralismo metodológico y la combinación de diversos enfoques (Cf. Mitchell, 2009).<sup>4</sup> En cuanto al reduccionismo epistemológico, lo que sabemos es que ha quedado en mero proyecto, apenas ha sido posible la reducción entre teorías muy próximas, como la genética mendeliana y la molecular. De modo que los grandes sueños del reduccionismo fiscalista han pasado al trastero, junto con otros magnos proyectos de la arrogancia intelectual. Seguimos necesitando teorías sociológicas para explicar el voto, el consumo o las migraciones, teorías biomédicas para comprender el comportamiento, el metabolismo o el cáncer y teorías físicas para entender la caída de los graves o la colisión de hadrones. Pero, es el reduccionismo ontológico el que desplaza la cuestión al ámbito filosófico; es el que nos trae la pregunta por el valor de la perspectiva de la complejidad. Poca gente defendería hoy que los vivientes son tan sólo máquinas cartesianas o acúmulos de moléculas. Los concebimos más bien como entidades irreductiblemente complejas (Cf. Noble, 2006).

Hechas las precisiones necesarias, reformulemos ahora la pregunta que actuará como leitmotiv: ¿en qué medida la perspectiva de la complejidad nos ayuda a entender lo que es un viviente? Adelanto mi tesis: una característica esencial de los vivientes es la complejidad, pero existen diversos tipos de complejidad, como veremos en el apartado 2. Cuando la complejidad se refiere a vivientes —biocomplejidad, digamos— se remite necesariamente a otros conceptos más radicales, como el de organización y el de función (apartado 3). Este, a su vez, nos llevará, a través de ciertas consideraciones aristotélicas, al de sustancia (apartado 4). Sólo dentro de esta constelación de conceptos, y en conexión con los mismos, la biocomplejidad resulta explicativa. Dicho de otro modo, la complejidad no es la característica más radical y distintiva de los vivientes, pero es imprescindible para guiarnos hacia la intelección de la vida. Este es el balance que propongo como respuesta a la pregunta formulada.

## 2. COMPLEJIDAD Y ORGANIZACIÓN

Es un hecho que los seres vivos y los ecosistemas aparecen ante nuestros ojos como entidades complejas. Todas las señas de identidad de las entidades complejas las encontramos ya en una primera aproximación fenomenológica a lo vivo. Cada ser vivo y cada ecosistema están compuestos de numerosísimas y muy diversas partes. Estas partes interactúan, se comunican, intercambian materia, energía e informa-

<sup>4</sup> La filósofa americana Sandra Mitchell (2009), en este y otros libros, defiende lo que denomina “integrative pluralism”.

ción. Lo hacen tanto en horizontal, como en vertical. En horizontal se comunican, por ejemplo, las células de un mismo tejido. En vertical se da interacción a través de diversos niveles jerárquicos: por ejemplo, la configuración del campo tisular influye sobre la diferenciación de cada célula. Estas interacciones son de ida y vuelta, de modo que se generan ciclos de retroalimentación tanto en horizontal como en vertical. Estos ciclos a su vez permiten el mantenimiento de equilibrios homeostáticos. Cada ser vivo es un sistema dinámico, inseparable de la dimensión temporal. Muchos procesos vivos resultan impredecibles, pasan por bifurcaciones críticas, se comportan de modo no lineal, hacen aparecer características emergentes. Lo vivo exhibe, en resumen, todas las características de lo complejo.

Permítaseme, tan sólo a título indicativo, apuntar algunos datos. La biomasa en su conjunto pesa cerca de 2 billones de toneladas. Esta masa podría ser homogénea, pero lejos de ello, la cantidad estimada de especies de seres vivos es de entre 10 y 200 millones. Es tan sólo una estimación, pues no conocemos ni siquiera 2 millones de especies. De ellas, la mayor parte son de insectos, cerca de un millón. El resto se reparten entre plantas y otros animales. Las especies de mamíferos conocidas están por debajo de las cinco mil. En cuanto al número de individuos vivos, si nos fijamos tan sólo en los animales, tenemos ya del orden de un trillón. Si queremos establecer una comparación con lo no vivo, recordemos que no hay más allá de 200 mil millones de estrellas en nuestra galaxia. Menos que aves sobre el nuestro planeta (unos 300 mil millones), y mucho menos que hormigas (unos diez mil billones).<sup>5</sup> En cuanto a la complejidad de cada uno de los individuos vivos, recordemos tan sólo que se calcula que el cuerpo humano está compuesto por un centenar de billones de células de muchos tipos diferentes, y que en su cerebro hay un número parecido de conexiones interneuronales.

El desarrollo contemporáneo de la biomedicina nos ha mostrado, pues, la complejidad de lo vivo. Esta conciencia ha hecho surgir nuevos modos de aproximación al fenómeno de la vida. En un artículo reciente, el bioquímico y filósofo español Ignacio Núñez de Castro recuerda que se han dado

tres grandes periodos que se corresponden con otras tantas cosmovisiones (vitalista, materialista y organicista): la del *Timeo* platónico, donde el universo es imaginado como un inmenso viviente, la dominada por la cosmología mecanicista y la tercera sería la del paradigma de la complejidad. (Núñez, 2009a)

[...] Se perfila, así, una racionalidad, un *lógos* para *bíos*, diferente de la racionalidad lineal mecanicista, en la que no es posible un reduccionismo epistemológico, puesto que la metodología y el discurso de las ciencias físicas y químicas es incapaz de abarcar los fenómenos de gran complejidad, donde aparecen propiedades emergentes en el todo y donde acontece también una influencia causal del todo sobre los elementos estructurales y funcionales del sistema. (Núñez, 2009b)

Incluso algunos autores han sostenido que el paradigma de la complejidad es tan importante en biología que a un tiempo complementa y limita el seleccionismo darwinista:

---

<sup>5</sup> Los datos han sido tomados y redondeados a partir de Gleich, et al. (2000, pp.258–274).

De hecho, encontraremos límites al poder de la selección –arriesga Kauffman–: A medida que las entidades afectadas por la selección se vuelven progresivamente más complejas, la selección se vuelve menos capaz de evitar los rasgos típicos de estos sistemas. En consecuencia, en la medida en que los sistemas complejos exhiben un orden espontáneo, este orden no brilla gracias a la selección, sino a pesar de ella. (Kauffman, 1993, p.xv)

Es cierto que el aumento de la complejidad a lo largo del proceso evolutivo es uno de los rasgos intuitivamente más marcados del mismo. Asimismo, ha sido históricamente uno de los fenómenos más refractarios a la explicación seleccionista. Pero, dada la importancia del mismo, los teóricos darwinistas no han dejado de esforzarse por explicar la complejidad (Rosenberg y McShea, 2008). Igualmente es verdad que la intuición del aumento evolutivo de la complejidad siempre ha resultado difícil de precisar en conceptos claros y medidas. Como nos recuerdan Alexander Rosenberg y Daniel W. McShea (2008, p.155): “Hay más de un significado de complejidad, y necesitamos especificar de cuál estamos hablando”.

Tan es así, que Philippe Binder (2001, p.43) nos habla de la existencia de no menos de treinta definiciones propuestas de complejidad: “Cada vez que se abre una nueva institución dedicada a la complejidad, el significado del término mismo es razón para muchas horas de debate”. En este piélago tal vez podamos orientarnos gracias a algunas clasificaciones. Nicholas Rescher (1998) distingue entre modos epistémicos y modos ontológicos de la complejidad. Carlos E. Maldonado (2001, p.12), tras comentar los diferentes subtipos que introduce Rescher, propone una clasificación de nuevo bipartita: complejidad computacional y complejidad efectiva. Por su parte, Henri Atlan (1991a, p.9) nos habla de la complejidad como problema y la complejidad como explicación. Es suficiente para darnos cuenta de que al hablar de complejidad, unas veces nos referimos al mundo y otras a nuestra forma de captarlo, comprenderlo, explicarlo, teorizarlo, representarlo o computarlo.

Decimos de la realidad, o de una parte de ella, que es compleja (complejidad en sentido ontológico). Decimos, además, que no llegaremos a entenderla mediante teorías simples, que necesitaremos esquemas teóricos complejos (complejidad en sentido epistemológico). Las distintas escuelas de la complejidad sostienen, explícita o implícitamente, ambas afirmaciones. Carlos E. Maldonado (2001, p.12 y ss.) resume lo más esencial de tres de ellas. Entiende que en la escuela de Edgar Morin (1995) la complejidad se toma sobre todo como método. En el caso de la llamada Escuela de Palo Alto (Bateson, Capra) la complejidad alienta una entera cosmovisión. Y existe, en tercer lugar, una corriente plural que tiende aplicar el paradigma de la complejidad a las distintas ramas de la ciencia. Aquí podríamos citar, desde el precedente del matemático Poincaré, hasta el termodinámico Prigogine, pasando por numerosos biólogos, neurofisiólogos, especialistas en computación y robótica, psicólogos, economistas, sociólogos, etc. Una visión general de las aplicaciones científicas de la complejidad la tenemos en el libro compilado por Henri Atlan (1991b), *Les théories de la complexité*, comenzando por las ciencias formales, prosiguiendo con las físicas y biológicas, para concluir con las ciencias humanas y sociales. En todas ellas ha tenido uso la perspectiva de la complejidad.

Volvamos ahora a nuestra pregunta: ¿en qué medida la perspectiva de la complejidad nos ayuda a entender lo que es un viviente? Recordemos la abundancia de campos en los que de hecho se aplica. Esto parece indicarnos que la complejidad, o al menos alguna versión de la misma, está presente en las más diversas partes de la realidad. En el mundo físico hay complejidad, también en el mundo conceptual de las matemáticas y la computación, las sociedades son complejas, como lo es nuestra psique, y hasta un buen número de artefactos pueden reputarse complejos. ¿Podemos decir, entonces, que la complejidad es lo distintivo de la vida?, ¿no será sencillamente una característica que los seres vivos comparten con casi cualquier otro ámbito de lo real? Desde mi punto de vista, la conexión estrecha entre lo complejo y lo vivo se puede sostener siempre que precisemos: la complejidad que nos ayuda en la intelección de la vida es un tipo muy especial de complejidad. Se trata de *complejidad con sentido*.

Existe la complejidad sin sentido, por supuesto. En palabras de Henri Atlan y Moshe Koppel, podemos decir que:

han sido imaginadas varias maneras cómodas de medir la complejidad, como por ejemplo la entropía de Shannon y la complejidad-longitud del programa de Kolmogorov. No obstante, podemos darnos cuenta fácilmente de que estas medidas son inadecuadas cuando se trata de caracterizar la complejidad biológica. (Koppel y Atlan, 1991, p.191)

Estas medidas captan más bien el desorden, la ausencia de regularidades y restricciones. Adquieren valores máximos del lado del caos y la irregularidad. Por el contrario, sus valores son mínimos en el polo de la redundancia y la monotonía. Pero los seres vivos son distintos tanto del humo como del cristal, por utilizar la terminología de Atlan (1990). La complejidad de los vivientes es ortogonal a la línea que establecen las medidas de Shannon y de Kolmogorov. Fue el físico Schrödinger (1986 [1944], p.85) quien popularizó la fórmula “cristal aperiódico” para referirse a ciertas biomoléculas. Es notable que la fecha del libro de Schrödinger sea anterior en más de una década al descubrimiento por parte de Watson y Crick de la estructura del ADN. La fórmula de Schrödinger apunta al hecho de que las biomoléculas tienen un cierto orden análogo al de los cristales, pero, a diferencia de lo que ocurre con estos, no es el orden generado por la repetición periódica de un módulo. Es decir, son moléculas complejas. Mas su complejidad no es la del caos, a diferencia de las secuencias complejas de Kolmogorov. Y en el mundo inorgánico estudiado por las ciencias físicas también hay complejidad, pero de nuevo encontramos esta noción vinculada a la de desorden (Guyon, 1991).

De hecho, el sociólogo alemán Niklas Luhmann opone complejidad a sentido:

Estos dos tipos de conocimiento –dice Luhmann en referencia a las ciencias y a las humanidades– se han percatado de problemas aparentemente insolubles, y ya no se identifican con una materia o dominio específico, sino más bien con un problema: la complejidad en el caso de las ciencias y el sentido en el caso de las humanidades. (Luhmann, 1998 [1982], p.25)

Hay complejidad, por un lado, y sentido, por otro. La cuestión grave consiste en dotar de sentido a la complejidad.<sup>6</sup> La complejidad sin sentido nada aporta a la intelección de lo vivo.

En resumen, lo característico de la vida no será la complejidad como tal –recordemos: hay complejidad en lo inorgánico, en lo conceptual, en lo social y en lo artificial–, sino un determinado tipo de complejidad vinculada a un cierto tipo de orden que no es simple regularidad estructural, sino organización funcional. Complejidad con sentido. Koppel y Atlan (1991, p.191) proponen incluso emplear un término especial para esta forma de complejidad: *sophistication*. “La cantidad interesante que puede aumentar cuando un objeto evoluciona no es la complejidad, sino la sofisticación”. Según estos autores, la sofisticación ha sido formalizada de diferentes maneras, entre ellas como organización. El tipo de complejidad de los vivientes es la complejidad con sentido, la sofisticación, o para decirlo en terminología más estándar, la organización.

Es cierto que en lo conceptual, en lo social y en lo artificial también se da complejidad con sentido u organización. Pero también lo es que todos estos ámbitos de la realidad surgen gracias a la actividad de los seres vivos, y muy especialmente de los seres humanos. Digamos, que la fusión de complejidad y sentido se produce por primera vez y de un modo decisivo en lo viviente. El resto de los ámbitos en los que se puede encontrar organización son, en este sentido, tributarios y herederos de lo vivo.

Preguntémonos de nuevo: ¿en qué medida la perspectiva de la complejidad nos ayuda a entender lo que es un viviente? Bien, ya sabemos que para profundizar en la intelección de lo vivo debemos centrarnos en esta versión específica de la complejidad que hemos llamado la organización.

### 3. ORGANIZACIÓN Y FUNCIÓN

Hace ahora 150 años, Darwin escribió en *El origen de las especies* sobre “el vago e imperfectamente definido sentimiento, sentido por muchos paleontólogos, de que la organización en general ha progresado [*that organization on the whole has progressed*]” (Darwin, 1859, p.345). La organización, tan patente en los seres vivos como para producir esa sensación de la que habla Darwin, esta relacionada con el orden, pero no es lo mismo.<sup>7</sup> Decimos que existe orden en un cierto ámbito si los componentes, relaciones o acciones se ajustan a una cierta pauta estructural. De un cristal se dice que está ordenado. También podemos decirlo de una onda que presenta una cierta frecuencia. El orden se dice por relación a una cierta estructura. Por su parte, la organización tiene más de funcional que de estructural. La secuencia de aminoácidos en una globina, las bases en un segmento de ADN o las neuronas y sus conexiones, raramente presentan una pauta estructural clara. Sin embargo, están organizadas funcionalmente. La globina cumple con la función de transportar oxígeno, el gen tiene por función codificar una determinada proteína, y la red

<sup>6</sup> Sobre la complejidad en el terreno de la sociología puede verse Pérez y Sánchez (1996).

<sup>7</sup> Sobre orden y organización puede verse Marcos (1991).

neuronal facilita, por ejemplo, un cierto movimiento corporal. Dicho de otro modo, si se nos muestran dos fragmentos distintos de ADN, no podremos decir cuál está organizado y cuál no, a menos que sepamos cómo sería el funcionamiento de cada uno de ellos en un ser vivo determinado. De hecho, con frecuencia nombramos las biomoléculas por su función más que por su estructura.

Observamos que para la intelección de los vivientes, el concepto de organización constituye una estación de paso. Nos lleva necesariamente a otro más básico, el de función. Existen actualmente dos grandes líneas de pensamiento sobre las funciones. Los textos clásicos y seminales al respecto son los artículos escritos por Larry Wright (1973) y por Robert Cummins (1975). Cada uno a su modo da cuenta de la importancia que tienen las explicaciones funcionales en biología (y no sólo en biología, sino también en otras ciencias y disciplinas tecnológicas). A partir de estos textos y del debate posterior, se han ido consolidando tres grandes teorías de las funciones: la teoría seleccionista (SEL), la intencionalista (INT) y la sistémica (SYS). Las dos primeras están en la línea del análisis de Wright, ambas pueden considerarse como teorías *etiológicas* de las funciones. Es decir, entienden que la función de algo es *causa* de su existencia o posición. Según SEL, cuando decimos que una entidad tiene una cierta función, estamos diciendo que esa entidad existe o está presente en un determinado lugar porque ha sido *seleccionada* a causa de que es capaz de realizar esa función. INT afirma que la causa de que exista o esté donde está una entidad es que alguien la ha diseñado así con la *intención* de que cumpla una cierta función. SEL parece pensada sobre todo para el ámbito biológico, en el que se da la evolución por selección, mientras que INT está orientada principalmente al ámbito de lo artificial. La tercera teoría (SYS) parte de las ideas de Cummins. Según ésta, la atribución de una función a cualquier entidad no nos sirve para explicar su existencia o posición, sino sólo para explicar el funcionamiento del *sistema* en el que se halla integrada.

¿Qué clase de teoría de las funciones será más adecuada para entender el mundo de lo vivo?, ¿una de corte etiológico al estilo de SEL, o una de corte sistémico como la que propone Cummins?

Desde mi punto de vista, el principal déficit de esta segunda en el terreno biológico reside en su relativismo y falta de realismo. Se discute si las funciones son entidades ficticias, si tienen únicamente una base subjetiva o si, por el contrario, son propiedades con existencia real, objetiva e independiente de cualquier sujeto cognoscente. La respuesta de SEL sería que las funciones son realidades objetivas, presentes efectivamente en los seres vivos como resultado producido por la selección natural. La teoría SYS, en cambio, se pregunta por la contribución de una parte al funcionamiento del sistema al que pertenece. Es decir, para esta teoría las funciones no están ahí, en la realidad, porque no lo están los sistemas como tales. Es el observador el que decide delimitar una cierta parte de la realidad como un sistema, y en consecuencia establece lo que son sus funciones. Por ejemplo, puedo considerar un automóvil como un sistema, cuya función es el transporte. Dentro de este sistema, el motor tiene su función, así como las ruedas. Su función consiste en la contribución que hacen a la función del sistema. La función del motor es



impulsar y la de las ruedas convertir ese impulso en desplazamiento. Pero puedo considerar el automóvil también como parte de una orquesta de música contemporánea. Aquí su función es producir un sonido. La función del motor es generar ese sonido y la de las ruedas meramente soportar el peso del “instrumento”. Esta visión de las funciones no parece muy adecuada para los seres vivos, cuya existencia como totalidades funcionales es objetiva. Cuando hablamos de vivientes habría que tratar de evitar el sesgo relativista de la teoría sistémica de las funciones. Si las funciones no son realidades objetivas, sino sólo relativas al ojo del observador, entonces necesariamente también la complejidad de los vivientes, que depende de su aspecto funcional, como hemos visto, resultará relativa y subjetiva.

Algunos teóricos de la complejidad abogarían por una noción de complejidad así. Por ejemplo, el sociólogo español Ramón Ramos Torre afirma respecto de la complejidad: “No hemos de concebirla como una propiedad intrínseca del mundo o de sus objetos. Se asegura así que no hay nada que sea en sí mismo complejo o simple, sino sólo algo que se puede conceptualizar como tal en relación a un posible observador [...] Se trata, pues, de una propiedad siempre contextual y ligada a la observación de unos sistemas sobre otros. Nada es, pues, intrínsecamente simple o complejo” (Ramos, 1996, p.164). No entro en la discusión sobre la complejidad social, que pudiera ser tan subjetiva como aquí se sostiene. Pero en el caso de la complejidad biológica, la posición de Ramos Torre es poco plausible. Si pudiéramos conceptualizar los sistemas vivos como simples o como complejos a nuestro antojo, los conceptualizaríamos como simples. Eso, obviamente, y en un doble sentido, nos haría la vida más fácil. La perspectiva de la complejidad llega a la biología precisamente forzada por limitaciones de los programas reduccionistas. El mundo de lo vivo se ha mostrado refractario a la simplificación. La biocomplejidad no se *pliega* a nuestro gusto. Lo viviente es intrínsecamente complejo. Siendo así, no podemos hacer depender la complejidad biológica de una teoría de las funciones como SYS, necesitaremos más bien una de carácter realista. Por su parte, SEL presenta también severos problemas, pues anula la funcionalidad de cualquier estructura que haya sido fruto de la selección. Quizá se requiera una nueva teoría de las funciones más adecuada a lo que entendemos por organización y biocomplejidad. En esta línea están trabajando ya algunos filósofos de la biología, como Alvaro Moreno y Cristian Saborido y Matteo Mossio (Mossio, Saborido & Moreno, 2009).

#### 4. FUNCIÓN Y SUSTANCIA

Con todo, la noción de función también resultará una estación intermedia, especialmente si queremos interpretarla en clave realista. Existen de verdad funciones biológicas en la medida en la que existen los seres vivos como sustancias reales. La función se establece por la sustancia a la que hace referencia. La oxidación de una hemoglobina, por ejemplo, cumple una función para el ser vivo, mientras que la oxidación de un trozo de mineral de hierro carece de función. Ambos son procesos físico-químicos semejantes, pero sólo uno de ellos es una función. Lo es porque está integrado en una sustancia viva. Según las palabras utilizadas por Ignacio Núñez

de Castro (2009a): “Los organismos vivos se comportan como totalidades, donde los elementos estructurales y funcionales están interconectados entre sí, formando una unidad [...] Una función no viene determinada nunca por una estructura particular, sino por el contexto de la organización y del medio en que dicha estructura se encuentra sumergida”. El filósofo de la biología francés Jean Gayon (2005) llega a sostener que incluso una molécula inorgánica, como la de oxígeno, tiene funciones cuando está integrada en una sustancia viva.

Para explicar por qué los pensadores anteriores a él no emplearon explicaciones funcionales, Aristóteles nos dice: “El motivo de que nuestros predecesores [Empédocles y Demócrito] no llegaran a este método es que no disponían del concepto de esencia (*to ti en éinai*) ni de la definición de sustancia (*ousía*)” (*De Partibus Animalium* (PA) 642a 10–21).

Es decir, la forma que organiza todo el desarrollo y el comportamiento de los vivientes, actuando como fin, es la propia sustancia, el propio ser vivo. En la medida en que se da esta identificación entre el fin y la sustancia (el ser vivo), las funciones serán reales y objetivas como lo es el ser vivo en cuestión. La identificación entre forma, sustancia y causa final es clara en los siguientes textos del biólogo y filósofo griego:

Y puesto que la naturaleza puede entenderse como materia y como forma, y puesto que esta última es el fin, mientras que todo lo demás está en función del fin, la forma tiene que ser causa como causa final. (*Física* 199a 30–33)

Como todo instrumento existe para algo, y cada parte del cuerpo tiene una finalidad, y esta finalidad es una acción, es evidente que el cuerpo en su conjunto también está constituido con vistas a la acción integral. En efecto, la acción de serrar no se ha producido para la sierra, sino la sierra para serrar, pues serrar es su utilidad. Por consiguiente, también el cuerpo es, de alguna manera, para el alma, así como las partes son para las funciones para las cuales nació cada una. (PA 645b 14–20)

Una vez que ésta [el alma] se va ya no hay un ser vivo y ninguna de las partes sigue siendo tal. (PA 641a 18–22)

Así pues, respecto de la cuestión del realismo, la teoría aristotélica parece avalar la realidad plena y objetiva de las funciones, como disposiciones o capacidades de ciertas entidades, y también como acciones efectivas llevadas a cabo por las mismas. Las funciones biológicas no son en ningún caso entidades abstractas, como puedan serlo las entidades matemáticas, sino entidades *físicas*<sup>8</sup> perfectamente objetivas cuya existencia no depende del observador:

Además es imposible que el estudio de la naturaleza se dedique a las abstracciones, porque la naturaleza hace todo con alguna finalidad. Parece que del mismo modo que el arte está presente en los objetos artificiales, también en las propias cosas existe algún otro principio y causa análogos que captamos, tal como captamos el calor y el frío. (PA 641b 10–15)

<sup>8</sup> Aclaremos que aquí “físico” se opone a “mental”, no a “biológico”. Lo que quiero decir es que las funciones de los seres vivos son entidades reales, no meramente conceptuales.

Aclaremos que las funciones son reales no sólo en tanto que disposiciones, efectos o acciones, sino propiamente como funciones. Es decir, podemos distinguir una función de una disposición o efecto que no sea función. Para ello necesitamos conocer la forma del organismo en el que se da. Pero hay que recordar que la forma de un ser vivo es una *forma de vida*. Si la disposición o efecto considerado contribuye positivamente a esta forma de vida, entonces será una función. Por ello, el mismo proceso de división celular puede resultar funcional cuando favorece el desarrollo de un tejido sano y disfuncional cuando se da en un tumor. Es obvio que si no referimos el proceso al ser vivo concreto en el cual se produce, difícilmente podremos distinguir su carácter funcional.

La cuestión reside en establecer lo qué existe, qué tipo de cosas hay en el universo. Si pensamos que los constituyentes primeros de la realidad son sólo las partes simples, átomos o moléculas, incluso partículas subatómicas o fuerzas elementales, entonces será muy difícil, tal vez imposible, entender lo que es un organismo complejo. En consecuencia, deberíamos admitir una ontología –no solo una metodología– pluralista, con partículas y fuerzas elementales, sí, pero también con vivientes complejos, como componentes primigenios de la realidad. Si reconocemos que cada viviente es una sustancia, una entidad por sí mismo, entonces será posible explicar la relación entre sus partes y la relación de las partes con el todo. Si vemos cada viviente sólo como el resultado de la agregación de partes, resultará muy difícil justificar ese *algo más* a que hace referencia la perspectiva de la complejidad. Porque ese *algo más* es la propia sustancia, el viviente como tal, que se ha formado por diferenciación, no por agregación de partes preexistentes.

Su reconocimiento como sustancia explica también su capacidad causal (causalidad *top-down*). Cada viviente, como sustancia que es, actúa sobre sus partes.<sup>9</sup> Las organiza y coordina de modo que resulten funcionales, es decir, que actúen a favor del conjunto, de la totalidad, del viviente como tal. En este sentido la causalidad *top-down* está vinculada a la funcionalidad, a la organización y a la complejidad.

## 5. CONCLUSIÓN

Una vez constatadas las aportaciones del enfoque reduccionista a nuestro conocimiento de los seres vivos, pero también sus indudables limitaciones, hemos querido aquí evaluar las posibilidades que ofrece la nueva perspectiva de la complejidad para la intelección de lo vivo. Hemos comprobado que los seres vivos presentan todas las características de lo complejo, y que su complejidad es genuina e irreductible. Difícilmente, por tanto, podríamos entender lo que son los vivientes sin la perspectiva de la complejidad. Pero dicho concepto no es suficiente como caracterización de lo vivo. Encontramos complejidad también en otros ámbitos de la realidad ajenos a lo biológico. Este hecho nos lleva a preguntarnos por lo que tiene

<sup>9</sup> Sobre la necesidad de ampliar los modelos causales en la ciencia contemporánea, hasta incluir la perspectiva teleológica o causalidad *top-down*, puede verse Nagel (2012). Cf. también Noble (2006). En el mismo sentido han hablado numerosos científicos, desde W. Heisenberg a C.H. Waddington, por citar dos de los más relevantes.

de específico la biocomplejidad. Lo propio de la biocomplejidad es que se trata de una complejidad con sentido. La complejidad con sentido es asociada por algunos autores, como Henri Atlan, con la organización, que, a diferencia del orden, apunta en un sentido funcional. Dicho de otra forma, sólo por referencia a una función podemos saber si hay o no organización. O lo que es lo mismo, sólo la referencia a una función nos permite establecer el sentido de la complejidad característico de lo viviente. Pero, como sugieren los textos de Aristóteles, las funciones, a su vez, remiten a una realidad ontológicamente anterior, la de la sustancia. Si miramos ahora con perspectiva, vemos como nuestro recorrido nos ha llevado desde la pluralidad de lo complejo hasta la unidad de la sustancia. Quizá esto sea lo que caracteriza profundamente a los vivientes: su capacidad para integrar unidad y complejidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aristóteles. *De Partibus Animalium*. [N. del editor: Existe traducción al español, disponible en el site: <http://www.hermanosdearmas.es/aristoteles/>]
- Aristóteles. *Física*. [N. del editor: Existe traducción al español, disponible en el sitio web: <http://www.hermanosdearmas.es/aristoteles/>]
- Atlan, H., [1979] 1990. *Entre el cristal y el humo*. Madrid: Debate.
- Atlan, H., 1991a. L'intuition du complexe et ses théorisations. En: Atlan, H. (ed.), *Les théories de la complexité*. París: Seuil.
- Atlan, H. (ed.), 1991b. *Les théories de la complexité*. París: Seuil.
- Ayala, F.J. y Dobzhansky, T. (eds.), 1974. *Studies in the Philosophy of Biology*. Londres: Macmillan.
- Ayala, F.J. y Dobzhansky, T. (eds.), 1983. *Estudios de filosofía de la biología*. Trad. del inglés por C. Pijoan Rotge. Barcelona: Ariel.
- Bertolaso, M., 2012. *Il cancro come questione*. Milán: Franco Angeli.
- Binder, P., 2001. Cuatro versiones sobre la complejidad. En: Maldonado, C.E. (ed.), *Visiones sobre la complejidad*. Bogotá: Universidad El Bosque.
- Cummins, R., 1975. Functional analysis. *The Journal of Philosophy*, 72(20), nov, pp.741–760. doi:10.2307/2024640.
- Darwin, C., 1859. *On the Origin of Species*. Londres: John Murray.
- Dobzhansky, T., Ayala, F., Stebbins, G.L. y Valentine, J.W., 1983. *Evolución*. Barcelona: Omega. [1981, *Evolution*. San Francisco: Freeman and Co.]
- Gayon, J., 2005. Has oxygen a function in organisms? In: International Society for the History, Philosophy, and Social Studies of Biology (ISHPSSB) Meeting in Guelph, Ontario, Canada, July 13–17 2005.
- Gleich, M., et al., 2000. *Las cuentas de la vida*. Barcelona: Galaxia Gutenberg.
- Guyon, E., 1991. Une lecture du désordre de la matière. En: Atlan, H. (ed.), 1991. *Les théories de la complexité*. París: Seuil. pp.135–150.
- Kauffman, S.A., 1993. *The origin of order*. New York: Oxford University Press.
- Koppel, M. y Atlan, H., 1991. Les gènes: programme ou dones? En: Atlan, H. (ed.), 1991. *Les théories de la complexité*. París: Seuil. pp.188–204.
- Luhmann, N., [1982] 1998. Complejidad y sentido. En: Luhmann, N., *Complejidad y modernidad*. Madrid: Trotta.

- Maldonado, C.E., 2001. Esbozo de una filosofía de la lógica de la complejidad. En: Maldonado, C.E. (ed.), *Visiones sobre la complejidad*. Bogotá: Universidad El Bosque. pp.9–26.
- Marcos, A., 1991. Información y entropía. *Arbor. Ciencia, pensamiento y cultura*, CXL(549), pp.111–135.
- Mitchell, S., 2009. *Unsimple Truths. Science, Complexity and Policy*. Chicago: University of Chicago Press.
- Morin, E., 1995. *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona: Gedisa.
- Mossio, M., Saborido, C. & Moreno, A., 2009. An organizational account of biological functions. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 60(4), pp.813–841.
- Nagel, T., 2012. *Mind and Cosmos. Why the Materialist Neo-Darwinian Conception of Nature Is Almost Certainly False*. New York: Oxford University Press.
- Noble, D., 2006. *The Music of Life: Biology Beyond Genes*. New York: Oxford University Press.
- Núñez de Castro, I., 2009a. Una nueva alianza entre la biología y la filosofía es necesaria para el estudio de la vida. Biofilosofía (I): complejidad holística y teleonomía, en busca del lógos para bíos. [online] Disponible en: [tendencias21.net](http://tendencias21.net) [consultado: 12.julio.2009].
- Núñez de Castro, I., 2009b. Emerge una nueva racionalidad sistémica de la vida. Biofilosofía (II): el darwinismo clásico desemboca en el paradigma evo-devo. [online] Disponible en: [tendencias21.net](http://tendencias21.net) [consultado: 12.julio.2009].
- Pérez, A. y Sánchez, I., (eds.), 1996. *Complejidad y teoría social*. Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS).
- Ramos, R., 1996. Jano y el ornitorrinco: aspectos de la complejidad social. En: Pérez, A. y Sánchez, I. (eds.), *Complejidad y teoría social*, Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS). pp.163–201.
- Rescher, N., 1998. *Complexity: A Philosophical Overview*. Londres: Transaction Publishers.
- Rosenberg, A. y McShea, D.W., 2008. Complexity, directionality, and progress in evolution. En: *Philosophy of Biology: A Contemporary Introduction*. New York: Routledge. Ch. 5, pp.127–156.
- Schrödinger, E., [1944] 1986. *¿Qué es la vida?* Barcelona: Orbis.
- Wright, L., 1973. Functions. *Philosophical Review*, 82(2), pp.139–168.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## BIOCOMPLEJIDAD DE LA ENFERMEDAD HUMANA

*Alberto Lifshitz\**

### GENERALIDADES

EN el disculpable afán de volver asequible la función curativa, se han fraguado distintas tentativas que pretenden hacerla parecer simplista y convertirla en una medicina de vademécum, en la que, a partir de un manual del usuario se encuentran las respuestas fáciles. Cuando surgió el modelo microbiológico, la práctica de la medicina se veía con un esquema de tres columnas: el nombre de la enfermedad (diagnóstico nosológico), el nombre del microbio que la causa (diagnóstico etiológico) y el medicamento que lo combate (terapéutica farmacológica), y todavía hay quien la concibe de esta manera. Además, cada una de esas columnas refiere a un catálogo restringido, pues los diagnósticos nosológicos, los microbios y los medicamentos, tienen que estar contenidos en él. Si lo que al enfermo aqueja no corresponde a los contenidos del catálogo en cuestión, se entra en zozobra y no puede continuarse su atención. No es raro escuchar la aseveración de que un paciente no tiene nada porque no corresponde a las descripciones del catálogo, a pesar de que evidentemente está sufriendo. Cuando el enfoque es hacia un síntoma la respuesta suele ser el llamado tratamiento sintomático (que mejor sería llamar antisintomático) que tan sólo pretende hacerlo desaparecer y no tanto investigar su causa y significado.

Habría que reconocer que el diagnóstico nosológico no es más que un constructo, que tiene propósitos operativos y didácticos, pero que no siempre traduce la realidad. El catálogo de enfermedades es, acaso, un referente, para unificar la comunicación y ayudar a las decisiones. Este diagnóstico tiene una función taxonómica que permite agrupar a los pacientes según ciertas características, pero soslayando muchas otras; tiene también una función referencial o denotativa que permite la comunicación entre pares, una función explicativa que ayuda a entender y explicar lo que ha ocurrido en un cierto sujeto enfermo, y una función ejecutiva, porque a partir del diagnóstico se pueden tomar decisiones.

La enfermedad tiene varios planos. El de las causas y mecanismos de daño; el de las lesiones o daño a los tejidos y órganos; el del mecanismo de producción de los síntomas y signos; el del sufrimiento y su percepción; el de las complicaciones y secuelas; el de la interpretación personal; el del pronóstico y predicción; el de su

\* Secretaría de Enseñanza Clínica, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México.

ubicación taxonómica; el de su abordaje preventivo y terapéutico. La doctrina ha inventado términos para cada uno de ellos: etiología, patogenia, patología, fisiopatología, sintomatología, signología, semiología, nosología, profilaxis y terapéutica. Hablar de complejidad casi ni permite analizar por separado cada uno de estos planos, pero conviene particularizarlos para luego enlazarlos en redes (De Vito, 2016). El enfoque de la complejidad permite recuperar la visión del enfermo pero también la científicidad de la medicina (De Pomposo, 2015). En este texto se exponen algunos conceptos de la teoría de la complejidad aplicables a la medicina, bajo la visión de un clínico y no la de un investigador básico o un epidemiólogo, aceptando que los tres contienden con la enfermedad. De antemano se admite que la empresa es difícil y que parece un mayor consuelo el enfoque reduccionista y lineal, porque finalmente resulta prescriptivo, y a veces lo que se busca es dar resultados inmediatos. Bajo esta perspectiva, en la segunda parte se aborda el caso de la diabetes.

### Las causas

La atribución del origen de las enfermedades humanas ha pasado por muchas etapas. Las más conspicuas se refieren al castigo divino, una prueba a que lo somete la divinidad, el daño generado por un tercero (magia, maldición), el poder dañino de algún alimento o contacto, los miasmas y en épocas más recientes los microbios, los estilos de vida, los tóxicos ambientales y otros agentes. La idea de abordar las enfermedades por sus causas dio origen al modelo etiológico en el que el diagnóstico tenía que ser referido a la causa y el tratamiento tenía que dirigirse a lo que la provocó. Lo que no fuera “etiológico” era menospreciado. El diagnóstico y el tratamiento sintomáticos tenían una categoría menor. Si en una tifoidea sólo se atendía la fiebre y la cefalea, y no se combatía la *salmonella*, el tratamiento era claramente insuficiente e ineficaz.

El cambio ocurrió a partir de la conciencia de que todas las enfermedades son multicausales. La misma salmonela provoca diferentes síntomas y signos, vale decir, diferentes padecimientos, y aún puede transcurrir inadvertida. Las variables que participan incluyen –entre las conocidas– la magnitud del inóculo, el momento en el que ocurre, el estado inmunitario del hospedero, su condición nutricia, el nivel de funcionamiento de sus órganos, la presencia de alimento en el aparato digestivo, la capacidad de percepción del paciente, su interpretación de los síntomas, etc. Si todas las enfermedades son multicausales no puede hablarse propiamente de un diagnóstico y tratamiento etiológicos, porque a cuál de todas las causas se ataca o se refiere. Las interacciones entre estas variables confiere la condición compleja, y cómo, a partir de las combinaciones, se darán las consecuencias y los desenlaces. Esto sitúa también la diferencia entre enfermedad y padecimiento, términos que a veces se usan de manera intercambiable pero que no son sinónimos. Mientras que la enfermedad es, como ya se mencionó, acaso un referente, un artificio didáctico y operativo que sólo existe en los libros o en los esquemas, el padecimiento refleja la realidad del enfermo, con sus peculiaridades y sus rasgos



diferenciados; puede corresponder más o menos cercanamente a la descripción de la enfermedad, pero también puede diferir suficientemente como para dificultar el diagnóstico por analogía. El padecimiento puede corresponder a un fragmento de la enfermedad, a varias enfermedades simultáneas o no corresponder a la descripción de ninguna enfermedad conocida. Esto da vigencia al aforismo de que no hay enfermedades sino enfermos, e ilustra la complejidad, también, de la expresión morbosa.

### La fisiopatología

El término refiere a los cambios que ocurren al interior del organismo a raíz de la acción de los factores etiológicos. Cualquier simplificación es, seguramente, insuficiente. Cada elemento dispara una serie de acontecimientos, algunos visibles y otros ocultos, que sólo pueden integrarse bajo la perspectiva de la complejidad (Villegas, Lifshitz y Cocho, 2015). Entender la enfermedad bajo la perspectiva fisiopatológica implica complejísimas redes de interacción que difícilmente pueden esquematizarse. La participación de los factores genéticos, de los mecanismos de activación o inhibición de los genes, la transcripción de sus mensajes, la biosíntesis de compuestos, la circulación de factores humorales y sus efectos farmacológicos, la acción conjunta de todo esto con estímulos inhibidores y propiciadores, los mecanismos de compensación, etc., conforman un bosquejo que apenas se comprende.

### La comorbilidad

En el marco de ese mismo artificio que significa el diagnóstico nosológico, hoy resulta que tener varias enfermedades concomitantes (o sucesivas) es más la regla que la excepción. A esto se le ha llamado, en no muy buen español, comorbilidad o enfermedades comórbidas. Parece que la presencia de una enfermedad única, sobre todo en pacientes más allá de cierta edad y tratándose de enfermedades crónicas, ya no es un modelo que convenga visualizar como dominante. El mejor ejemplo es el mal llamado “síndrome metabólico”, que surgió a partir de la observación de que al menos la obesidad, hipertensión arterial y diabetes mellitus tenían una coincidencia epidemiológica que sobrepasaba la esperable por azar. Pronto surgieron vínculos fisiopatológicos que permitieron suponer que no se trataba de enfermedades independientes, y ahora se agregan a este complejo también la dislipidemia, acantosis nigricans, hiperuricemia, enfermedad cardiovascular, trastornos del sueño, problemas respiratorios y hasta ciertos cánceres. Todo esto significa no sólo la posibilidad de hacer una mejor interpretación de los fenómenos morbosos, sino una dificultad práctica que tiene que ver con la atención médica: cuál de los problemas atendemos primero, cómo evitar las interacciones de los tratamientos, la jerarquización de los distintos componentes, la necesidad de que participen varios especialistas, etc. (Barnett, et. al., 2012).

## La enfermedad crónica

El modelo clásico de enfermedad se refiere más bien a la enfermedad aguda, en la que una persona percibe una molestia o un riesgo, solicita la atención de un médico, éste interviene y el caso se resuelve de alguna manera. Pareciera que la atención médica tuviera tres momentos: la demanda, el diagnóstico y el tratamiento. Hoy dominan las enfermedades crónicas, aquellas incurables por definición, con las que tiene que convivir el paciente por el resto de su vida y cuyo desenlace es, acaso, la paliación, el control, la desaceleración o la resiliencia. Al no resolverse, el paciente nunca abandona el conjunto de enfermos y éstos se van acumulando dando la apariencia de una epidemia, el abordaje es más educativo que prescriptivo y la esperanza tiene que ser ajustada (Harris et. al., 2017). Convivir con la enfermedad supone para el paciente contender con situaciones inéditas, distinguir entre los procesos de envejecimiento o desarrollo con los morbosos, tomar decisiones complejas como cuándo solicitar ayuda y qué tipo de ayuda, así como las relacionadas con el apego o adherencia al tratamiento, a pesar de ciertos efectos colaterales.

## El pronóstico

La estimación probabilística de los desenlaces conforma una expectativa que tienen los pacientes y sus familias, y que plantean para que se la resuelvan los médicos. A aquellos les interesa más saber cómo le puede ir, que conocer el nombre de su enfermedad, y los médicos hemos rehuído la formalización del pronóstico, tal vez por su complejidad y por eludir los compromisos con él. La tipología simple de los pronósticos (grave, muy grave, estable, mejorado) funciona acaso como indicador, pero estructurar el pronóstico significa conocer el comportamiento de la enfermedad en pacientes similares, la estimación de la capacidad del enfermo para contender con la agresión que enfrenta, conocer a fondo el estado funcional de sus órganos, valorar la capacidad de respuesta individual a los tratamientos y hasta tomar en cuenta variables imponderables u ocultas (Illaraza, 2015).

## Los tratamientos y la polifarmacia

También el esquema de que a cada entidad diagnóstica corresponde una entidad terapéutica, que todas las enfermedades tienen un tratamiento farmacológico específico y que una prescripción es la solución de la mayoría de los casos no es vigente a pesar de las expectativas de los usuarios. Cada caso tiene un número de alternativas terapéuticas y la selección de la más apropiada significa un análisis profundo de las variables que participan. La mayoría de los tratamientos no se enfoca exclusivamente a fármacos sino que hay otras medidas igualmente o más necesarias como por ejemplo alimentarias, de actividad física, psicoterapia, fisioterapia, etc. Pretender resolver cada caso con fármacos, junto con la frecuente comorbilidad, ha propiciado el uso excesivo de medicamentos, a veces uno para cada síntoma, o la llamada iatrogenia en cascada en que se usa un cierto medicamento

para contrarrestar el efecto colateral de otro, el cual se utilizó por las consecuencias que produjo otro más, y así hasta el infinito. Aun en las mejores circunstancias muchos pacientes requieren el uso concomitante de muchos fármacos, lo que se ha dado en llamar “polifarmacia”, lo que representa, sin duda, un elemento de complejidad por las interacciones de las sustancias farmacológicas y el efecto de un tratamiento sobre las enfermedades comórbidas, las que no son objeto de ese medicamento específico.

### El organismo humano como un todo

El artificio de dividir al cuerpo humano y sus enfermedades tiene como propósito la división del trabajo y propiciar un acercamiento didáctico de los estudiantes. Pero los pacientes no se enferman por partes sino que lo hacen de manera integral, aunque pueda predominar la expresión de una parte. La enfermedad en órgano, aparato o sistema, repercute necesariamente en todo el organismo y hasta en las áreas psicológica y social. Esta integridad corresponde por supuesto a un sistema complejo en el que interactúan una gran cantidad de variables que no pueden ser echadas a un lado.

### Influencia de la subjetividad

Entre los elementos que participan en el fenómeno de la enfermedad humana la subjetividad es muy relevante. Hablar de biocomplejidad podría dar la impresión de que se excluye lo subjetivo, pero una característica de lo complejo es la interacción con una variedad casi infinita de variables. La subjetividad es la que le da valor a los acontecimientos que transcurren en el cuerpo humano, propicia las decisiones y las conductas que llevan eventualmente a una curación, matiza la percepción de los síntomas e influye indudablemente en los desenlaces.

### Prevención, anticipación, previsión

El modelo preferido para la atención a las enfermedades es su prevención, la que tiene indudables ventajas por sobre la atención de los daños, tanto desde el punto de vista filosófico como económico. Fuera de las enfermedades prevenibles por vacunación, las demás requieren un abordaje bajo la perspectiva de la complejidad. Considerar que con suprimir un cierto alimento, por ejemplo, se previenen la obesidad, la diabetes, la hipertensión y otras enfermedades cardiovasculares, es desdeñar la importancia de otros factores como la genética, el contagio social, otros concomitantes, el estado funcional, etc. Muchos de los intentos de prevención han sido calificados como sacrificio de las libertades en pos de una probabilidad estadística y, en efecto, acaso se puede estimar probabilísticamente los desenlaces sin la mínima garantía de éxito.

\* \* \*

## EL CASO DE LA DIABETES

Entre las epidemias modernas, la de diabetes ha sido de las que más estragos causan. Originalmente identificada con una deficiencia de insulina, es decir, como una más de las enfermedades carenciales, todo el problema parecía ser conseguir la insulina y sustituir mediante su administración la función que el páncreas no podía realizar. Hoy reconocemos la complejidad de su patogénesis y la de su tratamiento. La diabetes se considera una “enfermedad crónica compleja que requiere atención médica continua con estrategias multifactoriales de reducción de riesgos que van más allá del control glucémico” (ADA, 2016a).

En primer lugar, se reconocen varias enfermedades que caben bajo la denominación de diabetes mellitus y cada una de ellas tiene una patogénesis diferente. En este escrito se hará referencia sólo a la llamada diabetes mellitus tipo 2, que por lo demás es la más frecuente. Cuando se habla de diabetes (sin calificativos) tiende a entenderse que se trata de la diabetes mellitus tipo 2 (DM2). Como todas, esta es una enfermedad multicausal, pero además poligénica, pues hay toda una colección de genes predisponentes y otra de genes protectores, de tal manera que el riesgo se relaciona con la fórmula de cada persona. Estos genes actúan de diversas maneras tanto en términos de la regulación en la secreción de insulina como de su efecto metabólico. Apenas se va esbozando un índice del riesgo genético de una persona que pretendidamente podrá aplicarse para enfocar en ella la prevención. Pero la diversidad de genes es apenas un primer indicio de la complejidad patogénica de la diabetes, porque la expresión de estas predisposiciones también exige un análisis de condiciones epigenéticas que han mostrado una asociación estadística con la aparición clínica de la enfermedad. Cada una de estas condiciones amerita un análisis propio. ¿Qué tanto influyen la exposición a situaciones emocionales fuertes, la alimentación rica en hidratos de carbono, el uso de ciertos fármacos, las enfermedades preexistentes y cómo cada uno de estos factores enciende o apaga los nodos de la red de interacciones?

Ubicar a la diabetes dentro de la nosología convencional también es una suerte de complejidad porque se originó como enfermedad del sistema endocrino, pero hoy se la ubica también como cardiovascular, metabólica, inflamatoria, etc. Se la disputan los endocrinólogos, los internistas, los médicos generales, los cardiólogos y si bien a cada uno corresponde una etapa de su historia natural, ésta en sí misma es compleja; artificialmente se han definido etapas que incluyen los estados prediabéticos, las complicaciones y las secuelas. Las comorbilidades de la diabetes han generado hipótesis que pretenden explicarlas.

El manejo terapéutico es también un universo, no sólo por el creciente número de fármacos que tienen algún efecto sobre la enfermedad, sino por la necesidad de individualizar cada caso y diseñar un tratamiento a la medida, la participación de medidas no farmacológicas, las interacciones con los tratamientos de las enfermedades coexistentes, las variaciones en el apego, etc.

En los renglones anteriores queda el esbozo de porqué la diabetes debe considerarse una enfermedad compleja. A continuación se describirán algunas particularidades que lo ilustran.

## Individuación del diagnóstico

Para todos resulta claro que el sólo enunciado de la palabra diabetes dice bastante poco del enfermo que la padece. Corresponde tan sólo al casillero en el que se agrupan todos los que llenan un cierto criterio diagnóstico, pero si bien éste es el factor común, las diferencias entre uno y otro son muy variadas. Por ejemplo, no es lo mismo una diabetes reciente que una más antigua, aunque reconocemos que la antigüedad de la enfermedad suele ser más aparente que real porque hace referencia al momento del diagnóstico, el cual no traduce el inicio de los cambios que ocurren en el cuerpo. Hay indicios de que al momento del diagnóstico muchos pacientes tienen ya daños estructurales que no corresponden a una enfermedad inicial; por ejemplo, la secreción de insulina al momento del diagnóstico ya muestra una disminución significativa. Las secuelas de la diabetes, entre las que se incluyen principalmente enfermedades vasculares (micro y macro), suelen aparecer en función de la exposición de los órganos a los cambios metabólicos que forman parte de la enfermedad y esta exposición depende del tiempo y del nivel de control. Este último también es una variable que depende, desde luego, del tratamiento prescrito, pero también de la severidad de la enfermedad; parece claro que hay diabetes graves y diabetes leves, aun entre la diabetes tipo 2.

El diagnóstico tiene que incluir las comorbilidades que en diabetes son comunes. La obesidad ya casi no se considera comórbida en la medida en que se asume como una parte de la historia natural ya sea de manera aislada o en forma de síndrome metabólico. La asociación con hipertensión sobrepasa la probabilidad de una concurrencia en el mismo grupo de edad y es obvio que el abordaje de un paciente con diabetes e hipertensión tiene que ser diferente del de un diabético sin hipertensión. Y, como estas, se pueden considerar otras enfermedades comórbidas.

Pero hay otra faceta de la individuación del diagnóstico y se refiere a características más personales del paciente: su edad, el estado funcional de su organismo, qué tan informado está, qué tan convencido, qué tan disciplinado es, con qué recursos cuenta, qué redes sociales lo apoyan, qué tan competente, etc. porque a partir de estos atributos también tiene que hacerse la planeación de su atención.

Entre los estándares de atención propuestos por la American Diabetes Association (ADA, 2016b) se consideran variables tales como tabaquismo, inmunizaciones, ingestión de alcohol, micronutrientes, ropa y zapatos, etc. La complejidad no sólo se refiere a la enfermedad misma sino, sobre todo, al abordaje de los enfermos.

### ¿En dónde está el defecto?

Por mucho tiempo hubo la intención de simplificar la profesión a partir del modelo microbiológico: ¿cómo se llama la enfermedad? (diagnóstico nosológico), ¿qué microbio la produce? (diagnóstico etiológico), ¿cómo se combate el microbio? (tratamiento etiológico). Aun en las enfermedades no infecciosas, este modelo tendía a aplicarse, sustituyendo el microbio por alguna otra causa. El propósito era identificar la causa y combatirla; cualquier otro enfoque era sólo paliativo. Así, la hipertensión se debía a la ingesta de sodio, el bocio a la falta de yodo, la gota al exceso

de ingestión de carne y alcohol, los ataques cardiacos a las emociones fuertes, los problemas hepáticos o biliares a los corajes, etc. En la diabetes ha habido sucesivamente varias hipótesis o creencias: el exceso de azúcar en la dieta, los sustos y los corajes, la falta de producción de insulina, la resistencia a la insulina endógena, el daño endotelial, etc. En el terreno metabólico, las alteraciones que se han demostrado son muchas, pero no se ha identificado un nodo básico que sea el que desencadena al resto para poder centrar las acciones en él.

Con el cambio de paradigma se reconoce que las enfermedades (y por supuesto la diabetes) son todas multicausales, que las expresiones fisiopatológicas son diversas, que las manifestaciones clínicas son variadas y la ilusión de reducir la solución de la diabetes a un remedio único pronto se rompió. Hoy los defectos básicos tienen que reconocerse como múltiples e integrarse en redes que ayuden a la comprensión del problema (Barrera-Esparza, 2016).

### ¿Prediabetes: condición de riesgo o etapa temprana de la enfermedad?

El término prediabetes fue satanizado por algún tiempo, pues se decía que se tiene o no diabetes. No hay “principios” de diabetes, ni “diátesis” diabética se decía. Sin embargo, hoy se acepta la prediabetes como una realidad e incluso se pondera el concepto como una oportunidad para intervenciones más oportunas. Las personas con glucemia en ayunas por arriba de lo normal, pero que no alcanza el nivel que se considera dentro del criterio diagnóstico de la enfermedad (“glucosa alterada en ayunas”), es decir, entre 101 y 125 mg/dl, hoy se aceptan como prediabéticas. Igualmente son prediabéticos los intolerantes a la glucosa, los individuos con síndrome metabólico y los que tienen hemoglobina glucosilada entre 5.7 y 6.4 %. Incluso se postula que aún dentro de los valores normales de glucemia en ayunas, tienen más probabilidades de desarrollar la enfermedad los que tienen los niveles más altos.

Guerrero, et al. (2008) han estudiado la historia natural de la diabetes en México y han estimado la probabilidad aritmética de desarrollar la enfermedad en los siguientes 7 años considerando una serie de variables (tabla 1).

<i>Variable</i>	<i>Puntos porcentuales</i>
Mujer	4.9
40 años o más	12.3
Antecedentes familiares de diabetes tipo 2	10.1
Antecedentes familiares de hipertensión	4.8
Antecedentes familiares de obesidad	4.2
Antecedentes de diabetes gestacional o macrosomía	5.7
Sedentarismo	5.5
Presión sistólica 135 o más, diastólica 85 o más	6.9
Obesidad (IMC 30)	13.9
Glucosa en ayunas 100 mg o más	15.3
Triglicéridos 150 mg o más	16.4

**Tabla 1:** Variables para el cálculo de riesgo de diabetes en 7 años (Guerrero, et al., 2008).

El estudio de los sujetos prediabéticos ha mostrado que ya muestran cambios estructurales parecidos a los que ocurren en pacientes con diabetes diagnosticada, de tal manera que seguramente se trata más bien de una etapa temprana de la enfermedad más que una condición sólo de riesgo. Algo parecido ocurre con la diabetes no diagnosticada, que también se acompaña de alteraciones anatómicas que no permiten considerarla una condición benigna.

### Diabetes y salud reproductiva

Es bien sabido que el embarazo representa una oportunidad de diagnosticar diabetes; muchos casos corresponden a diabetes gestacional y otros que mantienen su alteración una vez concluido el embarazo. También se sabe que la diabetes incrementa el riesgo de aborto, mortinatos, macrosomías y anomalías congénitas. Al mejorar las estrategias de diagnóstico y tratamiento de las embarazadas con diabetes se han reducido estas consecuencias fetales, pero seguramente ello ha contribuido a incrementar la epidemia de diabetes. Anteriormente muchos de estos hijos de diabéticas no sobrevivían y hoy, considerando los aspectos genéticos, nacen con la predisposición diabética.

También, en los varones, la disfunción eréctil (común en los diabéticos), actuó por mucho tiempo como factor limitante de la reproducción y el nacimiento de diabéticos potenciales. Hoy el tratamiento de la disfunción eréctil ha mejorado y los diabéticos más fácilmente embarazan a sus parejas.

### Problema de todos

La visión lineal, simplista y reduccionista, centra la atención de la diabetes en el individuo. La responsabilidad del enfermo no puede, desde luego, soslayarse; la disciplina, la adherencia terapéutica, el conocimiento de su enfermedad, la valoración que hacen de su salud presente y futura, son indispensables para alcanzar una supervivencia saludable. Tampoco se puede centrar sólo en el médico, el que, ciertamente, le toca dirigir las acciones, con base en el conocimiento profundo de sus enfermos.

Se dice que la diabetes es un problema de todos porque la familia y las redes sociales son un apoyo muy importante. Los preparadores y vendedores de alimentos, los fabricantes de calzado y de calcetines, los publicistas, las autoridades sanitarias, la industria de la salud, los gimnasios, los hoteles, los investigadores científicos, las escuelas, todos juegan un papel si se quiere moderar la epidemia y ofrecer mejores condiciones de vida a los diabéticos y su entorno.

### EPÍLOGO

La enfermedad humana es un universo de complejidad que todavía no se comprende y acaso hay acercamientos que, en la medida en que dejen de ser reduccionistas y lineales, podrían alcanzar una comprensión que favorece los abordajes

racionales. Hoy por hoy no deja de ser un espacio empírico, que aspira a utilizar los resultados de la ciencia, pero enfrenta la incertidumbre dependiente de la gran cantidad de variables interactuantes (Rai, et al., 2017).

## BIBLIOGRAFÍA

- ADA (American Diabetes Association), 2016a. Standards of Medical Care in Diabetes-2016. Introduction. *Diabetes Care*, 39(S.1), pp.S1-S2.
- ADA (American Diabetes Association), 2016b. Standards of Medical Care in Diabetes-2016. Foundations of Care and Comprehensive Medical Evaluation. *Diabetes Care*, 39(S.1), pp.S23-S35.
- Barnett, K., Mercer, S.W., Norbury, M., Watt, G., Wyke, S. & Guthrie, B., 2012. Epidemiology of multimorbidity and implications for health care, research and medical education: a cross sectional study. *The lancet*, 380, pp.37-43.
- Barrera-Esparza, M. 2016. *Redes complejas en el estudio de la diabetes tipo 2 y otras enfermedades de origen inflamatorio crónico*. Tesis de doctorado, UNAM.
- De Pomposo, A. 2015. El concepto de enfermedad y la recuperación de a científicidad en la medicina. En: Ruelas-Barajas, E. y Mansilla-Corona, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina: las ciencias de la complejidad y la innovación médica*. México: Academia Nacional de Medicina-Conacyt, Editorial Intersistemas. pp.1-88.
- De Vito, E.L., 2016. La medicina “al borde del caos”. Vida, entropía y complejidad. *Medicina (Buenos Aires)*, 76(1), pp.45-54.
- Guerrero Romero, F., Rodríguez-Morán, M., Pérez-Fuentes, R. et al., 2008. Prediabetes and its relation with obesity in mexican adults: the mexican diabetes prevention (Mex-Diab) study. *Metab Syndr Relat Disord*, 6(1), pp.15-23.
- Harris, M., Lawn, S.J., Morello, A., Ratcliffe, J., McEvoy, R.D. & Tieman, J.J., 2017. Practice change in chronic conditions care: an appraisal of theories. *BMC Health Ser Res*, 17(1), p.170.
- Illaraza-Lomelí, H., 2015. La toma de decisiones en el proceso de salud-enfermedad. En: Ruelas-Barajas, E. y Mansilla-Corona, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina: las ciencias de la complejidad y la innovación médica*. México: Academia Nacional de Medicina-Conacyt, Editorial Intersistemas. pp.173-195.
- Rai, A., Pradhan, P., Nagraj, J., Lohitesh, K., Chowdhury, R. & Jalan, S., 2017. Understanding cancer complexome using networks, spectral graph theory and multilayer framework. *Sci Rep*, 7, p.41676.
- Villegas, M., Lifshitz, A. y Cocho, G., 2015. Enfermedades complejas, “un puente” entre paradigmas. En: Ruelas-Barajas, E. y Mansilla-Corona, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina: las ciencias de la complejidad y la innovación médica*. México: Academia Nacional de Medicina-Conacyt, Editorial Intersistemas. pp.141-153.



## TOPOLOGÍA MÉDICA: LA LÓGICA DE LAS FORMAS VITALES

Alexandre S.F. de Pomposo\*

*«Savoir ne permet pas toujours d'empêcher, mais du moins les choses que nous savons, nous les tenons, sinon entre nos mains, du moins dans notre pensée où nous les disposons à notre gré, ce qui nous donne l'illusion d'une sorte de pouvoir sur elles.»*

Marcel Proust (1871-1922) <sup>1</sup>

### INTRODUCCIÓN

¿ES nuestro mundo el mejor de los mundos posibles? ¿Es el único viable? ¿Es como lo percibimos o lo percibimos como es?<sup>2</sup> Viejas preguntas que no hemos sido capaces de responder de manera totalmente satisfactoria, ni con nuestras ciencias ni con nuestras filosofías; sólo las artes se han podido aventurar a proponer respuestas aceptables para el espíritu humano, acercándose a eso que llamamos “una incierta realidad” (D’Espagnat, 1985). En este aspecto cabe hacerse una pregunta más, a saber, ¿por qué la naturaleza siempre elige, entre una infinidad de posibilidades, el camino más eficaz, es decir, el camino más “corto” para responder a las condiciones de los sistemas abiertos?<sup>3</sup> La trayectoria quebrada de un rayo muestra que el camino más corto no es forzosamente la línea recta, como lo pretende la geometría euclidiana, sino aquella que se adapta mejor a las cambiantes condiciones de humedad relativa en el aire, de densidades de cargas eléctricas, de diferencias de potencial y demás, que no por ello deja de ser la forma analógica

---

\* Coordinador de la Investigación en la Secretaría de Enseñanza Clínica e Internado Médico de la Facultad de Medicina de la UNAM; Profesor Emérito de la Multiversidad Mundo Real Edgar Morin en la Ciudad de México.

<sup>1</sup> “No por saber una cosa se la puede impedir; pero si quiera las cosas que averiguamos, las tenemos, si no entre las manos, por lo menos en el pensamiento, y allí están a nuestra disposición, lo cual nos inspira la ilusión de gozar sobre ellas una especie de dominio”, (Proust, 2016, p.310). [Traducción libre del autor de este capítulo].

<sup>2</sup> No es posible extendernos en este punto de enorme importancia filosófica y, más particularmente, epistemológica; en cierta forma se ha venido formulando desde tiempos inmemoriales, pasando por los filósofos presocráticos y por Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716).

<sup>3</sup> En ese sentido una de las respuestas más apasionantes, desde las ciencias físicas, proviene de la mano de algunos genios como Pierre de Fermat (1610?-1665), Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813), Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), Leonhard Euler (1707-1783), Carl Gustav Jakob Jacobi (1804-1851) y Hermann von Helmholtz (1821-1894), por medio del concepto de acción y del teorema extremal que se le asocia. Cf. Feynman, Leighton & Sands (1966), particularmente el t.II, cap.19, “The Principle of Least Action”.

de pensar el comportamiento de los fenómenos en la naturaleza. Esto significa que la geometría, la ciencia de las proporciones, constituye una de las manifestaciones más sorprendentes de ese principio de eficacia, con una brillantez sin igual en el terreno de la biología, de las formas vitales; la *topología* es el estudio de las formas en el *espacio* y en el *tiempo*, así como de sus propiedades generales.

Un buen ejemplo de cómo se puede llegar a querer identificar estos conceptos lo proporciona el intento denodado de Johannes Kepler por ajustar las órbitas de los planetas alrededor del Sol a los cinco poliedros regulares de Platón.<sup>4</sup> Podríamos decir, sin temor a equivocarnos, que las fuerzas de la naturaleza se confabulan para hacer de la estética la norma. . . Que nosotros no siempre comprendamos esa lógica es otro problema. . . La *forma* es la manifestación concreta de la relación que mantienen un sistema y su entorno, es decir, el sello del carácter de “abierto” de los sistemas en la realidad, de tal suerte que el reto de Pascal y el mito de Sísifo nos vienen mejor que la fatalidad del determinismo;<sup>5</sup> esto resulta particularmente claro si deseamos “explicar” un paisaje maravilloso de montañas, lagos, bosques, nubes, animales, seres humanos. No tenemos opción, debemos aceptar la forma de los seres no ya como consecuencia de una costumbre (“un árbol es como es porque así es. . .”), sino como la materialización de una relación dinámica entre dos niveles de organización de la realidad.

#### LAS IDEAS DE LAS FORMAS Y LAS FORMAS DE LAS IDEAS

¿Cómo abordamos el conocimiento y el trato que tenemos con lo real? El ser humano se aproxima a la descripción de lo real por medio de lo imposible, es decir, de la *abstracción*. Desde el punto de vista de la fenomenología, ello constituye la manifestación más flagrante de la estructura misma del cerebro humano y de su pensamiento; en ese sentido, probablemente, nunca hemos contado con tantos elementos para reflexionar este tema como lo es en nuestro tiempo, con el concurso de las neurociencias. Así y todo, junto con Roger Penrose (2007, pp.47–68),<sup>6</sup> aceptamos que el mundo de las abstracciones, el *mundo matemático platónico*, emana del *mundo mental* quien, a su vez, emana del *mundo físico* y, he aquí la gran apuesta del filósofo ateniense, que emana del mundo matemático platónico porque, de otro modo, no se podría explicar cómo surgen las ideas de número, simetría, forma, etc., en nuestros cerebros (de ahí la colindancia con la apuesta de Pascal). Sin embargo, y el mismo Penrose lo reconoce así, dichas emanaciones no son totales y existen enormes zonas de los tres mundos que no se pueden simplemente explicar como provenientes del mundo previo; además, las emanaciones pueden ir más allá de las esferas que se siguen una a otra, todo lo cual hace de esta explicación de emanaciones en cadena una muy compleja realidad.

<sup>4</sup> Nos referimos al tetraedro, al hexaedro o cubo, al octaedro, al dodecaedro y al icosaedro, mencionados en el diálogo platónico *Timeo* como principios fundadores de los elementos del cosmos (tierra, aire, fuego y agua). Cf. Platón (2008), Vitrac (2006) y Ross (1992).

<sup>5</sup> Estamos echando mano de la etimología del término *fatal*, de *fatum* o destino.

<sup>6</sup> Para un análisis más detallado acerca del alcance del mundo matemático platónico en otras áreas de las matemáticas, cf. Déglise (1997, pp.1–19) y Ferreirós (1999).

Números, variables, funciones, métricas y representaciones, constituyen los ladrillos con los que el pensamiento puede decirse ligado a la simetría, a las formas, a lo análogo y a lo proporcional. Son, todos ellos, símbolos que “lanzan” el pensamiento abstracto hasta la imagen que integra la imaginación, con su sabor de inmediatez. No es posible una reflexión seria acerca de las formas en la biología y, más concretamente, en la medicina, sin empaparse en los orígenes epistemológicos del proceder en una manera muy peculiar de ver al mundo, con nosotros adentro de él.

Vamos conociendo cada vez con más lujo de detalles las miríadas de matices que conforman las estructuras vivas y, al mismo tiempo, los granulados de nuestros sentidos que desmenuzan y reintegran la realidad aparente y sensorial, que deconstruyen y reconstruyen, tanto como se pueda, las complejas relaciones entre esas estructuras y el entorno con sus condiciones que les suponemos vigentes. No obstante, sigue existiendo siempre un hiato insalvable entre las realidades espacio-temporales en sí y nuestras ideas acerca de ellas y, aunque no sepamos hasta dónde, sí sabemos que guardan alguna relación de proporcionalidad, es decir, de analogía, de metáfora; nuestras palabras son el *súmmum* de esa abstracción que es la *forma*, abuso y mentira a la vez, la articulación entre el espacio y el tiempo que quiere insertarse en la realidad cósmica del mundo, como un dardo, pero que nunca logra agotar. . . Las matemáticas y la geometría son lenguajes en sí mismos, emparentados con la poética, que buscan decir el mundo por medio de símbolos y formas, descubriendo las reglas de sus relaciones; algunos pensadores han colocado a la geometría por encima de las matemáticas (Descartes y Einstein, entre otros) porque consideran que las proporciones preceden a los números.

#### LAS ESCALAS DE LA REALIDAD

Sin duda, el exceso en el que incurrimos de manera consuetudinaria es la idea de que existe una sola realidad, en la que todos quedamos subsumidos; sin embargo, la multiplicidad de nuestros discursos acerca de ella traiciona algo más que nuestra incapacidad para abrazarla toda. Probablemente se trate ahí de las condiciones inmensamente restrictivas de una geometría que no da ocasión de ver más que pequeñas porciones del mundo, cada una con sus propias realidades, como en un caleidoscopio. Esto es a lo que llamamos los *niveles de la realidad*, que tiene que ver con las escalas en el espacio, tamaños, distancias, curvaturas, continuidades, discontinuidades, etc., pero también con esteros en el tiempo que dictan la visión de los cambios que observamos. El tamaño, ¿fija la lógica de la forma? No deja de ser curioso que en los niveles megascópicos la figura que domina el horizonte es la esfera y, a nivel ultramicroscópico, a falta de constataciones visuales, también. La plétora de formas se da en los niveles macroscópico, mesoscópico y microscópico, el reino de los seres vivos. La percepción nos engaña en las formas porque nos las muestra como en el cinematógrafo, alineadas, concatenadas, arrosariadas. . . No. La realidad de las formas es anidada, no lineal, es decir, compleja: unos niveles quedan envueltos por otros, como pulgas que tienen sus propias pulgas, que tie-

nen sus propias pulgas, y así hasta la longitud de Planck o hasta el horizonte del universo, hasta perder el aliento.

Uno de los lados más sorprendentes en las ciencias de los últimos doscientos años ha sido el que nos mostró que la ciencia de las proporciones, la geometría, es mucho más compleja de lo que nunca antes se había sospechado; de entre todas sus posibles facetas, la topología, la ciencia de las formas, ha exhibido los despliegues más espectaculares, al grado de que ya no es posible separar la pregunta, típicamente científica, de cómo funciona el mundo con sus mecanismos íntimos, por un lado, y esa otra pregunta, típicamente topológica y artística, de cómo se llevan a cabo las deformaciones espaciales (y temporales) por medio de transformaciones continuas. Hemos, finalmente, caído en la cuenta de que lo de-forme, lo trans-formado, lo a-morfo, puede quedar trastocado, pero nunca deja de tener *forma*, exactamente como la noción de “salud” no entra en la noción de “vida”: lo sano y lo enfermo están igualmente vivos, ni más ni menos. Probablemente es a ese nivel en donde surgen las confusiones acerca de lo que está o no vivo; plásmidos, fagos, priones, son entidades biológicas o “simplemente” agregados materiales... No hay duda, son seres vivos, con-formados a la extraña realidad de las entidades moleculares que, más que agregados de átomos, son colecciones inmensas de correlaciones entre átomos.

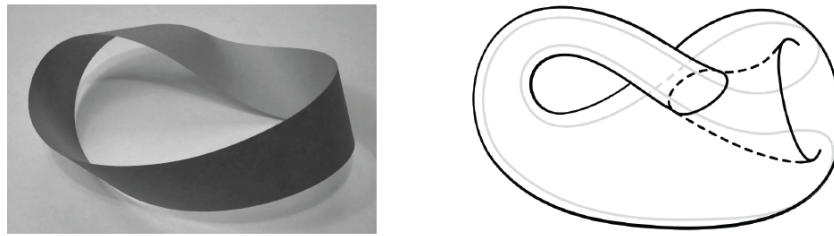
#### TOPOLOGÍA MOLECULAR

Desde la mecánica del DNA hasta la enzimología, la topología es la llave más cierta que podemos conocer para adentrarnos en la lógica de las biomoléculas y de su innegable papel en numerosas patologías: nudos, grados de enrollado, concatenaciones, etc., constituyen niveles de organización en los que “función” y “estructura” se confunden. De hecho, desde el punto de vista de la topología, la doble hélice del DNA obedece a la lógica de la banda de Möbius, que intenta poseer una sola cara, siendo una superficie en un espacio de tres dimensiones. Sus propiedades se ponen de manifiesto en la conformación de la botella de Klein (figura 1).

Las propiedades topológicas de la banda de Möbius en el DNA muestran su valor bioquímico en la llamada aromaticidad de Möbius.<sup>7</sup> En ese sentido, es al nivel molecular en donde más sorprendentemente se ha presentado el fenómeno de la *evolución*, como el juego bimodal del *cambio* y de la *resistencia al cambio*, juego definitivamente complejo que es la consecuencia de las leyes de la termodinámica y de la mecánica estadística,<sup>8</sup> aún en la actualidad no hemos terminado de extraer las pesadas consecuencias de la mayoría de estos procesos ya que las escalas tanto de distancia como de tiempo nos dificultan la integración de la información encontrada, y esto, a veces, a costa de enormes esfuerzos extendidos a lo largo de muchos lustros y de la mano de miles de investigadores en el mundo entero.

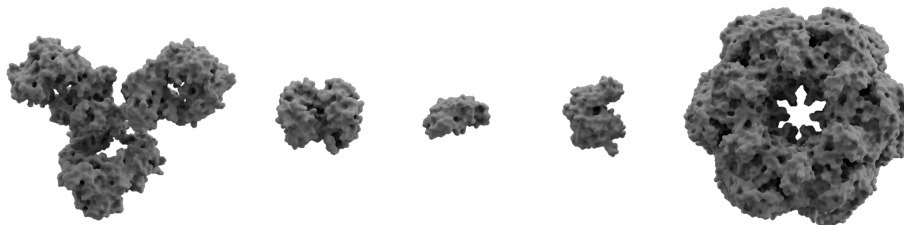
<sup>7</sup> La aromaticidad de Möbius se refiere a una entidad molecular de la química orgánica (anulenos). Cf. Monastyrsky (2007, pp.3–22).

<sup>8</sup> Existe un gran número de obras magníficas que explican los aspectos concernientes al papel que ha jugado la termodinámica de los procesos irreversibles, desde el teorema H de Boltzmann hasta la organización de los ecosistemas. Aquí recomendamos dos que nos parecen emblemáticas: Ehrenfest & Ehrenfest (1990) y Schneider y Sagan (2008).



**Figura 1:** La **banda de Möbius** (izq.) es una superficie en tres dimensiones que posee una sola cara y la **botella de Klein** (der.) es un recipiente cuya boca y fondo coinciden; ambas estructuras topológicas comparten una serie de propiedades en común, a saber, que cuando se corta longitudinalmente a la botella de Klein se recupera una banda de Möbius. El DNA comparte propiedades topológicas con la banda de Möbius: teleológicamente hablando, la doble hélice tiene como finalidad presentar una sola cara de lectura para los pares de nucleótidos G-C, A-T. Imágenes procedentes de Wikimedia.

En la vida de todos los días, la evolución, la selección y la información están encapsuladas en la estructura de las biomoléculas, que actúan en el momento adecuado como fuentes primarias de causalidad, “saltándose” las largas series de eventos físico-químicos que llevaron a su formación (figura 2).

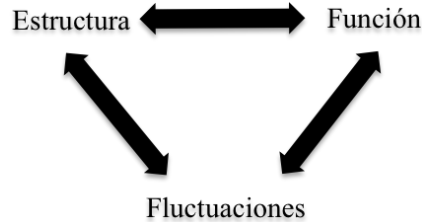


**Figura 2:** Algunas proteínas representadas según su representación de superficie accesible. De izquierda a derecha: inmunoglobulina G (IgG), hemoglobina (Hb), insulina, adenilato quinasa (AK), glutamina sintetasa (GS). La forma y las dimensiones de la biomolécula guardan relación con los elementos atómicos que las conforman, con las relaciones electromagnéticas que rigen entre ellos, con los medios acuosos que los circundan y con las funciones que cumplen, entre otras condiciones. Fuente: [Wikipedia: Protein](#).

Desde unos cuantos átomos, como en el caso de la molécula del agua (H<sub>2</sub>O) hasta un enzima enorme como el complejo respiratorio I (Yip, 2011; Sharma, et al., 2009) que potencia la síntesis de ATP (trifosfato de adenosina) en la membrana mitocondrial de los mamíferos, utilizando el potencial reducido del NADH (nicotinamida adenina dinucleótido reducida), dirigiendo protones a través de la cara interna de dicha membrana, con peso molecular por encima 1 MDa.<sup>9</sup> Sin embar-

<sup>9</sup> El dalton, en honor al físico inglés John Dalton (1766-1844), es la unidad de masa atómica unificada, definida como 1/12 de la masa del núcleo del átomo de carbono no ligado ( $\sim 1.66 \times 10^{-27}$  kg).

go, la complejidad molecular en las formas se extiende a un sinnúmero de elementos biológicos, como los virus, en los que pareciera presentarse explícitamente el componente de la “intencionalidad” funcional; no obstante, lo más probable es que se trate de complejos sistemas de acoplamiento que compiten unos con otros, produciendo crecimientos y decaimientos poblacionales. En sí, las biomoléculas, a través de sus formas, ponen en evidencia la interacción que se da entre tres polos conceptuales, a saber, la *estructura*, la *función* y las *fluctuaciones*:

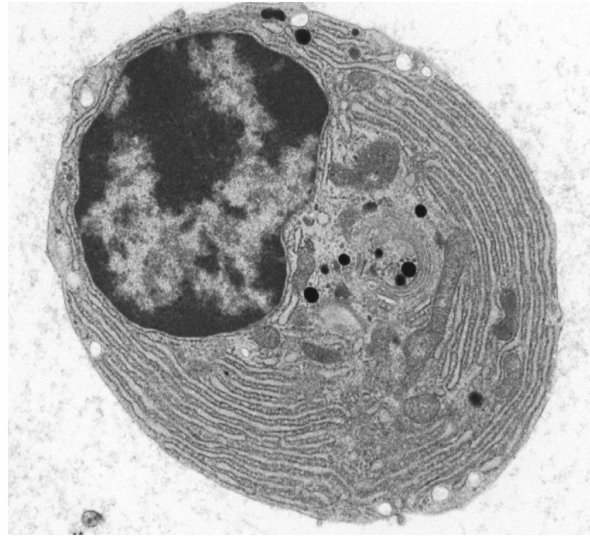


Las fluctuaciones juegan un papel central en el *control* de los sistemas, para que mantengan un orden y, sobre todo, una coherencia funcional que logre mantener los gradientes necesarios para la conformación de las estructuras, tanto en el espacio como en el tiempo; por ello nos detendremos en este punto más adelante.

#### LA ARQUITECTURA FUTURISTA DE LAS CÉLULAS

El estudio de las formas permea muchos niveles de análisis de la realidad, colocándose en el cruce de un gran número de disciplinas, siendo la arquitectura una de ellas. Las células se pueden considerar como el siguiente nivel, desde las moléculas, en donde se da el despliegue de la *organización*, es decir, de la conformación en “órganos” (organelos) que cubren necesidades de estabilidad en el todo de la célula. La armonía estructural y funcional de una célula sana suele despertar en nosotros un sentimiento de admiración y de asombro: “El organismo humano, obra maestra de la creación, ofreciéndonos en cada célula una incógnita y en cada latido un tema de profunda meditación”, reflexionaba don Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) (Ramón y Cajal, 1961, p.525). No obstante, más allá de la admiración que las células despiertan en nosotros, de manera comprensible, al observarlas y estudiarlas, persiste la pregunta acerca de la enorme variedad de formas que manifiestan en sus muy diversas estirpes, incluso cuando permanecemos sólo en el nivel de las células animales... A pesar de que las moléculas ya presentan zonas de funcionalidad específica, es en la célula en donde se da plenamente el fenómeno de la organización (organización) y, así, diversas secuenciaciones de los procesos biológicos (figura 3).

La multiplicidad de funciones que cumplen los diversos organelos en el citoplasma celular poseen morfologías que son la traducción directa de sus relaciones con su entorno, tanto si se trata de funciones destinadas a mantener la homeostasis de la propia célula, como si se trata del intercambio dinámico de materia y/o

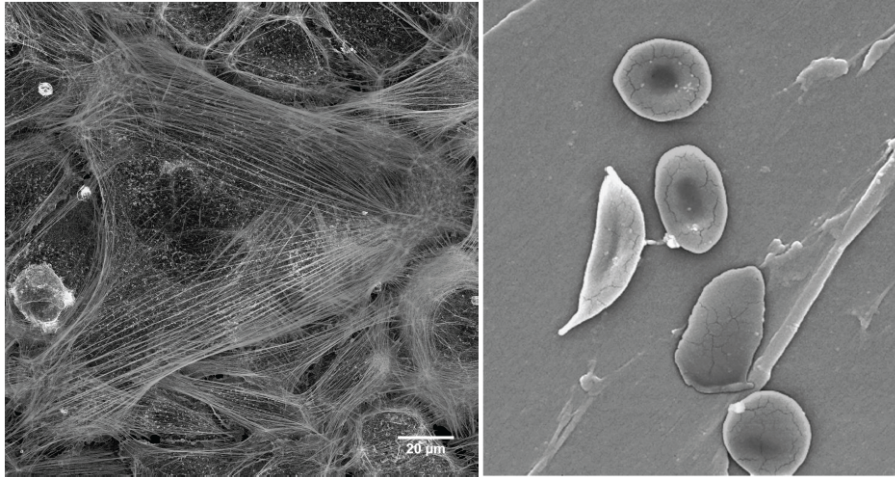


**Figura 3:** Micrografía electrónica de transmisión de una célula plasmática, es decir, de un linfocito B maduro que produce y secreta anticuerpos durante una respuesta inmunológica. Imagen procedente del sitio: <http://moncoursimmuno.blogspot.com/2014/03/>

energía con el entorno. Sin embargo, se debe notar que a pesar de que hay numerosos componentes de la célula que reflejan el papel que esa estirpe celular concreta juega en el contexto general de la economía, la mayoría de las células animales, eucariotas todas, comparten muchas características estructurales entre ellas. Así, por ejemplo, las mitocondrias que contiene el citoplasma de una célula epitelial no se encuentran en igual proporción que en una célula nerviosa multipolar que debe proporcionar la energía para la producción de neurotransmisores, amén de garantizar el sustrato calórico suficiente para todas las otras funciones celulares.

Otra de las muestras más notables que las células hacen de su arquitectura se muestra a través del andamiaje de su citoesqueleto, que imprime formas verdaderamente descabelladas para nuestras escalas macroscópicas, nunca carentes de osadía y de estilización. En ocasiones, errores en la información molecular de esas estructuras conducen a enfermedades graves, como en la anemia de células falciformes, en la que los eritrocitos (glóbulos rojos) pierden su forma adiscada, entorpeciendo su flujo por los vasos capilares más estrechos, con terribles consecuencias para el funcionamiento del organismo en su totalidad. La información que proporciona la forma de las células es de enorme importancia en la descripción histopatológica que conduce a la elaboración de diagnósticos diferenciales con alto grado de precisión. La figura 4 muestra una célula epitelial en la que, por técnicas de inmunofluorescencia, se hacen visibles los filamentos de actina, por un lado, y por otra parte se muestra una micrografía electrónica de barrido con un eritrocito deforme (en forma de hoz, un drepanocito), como consecuencia del padecimiento

genético ya mencionado: la anemia de células falciformes; esta enfermedad se deriva de que el alelo S del cromosoma 11 presenta una mutación que se traduce en el reemplazo de un *ácido glutámico* por una *valina*, en la sexta posición de la proteína beta de la globina en la Hb.



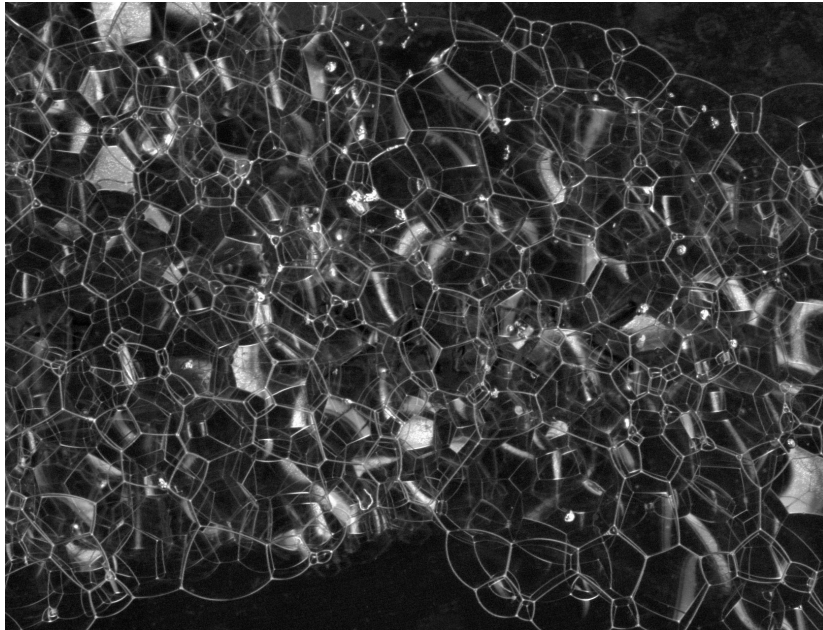
**Figura 4:** A la izquierda se muestra el **citoesqueleto de una célula epitelial** que, empleando técnicas de inmunofluorescencia, exhibe sus filamentos de actina. A la derecha se muestra una micrografía electrónica de barrido con un **eritrocito falciforme o drepanocito** (izquierda de la imagen), junto con eritrocitos de morfología normal. A pesar de que existen proteínas estructurales como la espectrina, presente en los eritrocitos y en las neuronas, el precipitado polimérico de HbS en los drepanocitos, en condiciones de baja presión parcial de O<sub>2</sub>, deforma la célula al grado de que pierde en gran parte sus propiedades elásticas, obliterando los capilares de menor calibre. Imágenes procedentes de Wikimedia.

Las consecuencias de una transformación de este tipo son enormes para la salud de todo el organismo: un ejemplo contundente del papel que la *forma*, es decir, la topología puede jugar en la homeostasis. No obstante, este es un buen lugar para recordar nuestra tesis central, a saber, que la forma, como tal, *es* la relación entre lo que sucede al interior de un sistema con su entorno; si se prefiere, más filosóficamente hablando, la forma es la frontera entre la immanencia y la trascendencia de un sistema. Bajo esta luz, las alteraciones morfológicas celulares y tisulares traducen un cambio en la relación, celular o tisular, según el caso, con su entorno, probablemente derivado de las alteraciones en las condiciones espacio-temporales. El proceso de *adaptación* se da en lo fundamental a nivel de la forma y, de esa manera, la topología se convierte en un elemento de gran valor para describir las situaciones que se apartan de lo acostumbrado.



## LAS TEXTURAS DE LOS TEJIDOS

En la optimización de las estructuras espaciotemporales, las pompas de jabón destacan por su belleza y eficacia y constituyen un excelente ejemplo del balance entre las fuerzas moleculares de la tensión superficial de una película líquida y la estabilidad de la superficie. La clásica imagen de una esfera cuasi perfecta se nos presenta en la mente, aunque, desde luego, sean posibles muchas otras estructuras de superficie (figura 5), dependiendo de las condiciones de frontera del sistema. . . (Boys, 1959).<sup>10</sup>

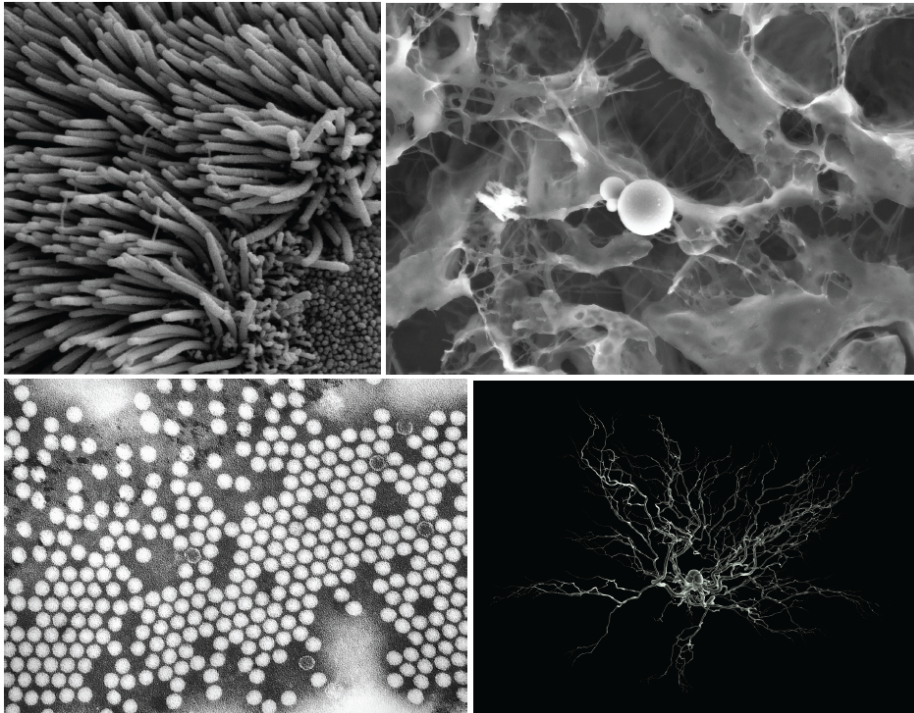


**Figura 5:** Burbujas de jabón que se acomodan, encimándose unas a otras, siguiendo reglas de optimización de superficie en un mínimo volumen; según las leyes de Plateau el ángulo aproximado que forma cada par de aristas en las intersecciones es de  $109.47^\circ$ . Imagen e información obtenida del sitio [https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes\\_de\\_Plateau](https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Plateau)

Ahora bien, partiendo de esta imagen física, es posible explicar la disposición de los alveolos pulmonares, organizados en hatos, a la manera de acinos (estructuras lobulilladas) que maximizan la superficie de contacto (hematosis), minimizando el volumen ocupado. De hecho, esa parece ser la lógica general de las estructuras vivas, entremezclada con esa otra lógica general de las funciones; textura, tejido, texto, textil, tacto, techo, tegumento, son todas palabras relacionadas con la

<sup>10</sup> Existe la versión en español, referida como Boys (1964). En esta obra se revisan las llamadas leyes de Plateau que rigen la dinámica adaptativa de las pompas de jabón a las condiciones de frontera y a las intersecciones entre ellas.

misma raíz etimológica, *tego*, *tejer*. Así, una textura, es decir, un tejido, es el entrelazado de filamentos que conforman una complejidad, un trenzado de elementos que producen los relieves de las estructuras vivas. Se podría presentar un gran número de imágenes de microscopía electrónica de barrido con el fin de ilustrar la gran variedad de texturas que presenta el cuerpo humano a nivel tisular, así como las de otros seres vivos asociados con el mismo, como son los virus, las bacterias, los hongos, los parásitos de todo tipo, etc. Sin embargo, lo mostrado en la figura 5 da una idea aceptablemente buena de esa variedad.



**Figura 6:** Arriba a la izquierda: **cilios del epitelio bronquiolar**. Arriba a la derecha: **calcificación en tejido cardiaco**. Abajo a la izquierda: **virus de la poliomielitis**. Abajo a la derecha: **neurona estrellada en corteza cerebral**. Sólo la imagen del poliovirus es micrografía electrónica de transmisión, las otras tres son micrografías electrónicas de barrido. Imágenes procedentes de Wikimedia.

Las formas, aunque de diversidad indefinidamente grande, siempre presentan propiedades espaciales características; topologías de superficie, todas, que sostienen el *desequilibrio estable* que es la homeostasis. Desde luego que este concepto contradictorio, en apariencia, en donde se encuentran frontalmente el desequilibrio y la estabilidad, es la consecuencia de las condiciones no ya de un equilibrio, es decir, de entropía máxima, sino de una transferencia (producción) mínima de entropía entre el interior y el exterior del sistema, es decir, el teorema de Prigogine

(Prigogine & Nicolis, 1977, pp.42-45). Todo esto es lo que encierra la idea de *textura* y, es lo más seguro, sería conveniente en la actualidad recuperar ese concepto para la elaboración de diagnósticos de precisión en medicina.

## LA ORGANIZACIÓN DE LAS FUNCIONES

El concepto de *organización* deriva del pensamiento cartesiano:

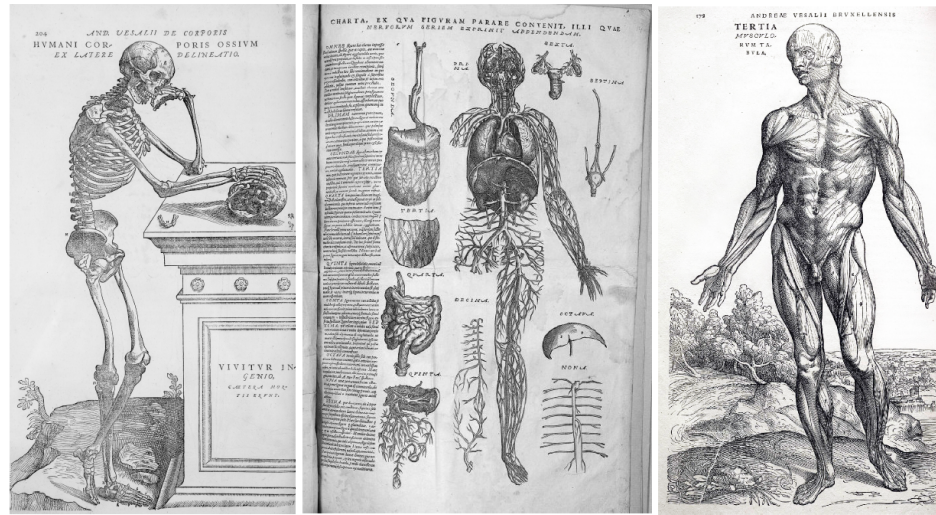
*Je suppose que le corps n'est autre chose qu'une statue ou machine de terre, [...] en sorte que, non seulement il lui donne au dehors la couleur et la figure de tous nos membres, mais aussi qu'il met au dedans toutes les pièces qui sont requises pour faire qu'elle marche, qu'elle mange, qu'elle respire, et enfin qu'elle imite toutes celles de nos fonctions qui peuvent être imaginées procéder de la matière, et ne dépendre que de la disposition des organes.* Descartes (1983, p.807)<sup>11</sup>

En este admirable texto, René Descartes (1596-1650) muestra su idea del cuerpo humano, del *organismo*, como consecuencia de la presencia de órganos, de organización, como una máquina.<sup>12</sup> Ciertamente, el cuerpo humano puede ser comprendido, hasta cierto punto, como una maquinaria hipercompleja que tiene como único fin el mantenimiento de las diferencias, los gradientes de concentraciones de materia y energía con respecto al entorno, por medio de mecanismos extremadamente elaborados. Así, en paráfrasis del pensamiento de Claude Bernard (1813-1878), la división de un organismo viviente y el aislamiento de sus diferentes componentes estructurales, sólo debe obedecer a un procedimiento didáctico, no a la comprensión profunda del organismo como un todo, porque si se desea adjudicar alguna propiedad fisiológica a ese organismo, se le debe relacionar con el todo y sacar conclusiones definitivas sólo en relación con sus efectos sobre el todo... (Bernard, 1994, p.62).

Por otra parte, es posible tener una visión integral del cuerpo humano por medio de su anatomía de superficie, en donde la topología muestra sus credenciales más evidentes, sin por ello ser menos extraordinarias, pues nada es tan extraordinario como lo ordinario... La medicina, a lo largo de su rica historia, ha recurrido

<sup>11</sup> "Supongo que el cuerpo no es más que una estatua o máquina de tierra, [...] de tal suerte que no sólo tiene el color y la figura de todos nuestros miembros, sino que contiene todas las partes que se requieren para hacer que camine, coma, respire y, finalmente, que imite todas aquellas de nuestras funciones que se pueden imaginar como procedentes de la materia y no depende más que de la disposición de los órganos." Traducción del autor. Una versión facsímil está disponible en varios formatos descargables gratuitamente en: <https://archive.org/stream/lhommeetlaformat00desc#page/n69/mode/2up>

<sup>12</sup> Se deben anotar dos observaciones importantes a este respecto. Primero, el origen del término órgano que deriva del griego *ὄργανον* que significa "instrumento" (musical o de cualquier tipo); probablemente Descartes se inspiró en el *Novum Organum* de Lucrecio (de Pomposo, 2015, p.144). Segundo, la máquina a la que se refería Descartes, al momento de discurrir sobre el cuerpo humano, era de naturaleza hidráulica; en ella incluía en esencia los vórtices que eran los responsables de la organización, probablemente inspirado por el aspecto de las fibras musculares cardíacas cuando se observa al corazón desde el ápex, por la configuración de los grandes vasos en la parte superior del mismo órgano, por la forma en que se introducen los intestinos en la cavidad abdominal durante el periodo embrionario, etc., con aspecto de vórtices.



**Figura 7:** Tres ilustraciones extraídas de la obra maestra de Andrés Vesalio (1514-1564), *De humani corporis fabrica* (*Sobre el funcionamiento del cuerpo humano*). Este genio belga nunca perdió de vista que las distinciones anatómicas en sus diversas componentes sólo permitían distinguir para unir. Imágenes procedentes de Wikimedia: [esqueleto que medita](#), [aparato circulatorio](#) y [músculos de la cara anterior del cuerpo](#).

no pocas veces a la información proporcionada por las formas exteriores, tanto en el espacio como en el tiempo. Ni duda cabe que la analogía ha jugado las más de las veces el papel del recurso principal del conocimiento experimental para nombrar signos e incluso síndromes: la realidad está en el devenir y, por ello, en la irreversibilidad y en la acción operante del tiempo. Si así lo queremos, la realidad debe estar anclada en las asimetrías de la naturaleza (de Pomposo, 2016; 2017); lo más interesante es que, a pesar de la neta tendencia a las situaciones simétricas, la realidad biológica nunca alcanza totalmente ese ideal. Parece que lo importante no es la simetría en sí, sino la *tendencia* que hacia ella se muestra en todos los niveles de la realidad, incluso las formas patológicas muestran esa tendencia;<sup>13</sup> inevitablemente ello nos debería mover a un estado de admiración y asombro permanentes, frente al espectáculo inaudito de las formas vitales todas.

La figura 7 muestra cuatro ejemplos, como podrían haber sido muchos otros, de lo que queremos decir con la variedad en las formas a nivel del organismo entero; podría hacerse un enorme atlas con imágenes ilustrando dicha variedad. ¿Qué tienen en común todas esas superficies? Cada una de ellas es la relación que mantienen el interior del sistema, en este caso el cuerpo humano, con su entorno,

<sup>13</sup> La dermatología proporciona muchos ejemplos de tendencias a la simetría en las lesiones o cambios en la piel, como es el caso en algunas dermatosis pigmentarias (vitiligo). Acerca de la idea de "tendencia" como transformación, baste recordar que ese es el sentido del término *entropía*, inventado por Rudolf Clausius (1822-1888).



**Figura 8:** Cuatro ejemplos de topología de superficie en el cuerpo humano. Imágenes procedentes de Wikimedia: [ojo humano](#), [músculo](#), [embarazada](#) y [mano](#).

con sus condiciones iniciales y de frontera, con su carácter de sistema abierto que intercambia información, hacia el interior y hacia el exterior, para mantener durante un tiempo ese estado estacionario lejos del equilibrio termodinámico. Esa es la biocomplejidad en las formas.<sup>14</sup> Probablemente una de las mayores ventajas de un punto de vista como este, particularmente apreciable en la práctica clínica de la me-

<sup>14</sup> En el hermoso capítulo “Tejiendo redes: desde las células hasta los ecosistemas”, de las autoras Hernández-Hernández y González-González (2016), realizan lo que aquí proponemos, desde el punto de vista de la teoría de redes.

dicina, es que permite incluir a las alteraciones morfológicas, como consecuencia de procesos patológicos, en el estudio topológico de las alteraciones termodinámicas del sistema con su medio circundante; así como la *salud* no forma parte del concepto de *viviente*, de igual manera un sistema no por encontrarse alterado en su morfología deja de tener una forma, alterada, ciertamente, pero siempre respondiendo a las condiciones que fija por el momento el comportamiento del sistema. Dicho comportamiento, además, no siempre exhibirá las mismas respuestas ante los mismos cambios, he ahí el carácter profundamente complejo de lo biológico, pero sí asumiendo la topología más *ad hoc* del momento espaciotemporal, como en el caso del rayo que no sigue la línea recta (de Pomposo, 2015a; 2015b). Como ya lo hemos mencionado más arriba, existe un tercer elemento, además de la *estructura* y de la *función*, que juega un papel esencial en la auto-organización de los sistemas abiertos, en general, y de los sistemas biológicos, en particular: nos referimos a las *fluctuaciones*. El término “fluctuación” evoca la idea de cambio, de salto, de una situación a otra... La mecánica estadística ha logrado, entre tantos resultados brillantes, demostrar que las fluctuaciones en la temperatura, en la densidad, en la presión y en la entropía, variables todas ellas canónicas en la termodinámica, son estadísticamente independientes entre sí (por eso son canónicas), cosa que no sucede con otras cantidades físicas; además, ese mismo concepto conlleva la idea de aleatoriedad, es decir, de lo no del todo predecible determinísticamente hablando. No obstante, ello no equivale a la ausencia de reglas que deben cumplir dichas fluctuaciones (Reichl, 1998, p.353).<sup>15</sup> Asimismo, las fluctuaciones guardan relación con conceptos de enorme importancia en la teoría de las rupturas de simetría y de las transiciones de fase, como *ruido*, *estocasticidad* y *caos*.<sup>16</sup> Sin embargo, para nosotros, en esta muy somera revisión sobre la topología médica, bástenos saber que existe una relación directa entre las fluctuaciones de una cantidad microscópica, como la energía de las partículas constituyentes del sistema, y cantidades macroscópicamente medibles con facilidad, como la temperatura y la capacidad calorífica del mismo sistema (Balescu, 1975, p.133). Las fluctuaciones son un fenómeno universal que se suscitan en cualquier parte finita de un sistema, sin importar cuán grande sea éste: se trata del papel de la variabilidad individual en un proceso global cambiante. En el momento de acercarse a un estado inestable, las fluctuaciones se vuelven comparables en magnitud con las cantidades promedio que gobiernan el comportamiento global (i.e. medible) del sistema y, en consecuencia, una descripción limitada a las variables macroscópicas observables se fractura: en ese momento la evolución del sistema en el tiempo se vuelve fundamentalmente probabilista, con una geometría que le es propia, a saber, la geometría fractal de los atractores extraños (Nicolis & Nicolis, 2012, pp.83 et seq.).

<sup>15</sup> Es interesante notar que la conferencia que Ilya Prigogine (1977) impartió como agradecimiento por el Premio Nobel en Química de 1977 lleva como título *Time, Structure and Fluctuations*.

<sup>16</sup> Una buena revisión, entre muchos otros temas, se encuentra en Nicolis (1995).

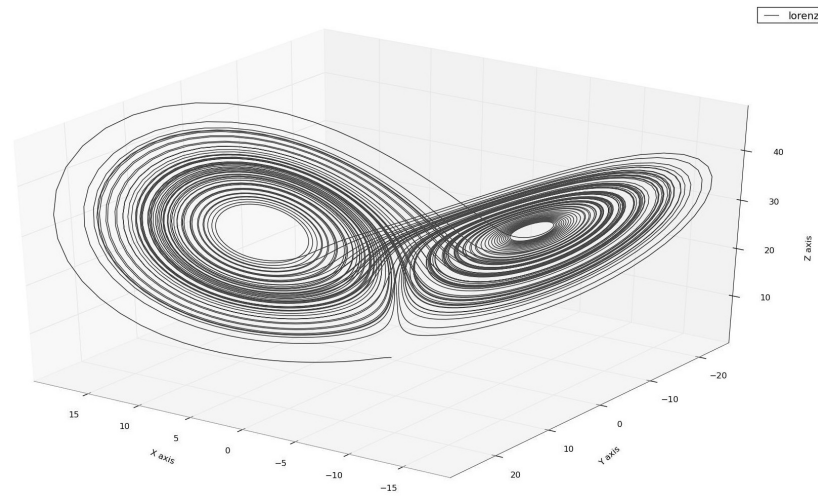
## LA GEOMETRÍA DEL CAOS

Con base de lo comentado en el apartado anterior, la *información* se convierte en un fenómeno emergente, es decir, surgido no como una simple consecuencia causal de los estados previos, sino como una nueva manera de organización del sistema, para mejor responder a las nuevas condiciones de frontera: las fluctuaciones fungen como los transportadores naturales de esa información. Durante mucho tiempo se asoció el concepto de *caos* con el de enfermedad, en el ámbito de lo biológico; sin embargo, el caos puede y, de hecho, juega un papel central en muchos de los mecanismos de control de los procesos bioquímicos, celulares, tisulares y orgánicos: los fenómenos periódicos (oscilaciones) y alostéricos se combinan en fascinantes procedimientos de control. Las formas vitales son las concreciones adaptativas a dichos mecanismos.

Por esta razón se vuelve necesario echar mano no sólo de la topología en el sentido espacial, sino que también de las “formas” en el tiempo, es decir, de las maneras en las que se secuencian los eventos en el comportamiento de los sistemas abiertos. Así y todo, el comportamiento espacial de los sistemas biológicos, la topología en el sentido más usual del término, no es más que la consecuencia de los despliegues en el tiempo de las organizaciones fenoménicas de dichos sistemas; por ello es que la segunda ley de la termodinámica y el carácter monótonamente creciente de la entropía (teorema H de Boltzmann) son el hilo conductor de esa evolución temporal. Es larga la historia del estudio del caos en los sistemas dinámicos<sup>17</sup> y existen excelentes obras de divulgación al respecto (Prigogine, 1997; Stewart, 2001). Digamos, en pocas palabras, que el comportamiento aparentemente impredecible de los sistemas caóticos es lo más sorprendente; esto es así incluso en sistemas con descripciones tan relativamente simples como es el sistema de ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de las corrientes de convección en el aire de la atmósfera terrestre, el sistema de Lorenz. Lo más interesante es que el sistema de Lorenz, siendo determinista, conduce a un comportamiento errático con más de una solución posible en cada momento. La figura 8 muestra su atractor extraño.

La viabilidad compleja de las dinámicas saludables, es decir, ligadas a los que solemos llamar estados de buena salud, en una gran variedad de sistemas fisiológicos, tiene aspectos similares a los del caos determinístico. Sin embargo, por otra parte, una gran cantidad de procesos patológicos (incluyendo la toxicidad de algunos fármacos y el envejecimiento) pueden disminuir, aunque no eliminar del todo, el caos o la complejidad en los sistemas fisiológicos. Sólo con el fin de proporcionar algunos ejemplos de cómo el caos juega un papel en los procesos fisiológicos, patológicos o no, mencionemos el *nistagmos* asociado al vértigo o a la situación de adaptación a ciertos movimientos forzados de la cabeza, el temblor en las manos asociado a la enfermedad de Parkinson, la asistolia característica del bloqueo

<sup>17</sup> Por citar sólo una obra que revisa conceptualmente lo sucedido en los sistemas climatológicos, partiendo de las ideas básicas de los sistemas complejos y del caos como tal, véase Nicolis & Nicolis, (2012, pp.217–235).



**Figura 9:** Evolución de las coordenadas espaciales cartesianas en tres dimensiones, siguiendo el sistema de ecuaciones diferenciales de Lorenz para la atmósfera terrestre, exhibiendo su atractor extraño; se emplearon los programas Python y SciPy. Amén de su papel histórico en la teoría del caos, el atractor de Lorenz es un buen ejemplo de cómo la sola no linealidad de las correlaciones funcionales de las coordenadas, aplicadas iteradamente, conduce a comportamientos erráticos, no del todo predecibles. Imagen proveniente del sitio <https://titanlab.org/2010/04/08/lorenz-attractor/>

aurículo-ventricular (A-V) de segundo grado tipo I (Mobitz I o Wenckebach) que se ilustra en la figura 9, las crisis de ausencia o crisis generalizadas de epilepsia (grand mal) en edades pediátricas, etc.



**Figura 10:** Representación prolongada de la segunda derivación del electrocardiograma, presentando un bloqueo A-V de segundo grado Mobitz I (Wenckebach). Nótese cómo la onda P (recorriendo la tira de izquierda a derecha) se va alejando paulatinamente del complejo QRS, en los tres primeros trazos, hasta que el cuarto no se genera (asístole), reanudándose el ciclo arrítmico. Se trata de un defecto en el nodo A-V del corazón. Imagen proveniente de <https://www.youtube.com/watch?v=oM0SUHnEih4>



Cada uno de estos ejemplos podría desarrollarse *in extenso*, sin embargo no es este el lugar para ello. En cambio, lo que sí nos interesa es notar que el gran punto que todos ellos tienen en común es el de contener al caos como una forma de control, o de falta de él, haciendo que la periodicidad en el tiempo no siempre sea un aspecto topológico conveniente en el buen funcionamiento del sistema. Lo mismo sucede con un símil mecánico como el de mantener una escoba en posición vertical, sobre la palma de la mano, evitando su caída, por medio de movimientos aleatorios compensatorios.<sup>18</sup> El mecanismo que subyace a todos estos fenómenos es el de la *resonancia* y aún es un área muy activa de la investigación el dilucidar las formas en que se seleccionan los patrones topológicos al momento de llevar a cabo la transición de fase modulada por el caos; la teoría de las formas juega un papel central en todo ello (Reichl, 2004, pp.13–57).<sup>19</sup> No obstante, ya sea que el propósito sea reducir el caos “malo” o inducir el “bueno”, el control sobre el caos es esencial para los procesos vitales y su mantenimiento.

La auto-organización en los procesos metabólicos se muestra en la trascendencia que poseen en todos los niveles de la realidad abordados en este capítulo, con niveles de definición como un todo, por encima de los comportamientos aislados de sus partes. Son tres los aspectos que marcan esto, a saber, la construcción colectiva de un proceso, la agregación y la autosemejanza, la división del trabajo (i.e. la organización). Así y todo, un proceso bioquímico como la *glucólisis* se comporta como un reloj químico, de manera muy similar a como lo hace la reacción de Belousov-Zhabotinskii, sólo que ahora se trata de un *reloj biológico*, con la peculiaridad de que la cadena de reacciones consiste en una serie arrosariada de estados estacionarios, con puntos intercalados oscilantes con diferencias de fase, que es lo que involucra al comportamiento caótico regulador del proceso completo. La investigación sobre las *analogías* viables entre sistemas dinámicos no biológicos y sistemas biológicos, por cierto también dinámicos, puede arrojar mucha luz acerca del papel que juegan las “fronteras” entre los comportamientos aislados de las células y las redes celulares propiamente dichas. En el estudio etiológico de algunos problemas neurológicos concretos, la construcción de algunas analogías ya no es pura ficción (Tomasi, Shokri-Kojori & Volkow, 2017). La unidad compleja organizada de la medicina debe seguir la lógica del tercero incluido, es decir, la que reconoce el papel que desempeña lo contradictorio en el ámbito de lo real, esa es la visión desde la complejidad. Finalmente, podemos asegurar que las formas, por medio de la topología, pueden proporcionar información invaluable al médico no sólo con fines diagnósticos, sino que, comprendiendo sus lógicas propias, adopte las conductas terapéuticas adecuadas al problema. En el libreto de los organismos vivos, las formas son la representación más fiel de la complejidad que habita el escenario de la realidad.

<sup>18</sup> Recomendamos ver el video <https://www.youtube.com/watch?v=uC4jXlPnTh0>

<sup>19</sup> Es útil ver el video que muestra el desastre en el puente colgante de Tacoma Narrows, disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=nFzu6CNtqec&spfreload=10>. El fenómeno de resonancia es el que lleva al sistema a realizar la transición de fase que puede ser, como en los casos fisiopatológicos que hemos mencionado aquí, a un nuevo nivel de estabilidad o, como en el puente de Tacoma, a la disolución total del sistema, dada su incapacidad de modificar su estructura (adaptación).

## BIBLIOGRAFÍA

- Balescu, R., 1975. *Equilibrium and Nonequilibrium Statistical Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Bernard, Cl., 1994. *Introducción al estudio de la medicina experimental*. México: UNAM.
- Boys, C.V., 1959. *Soap bubbles, their colors and forces which mold them*. New York: Dover Publications.
- Boys, C.V., 1964. *Pompas de jabón y las fuerzas que las producen*. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Déglise, F., 1997. *Le Platonisme et les Mathématiques*, Dossier épistémologie, Maîtrise de Mathématiques (J. Merker). Paris: École Normale Supérieure.
- de Pomposo, A., 2015a. El concepto de enfermedad y la recuperación de la científicidad en la medicina. En: Ruelas, E., Mansilla, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina. 2013-2014: Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: aplicaciones*. México: Academia Nacional de Medicina de México, Conacyt. pp.1-88.
- de Pomposo, A., 2015b. Los principios termodinámicos de la enfermedad. En: Ruelas, E., Mansilla, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina. 2013-2014: Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: aplicaciones*. México: Academia Nacional de Medicina de México, Conacyt. pp.89-140.
- de Pomposo, A., 2015. *La conciencia de la ciencia. Un juego complejo*. México: Centro de Estudios Filosóficos, Políticos y Sociales Vicente Lombardo Toledano, col. "Eslabones en el desarrollo de la ciencia".
- de Pomposo, A., 2016. La traza del tiempo en el centro del pensamiento de lo real, *Complejidad*, no.32, octubre-diciembre, pp.19-27. Buenos Aires.
- de Pomposo, A., 2017. La trace du temps au centre de la pensée du réel, *Complèssità*, anno XII, n. 1, gennaio-giugno, pp.6-10. Messina.
- Descartes, R., 1983. *Traité de l'homme*. In: *OEuvres et Lettres*. Paris: Gallimard.
- D'Espagnat, B., 1985. *Une incertaine réalité; le monde quantique, la connaissance et la durée*. Paris: Gauthier-Villars.
- Ehrenfest, P., Ehrenfest, T., 1990. *The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics*. New York: Dover Publications Inc.
- Ferreirós, J., 1999. Matemáticas y platonismo(s). *La Gaceta de la Real Sociedad Española de Matemáticas*, 2(3), pp.446-473.
- Feynman, R., Leighton, R.B. & Sands, M.L., 1966. *The Feynman Lectures on Physics*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company.
- Hernández-Hernández, V. y González-González, C., 2016. Tejiendo redes: desde las células hasta los ecosistemas. En: Laguna, G., et al. (coords.), *Complejidad y sistemas complejos*. [e-book] CDMX: CopIt-arXives y EditoraC3. pp.85-97.  
Disponible en el sitio: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>
- Monastyrsky, M.I. (editor), 2007. *Topology in Molecular Biology. DNA and Proteins*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Nicolis, G., 1995. *Introduction to Nonlinear Science*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Nicolis, G., & Nicolis, C., 2012. *Foundations of Complex Systems. Nonlinear Dynamics, Statistical Physics, Information and Prediction*. London: World Scientific.
- Penrose, R., 2007. *El camino a la realidad. Una guía completa de las leyes del universo*. México: Debate.

- Platón, 2008. Timeo. En *Diálogos*, Madrid: Editorial Gredos, vol. VI.
- Prigogine, I., 1997. *Las leyes del caos*. Barcelona: Drakontos-Crítica.
- Prigogine, I., & Nicolis, G., 1977. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. New York: John Wiley & Sons.
- Prigogine, I., 1977. *Time, Structure and Fluctuations*. Nobel Lecture, 8 dec. Disponible en: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine-lecture.pdf)
- Proust, M., 2016. *À la recherche du temps perdu, Du côté de chez Swann*. Paris: Gallimard.
- Ramón y Cajal, S., 1961. Reglas y consejos sobre investigación científica (Los tónicos de la voluntad). En: *Obras literarias completas*. Madrid: Aguilar.
- Reichl, L., 1998. *A Modern Course in Statistical Physics*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons.
- Reichl, L., 2004. *The Transition to Chaos. Conservative Classical Systems and Quantum Manifestations*. 2nd edition. New York: Springer-Verlag.
- Ross, A., 1992. *Platon et les Mathématiques*. Québec: Cégep de Lévis-Lauzon.
- Schneider, E.D., y Sagan, D., 2008. *La termodinámica de la vida: física, cosmología, ecología y evolución*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Sharma, L.K., et al., 2009. Mitochondrial Respiratory Complex I: Structure, Function and Implication in Human Diseases. *Curr Med Chem*, 16(10), pp.1266–77.
- Stewart, I., 2001. *¿Juega Dios a los dados? La nueva matemática del caos*. Barcelona: Crítica.
- Tomasi, D.G., Shokri-Kojori, E., & Volkow, N.D., 2017. Brain Network Dynamics Adhere to a Power Law. *Frontiers in Neuroscience*, 11: 72, doi: 10.3389/fnins.2017.00072
- Vitrac, B., 2006. Les mathématiques dans le *Timée* de Platon: le point de vue d'un historien des sciences. *Etudes platoniciennes*, 2, pp.11–78.
- Yip, Ch., et al., 2011. Evolution of Respiratory Complex I. Supernumerary subunits are present in the  $\alpha$ -proteobacterial enzyme. *The Journal of Biological Chemistry*, 286(7), pp.5023–5033.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## FISIOPATOLOGÍA, ENFERMEDADES COMPLEJAS Y CÁNCER

Moisés Villegas Ivey\*

EN el vestíbulo del Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI, del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), podemos admirar el mural del extraordinario muralista David Alfaro Siqueiros, que ha sido mudo testigo del acontecer cotidiano de los diferentes actores del drama llamado nominativamente *cáncer*, con sus diferentes apellidos: de pulmón, gástrico, pancreático, óseo, etc., de la multiplicidad de padeceres de la población que asiste al nosocomio, con su dolor enraizado y el despliegue de afectación en su entorno; incluida la interacción con los actores del sistema de salud a quienes la magnitud del desarrollo epidémico de ésta y otras de las ahora denominadas “enfermedades complejas” somete a una gran tensión, no sólo en ejercicio clínico, sino además en investigación, tratamientos, actitud ética, rediseño de los sistemas de salud, entre otras grandes variables.

El drama se desarrolla alrededor de la “búsqueda del culpable”, con un ingente número de sospechosos. En una danza macabra, se plantean las más diversas especulaciones tanto entre la población doliente como entre las hipótesis de los científicos cuya responsabilidad social es resolver el problema.



Fotografía del mural *Apología de la futura victoria de la ciencia médica contra el cáncer. Paralelismo histórico de la revolución científica y la revolución social*, 1958.

Fuente: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apologia\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apologia_1.jpg)

Cuando Siqueiros creó su mural, la expectativa para la solución del cáncer se sustentaba en algunos de los éxitos de la quimioterapia y de la radioterapia. El argumento de su obra refleja la convergencia de las revoluciones científicas y sociales

\* Universidad Autónoma de la Ciudad de México y Diplomado en Ciencia Médica y Ciencia de la Complejidad.

para la resolución de los grandes problemas de la humanidad. Vislumbra así las nacientes revoluciones del siglo XX, como la posible erradicación de dos grandes flagelos: el cáncer y la miseria.

Con sus característicos trazos vigorosos, envueltos en la magnífica teselación y la textura de sus colores, nos plantea el desarrollo de la ciencia médica, el poderoso instrumento de la bomba de cobalto –magníficamente destacado–, y la expulsión de los flagelos ya señalados a manera de espectros, de morfología aberrante, como la de células cancerosas.

Sí, la obra del gran artista, conocido como “el Coronelazo”, destila esperanza... una ciencia sin fronteras, una humanidad solidaria, sin distinción de credos, razas o clases; sociedades superiores; y expresa su gran deseo por un mundo mejor.

Pero si bien ya “ha corrido mucha agua bajo el puente” desde aquel entonces, y no sólo no se ha solucionado el problema sino que se incrementa en forma epidémica, no se puede soslayar ni el éxito de algunos tratamientos, ni el desarrollo de la investigación alrededor de la causalidad y el entendimiento de los mecanismos que producen el cáncer y los tratamientos que se han desarrollado. La historia alrededor de lo anterior es sumamente apasionante.

La carga del cáncer, tanto en el mundo entero como en México, resulta dramática. El cáncer causó aproximadamente 8 millones de muertes en el mundo: pasó de ser la tercera causa de muerte en 1990 al segundo lugar en 2013, después de las enfermedades cardiovasculares (Gómez, et al., 2016). Hay proyecciones alarmantes para 2020. En México, de 1989 a 2013, el número de defunciones en el IMSS se duplicó (Borja, et al., 2016). A la par, durante ese mismo lapso, se han ampliado instalaciones y jornadas de atención en las diversas instituciones.

El objetivo de este capítulo es hacer una revisión de algunos de los enfoques acerca de la fisiopatología, desde el paradigma clásico hasta el de ciencia de la complejidad, paradigma actualmente en construcción.

Para tratar el cáncer dentro del marco de las ahora denominadas enfermedades complejas, primero destacaré en forma breve algunos de los conceptos, principios y nociones de ciencia de la complejidad, para dar marco al desarrollo en medicina, quizá evidenciando el discurso connatural entre la biología y aquella, como bien plantearía Alexandré de Pomposo (2015).

Revisaré sucintamente los conceptos de homeostasis y de enfermedad, y las diferentes propuestas a la luz de las nuevas teorías, como la de redes, para desembo-car en las enfermedades complejas, a las que bien puede considerarse como puente entre paradigmas (Villegas, Lifshitz, y Cocho, 2015).

Finalmente, ubicado el cáncer como una enfermedad compleja, describiré algunas de las teorías acerca de su causalidad, para lo que echo mano del magnífico trabajo de James A. Marcum (2008), destaco algunos trabajos de investigación que me parecen muy relevantes y, finalmente, describo parte del trabajo de Donald Ingber y colaboradores, en lo que me parece el sustento efectivamente de una nueva fisiopatología (Ingber, 2003b) que será base para la investigación y la exploración de nuevos blancos terapéuticos.

COMPLEJIDAD, PROBLEMA E INTUICIÓN.  
COMPLEJIDAD COMO EXPLICACIÓN

Nos dice Henri Atlan (2003, p.1): "The notion of complexity has a long history. It was only intuitive for a long time, merely a word to designate our difficulties in coping with a given situation". Aunque inicialmente se consideró que la noción que correspondía a la complejidad era la de complicado, ya algunos de los teóricos de Teoría General de Sistemas, como Ross Ashby, rebasaron lo anterior. Ashby la planteó como propiedad de los sistemas en relación a su conducta ante perturbaciones del entorno (variedad), al mismo tiempo elaboró el concepto de organización y auto-organización con sustento matemático. Y von Neumann predijo que la ciencia de la complejidad emergería del siglo XX (Atlan, 2003).

Los conceptos en la ciencia se construyen a lo largo de muchos años, tras amplios debates y resultados múltiples, a la luz de la práctica.

En medicina, en general durante mucho tiempo, las nociones de complejidad fueron las de: complicado, dificultoso, incierto y sin solución definitiva, quizá en un momento dado hasta sinónimo de "idiopático". Sin embargo, diversos problemas han podido manejarse intuitivamente, tal vez a la manera que I. Lakatos sentenciaba diciendo que los científicos se han movido como el pez en el agua, sin saber de hidrodinámica. Cosma Rohilla (2001) menciona a la intuición como un camino natural que precede al de la sistematización y la teoría.

Ha habido un largo recorrido en la medicina en su soporte científico, hasta considerar a la enfermedad desde el punto de vista de la teoría de catástrofes. Se ha intentado llevar lo más adelante posible el método estadístico para construir la medicina basada en evidencias y la epidemiología clínica. Es relativamente reciente que la ciencia de la complejidad y una gran actividad interdisciplinaria empiezan a incorporar nuevos elementos, como se verá más adelante.

Aquí, consideraré a la complejidad como la zona intermedia del régimen en que operan los sistemas, y que se encuentra entre el orden y el desorden en los que el algoritmo para conocer al sistema o para su solución es no polinomial. Se encuentra, como nos dice la hermosa metáfora de Henri Atlan (1979): "entre el cristal y el humo".

En dicha zona los sistemas tienen por una parte conductas deterministas y estocásticas y, siendo sistemas disipativos, tienen fluctuaciones con características de auto-organización y una gran variedad de respuestas ante las perturbaciones del entorno, lo que les confiere la propiedad de adaptabilidad.

En este régimen funcionan los sistemas complejos: que intercambian materia, energía e información con el entorno. Poseen un gran número de componentes fuertemente interrelacionados, con muchos grados de libertad, de cuya interacción emergen comportamientos globales no explicables por las propiedades individuales. En su interacción pueden situarse en regímenes críticos, caracterizados por fluctuaciones espaciales y temporales en todas las escalas posibles de manera espontánea, sin la intervención de factores o fuerzas externas al sistema, dicha propiedad es la de auto-organización (Miramontes, 2013).

Debido a su organización, a los mecanismos de retroalimentación y a la sensibilidad que presentan a las condiciones iniciales, la conducta es no lineal, es decir, no responde a la suma o superposición de las partes por lo que la proporcionalidad no es necesariamente la regla.

La dinámica no lineal de los sistemas complejos está en relación con las propiedades de una estructura fractal, que conlleva correlaciones de largo alcance, bucles de retroalimentación, dinámicas erráticas y acoplamiento, manifestadas por variabilidad compleja en las conductas.

Las dinámicas son heterogéneas. Por esta heterogeneidad y la ley de los grandes números, muestran por una parte aspectos genéricos y, por otra, aspectos específicos.

La complejidad es, entonces, riqueza de comportamientos, una gran cantidad de información, y varias soluciones posibles.

Los organismos vivos en sus diferentes niveles están cerca del punto crítico. Siendo paradigmáticos para los sistemas complejos, es ahí donde se pueden ver de forma ubicua aspectos genéricos y específicos muy importantes (Villegas, Lifshitz, y Cocho, 2015). Es también en esa zona que se manifiesta la robustez y adaptabilidad del sistema, en donde pequeñas perturbaciones pueden generar grandes cambios.

#### HOMEOSTASIS Y ENFERMEDAD

El Dr. Hugo Aréchiga menciona que: “desde su postulación, el concepto de *homeostasis* se ha constituido en la piedra angular de la fisiología del siglo actual [XX]” (Aréchiga, 2000, p.9).

Durante este largo trayecto se han estudiado los mecanismos homeostáticos. Predominó en su interpretación que los sistemas fisiológicos normalmente operan para reducir la variabilidad y así mantener una constancia de la función interna (Goldberger, 1991).

Alrededor de esta interpretación se generó mucha discusión. Por ejemplo, Arturo Rosenblueth habría de plantear que el equilibrio homeostático era dinámico y que hasta ese momento no se contemplaba al estado termodinámico como referente; además, y como idea importante, señaló que: “estrictamente constancia invariante de cualquier característica biológica no existe” (Rosenblueth, 2005, p.80).

Menciona Sarah Knox (2010) que el término *equilibrio dinámico* es usado en lugar de homeostasis para ilustrar que el espacio de estado es limitado pero no estático en los individuos sanos. Y pone como ejemplo la frecuencia cardíaca que puede tener un rango limitado, pero varía grandemente en el tiempo.

Goldberger (1991) planteó que la noción de estado estable fisiológico se complicó por las observaciones que indican variabilidad intrínseca en muchos aspectos de una función saludable, citando como ejemplos la variabilidad en el latido cardíaco, en el electroencefalograma normal y en los niveles hormonales.

Es, pues, con la incorporación de las herramientas matemáticas de la dinámica no lineal que se va profundizando en el conocimiento de la fisiología y fisiopato-



logía del organismo, hasta considerar que la homeostasis es un fenómeno de un sistema que se da en el contexto de una termodinámica de no equilibrio (Recordati & Bellini, 2004).

La utilización del análisis de series de tiempo y de la física estadística han permitido esclarecer más los mecanismos fractal y no lineal involucrados en el control fisiológico y las redes de señales complejas, con invariancia de escala. Goldberger, et al. (2002) consideran la emergencia de un gran reto en la era postgenómica.

Una muestra del maravilloso mundo de los mecanismos de complejidad no lineal en la fisiología de la naturaleza (Goldberger, et al., 2002), sería: Cambios abruptos, oscilaciones no lineales, caos determinístico, atractores extraños, fractales, irreversibilidad en el tiempo; ondas no lineales (espirales, roles, solitones), resonancia estocástica, redes complejas, histéresis y emergencia.

Podemos entonces concluir que la homeostasis es un fenómeno del organismo, que se da alejado del equilibrio termodinámico, que es dinámico y que se expresa en variabilidad compleja y traduce la robustez del sistema.

Distinguir la dinámica en el rango de la homeostasis es necesario para considerar la inestabilidad como emergencia de enfermedad si, además, se acompaña de otra característica: la pérdida de complejidad del sistema, manifestada por diversos indicadores como la dimensionalidad fractal, el índice de Lyapunov, etc.

Las manifestaciones ostensibles estarían en el cambio súbito en los patrones temporales de las variables fisiológicas, cambios en los ritmos habituales o aparición de ritmos nuevos (Bélair, et al., 1995), y que estos autores han denominado enfermedades dinámicas.

Ante el dogma central de la biología, del determinismo genético (el ADN como programa) y el enfoque predominantemente biomolecular, se abren paso conceptos, nociones, postulados, teorías, que sirven como instrumentos para superar el enfoque reduccionista clásico.

#### ENFERMEDADES COMPLEJAS

Diversos autores han denominado *enfermedades complejas* a los trastornos con múltiples variables, con sustrato poligénico y con una fuerte interacción con el medio ambiente para que se produzca su expresión fenotípica (Craig, 2008), retomando así el papel relevante de la epigenética. Entre estas enfermedades se encuentran varios de los trastornos crónicos como la diabetes mellitus tipo 2, la obesidad, el síndrome metabólico, el asma, los trastornos cardiovasculares y el cáncer; todas ellas han tenido un despliegue epidémico y se encuentran actualmente entre las primeras causas de morbimortalidad en varios países, representando una carga importante para los sistemas de salud.

Dentro de la dialéctica de su presencia, una virtud de estas enfermedades es que evidencian los límites de los paradigmas clásicos, tanto en metodología diagnóstica como en tratamiento, amén de retar a los fundamentos epistémicos.

Es en esa virtud que a la visión genocentrista y al predominio del enfoque biomolecular van encontrándose alternativas; en un recorrido natural de la ciencia: al

buscar los mecanismos generales en la génesis de los fenómenos. Ejemplo de ello es el camino del estudio de la obesidad en el que, como destaca Barabási (2007), se encontró relación franca con la diabetes mellitus tipo 2 y otras seis enfermedades, poniendo en evidencia, además, que no basta la exploración de genes con relación a la enfermedad, sino que es necesario explorar en todas las escalas, incluidas las interacciones sociales.

En este camino se ha pasado de la obesidad a la diabetes, y, por la convergencia en la exploración de las diversas variables, ha culminado en el concepto de *diseasome*, alrededor de lo cual ha nacido la corriente de medicina de redes con la que converge la biología de sistemas (Zhou, et al., 2014).

Se ha explorado una red de alteraciones y genes relacionados a enfermedades, es decir, se exploran fenotipos conocidos, encontrando módulos comunes, tamizando los genes no esenciales y que se encuentran en la periferia de las redes (Goh, et al., 2007).

Utilizando bases de datos de fenotipos y enfermedades mendelianas (OMIM y Orphanet), se parte para explorar enfermedades comunes, complejas e infecciosas. Así, se ha conseguido generar una red de enfermedades humanas, en la que dichas enfermedades tienen aglutinación de signos y síntomas comunes. Encontrando fundamentos también comunes para la etiología, anatomía y función (Hoehndorf, Schofield & Gkoutos, 2015).

También, se han logrado avances enormes en la exploración de la interacción genotipo-fenotipo (Zhou, et al., 2014).

Mediante una aproximación de sistemas complejos a la patobiología humana Loscalzo, Kohane y Barabási (2007) plantearon la necesidad de una clasificación de la enfermedad en la era postgenómica. En su trabajo se trazaron como objetivo la construcción de una base lógica para clasificar la enfermedad humana, incorporando una aproximación no reduccionista de la biomedicina de sistemas.

En un artículo con título muy sugerente: "From 'omics' to complex disease: a systems biology approach to gene-environment interactions in cancer", Sarah S. Knox (2010) plantea la necesidad de un nuevo paradigma para la oncología clínica, que se enfoque en revertir la disfunción sistémica y ajuste los tratamientos a los estadios específicos del proceso; para lo que se requiere moverse de un andamiaje que busca destruir células aberrantes y tome el camino de la aproximación transdisciplinaria de la biología de sistemas y apunte a revertir los múltiples niveles de disfunción.

En el mencionado trabajo (Knox, 2010), la autora incursiona en una revisión conceptual que permite trascender el enfoque reduccionista a partir de sus límites, como la visión lineal de los fenómenos y la no consideración de la complejidad de los organismos. A la par, pone en claro la complejidad biológica, el concepto de homeostasis, y la dinámica no lineal, e ilustra con ejemplos tan claros como el del tabaco y la limitada correlación estadística con el cáncer de pulmón; pone en evidencia los límites en el tratamiento farmacológico del cáncer a partir de una consideración que me parece fundamental y que plantea de manera elegante: "The problem with this approach is that cancer cells are not alien invaders; they are

part of our own bodies" (Knox, 2010, p.5). Considera entonces fenómenos como la citotoxicidad en las células sanas del organismo, y amplía su consideración a los mecanismos de la señalización celular.

Al plantear las implicaciones de la disfunción sistémica en la etiología de la malignidad (Knox & Ochs, 2013), su revisión es un referente obligado cuando uno se quiere adentrar en la visión más avanzada sobre el cáncer.

Sarah S. Knox llega a lo que Marcum considera como la síntesis dialéctica entre el reduccionismo y el antirreduccionismo, y que sería la biología de sistemas.

Marcum (2008) nos dice que la investigación contemporánea del cáncer ilustra la aproximación reduccionista en sus términos teóricos, ontológicos y metodológicos, explicando los fenómenos biológicos complejos en término de componentes simples. Propone a la teoría del oncogene de Morange (1993, citado en Marcum, 2008, p.270) y Weinberg (1988, citado en Marcum, 2008, p.270) y a la teoría de la mutación somática, originalmente atribuida a Theodor Boveri (1914, citado en Marcum, 2008, p.270), como las más influyentes. Analiza el desarrollo que ha tenido dicha teoría, con planteamientos de un número limitado de componentes causales como los genes supresores.

Menciona cómo en el año 2000, Weinberg y Hanahan (citados en Marcum, 2008, p.271) proponen la idea de la heterotopia de la célula biológica, en la cual las células del tumor reclutan células normales para formar un tumor maduro. Argumentando que el cáncer es una enfermedad madura, compleja y multifacética, que exhibe al menos seis características distintivas: autosuficiencia en señales de crecimiento; insensibilidad al anticrecimiento o señales inhibitorias de crecimiento; potencial replicativo ilimitado; evasión de apoptosis; angiogénesis sostenida (generación de vasos sanguíneos); invasión tisular y metástasis. Weinberg y colaboradores extendieron la idea de las interacciones heterotípicas complejas para incluir los intercambios de la célula y su microambiente, destacando el papel del estroma en la matriz extracelular en la carcinogénesis.

Marcum analiza lo que he interpretado como una ruta dialéctica en la investigación de la causalidad del cáncer: la primera negación, como antirreduccionismo con expresión de un holismo y organicismo (que no tiene que ver con el vitalismo) en un camino de *top-down causation*, contrario a la teoría de la mutación por la vía de la *bottom-up causation*, en los que se involucran la teoría de campos en la organización de los tejidos, redes complejas heterogéneas, interacciones bidireccionales y niveles jerárquicos: genes, células, arquitectura tisular, organismo y medio ambiente. Ubicando en la segunda negación a la biología de sistemas, como síntesis que ya no sólo se propone contradecir, sino que busca la solución de la contradicción.

El autor analiza los aportes de diversos autores, como Sonnenschein y Soto (1999; 2004, citados en Marcum, 2008, p.273), de donde se desprende un planteamiento muy interesante, a saber, la consideración que las mutaciones sean en realidad efecto y no causa. Destaca la interacción epitelio-mesénquima, de importancia crítica para la tumorigénesis.

A continuación, describe Marcum el soporte experimental de estos y otros investigadores como Weaver y Gilbert (2004, citado en Marcum, 2008, p.274), Horn-

berg, et al., Khalil y Hill, y Liu, et al. (citados en Marcum, 2008, p.275). Que ya en la aproximación de biología de sistemas esquivan la causalidad local, con un nivel jerárquico, de tal manera que consideran el flujo de la causalidad en una sola dirección *bottom-up* o *top-down*. Sin embargo, Bruggeman y Westerhoff (2006, citado en Marcum, 2008, p.275) plantean que el flujo es bidireccional o recíproco en la naturaleza. En biología de sistemas se plantea también lo que Fabio Grizzi y colegas (2006, citado en Marcum, 2008, p.275) llaman la "causalidad multiescala".

Mina Bissell y colegas (citados en Marcum, 2008, p.276) proponen una teoría de reciprocidad dinámica que explica cómo la configuración de la matriz extracelular ayuda a guiar la expresión de los genes y de este modo controla la estructura y la función de los tejidos. Y cómo los tejidos y los órganos mantienen la homeostasis. Relevante es que para la investigación han desarrollado modelos con sistemas de cultivos en 3D, lo que ofrece mayores posibilidades de estudio.

Finalmente, nos describe Marcum la dificultad de la construcción de la síntesis paradigmática necesaria que, a mi manera de ver, refleja una cierta inercia de la visión maniquea, i.e. la exclusión de los contrarios, y la dificultad en la lógica del tercero incluido.

Cuando se enfrenta la construcción de lo nuevo, quizá debiéramos tener en cuenta la vieja receta leninista de escudriñar el pasado con serenidad, sin contemplación, buscando los hilos de continuidad y la "herencia" a la que hay que renunciar, pues el "culto al pasado" puede generar una actitud conservadora e incluso reaccionaria, anquilosada. Estableciendo una analogía con un pasaje bíblico, el historiador mexicano Enrique Semo diría que en dicho culto uno puede convertirse en "estatua de sal", paralizado ante la historia.

#### UNA NUEVA FISIOPATOLOGÍA

Diversos trabajos han ido mostrando los límites de las hipótesis tradicionales sobre la carcinogénesis, y otros no sólo las cuestionan, sino que van buscando caminos para superarlo. Aquí describo someramente algunos resultados del trabajo del Dr. Donald Ingber y colaboradores, producto de varias décadas de esfuerzo, en virtud de que me parece que ofrecen grandes expectativas para la investigación y posibles soluciones terapéuticas del cáncer.

He seleccionado los trabajos que me parecen fundamentales para cumplir el objetivo de este capítulo, pero si se tienen objetivos que exigen mayor profundidad de conocimiento, vale la pena la consulta exhaustiva de sus publicaciones. La selección que he hecho obedece a buscar, sobre todo, los planteamientos que sustentan una metodología y un enfoque que no sólo se circunscribe a la ciencia de la complejidad, sino que le aporta y la enriquece, desde el terreno mismo de la investigación no sólo teórica, sino experimental.

En un contexto en el que la biología y la medicina se encuentran centradas en el terreno biomolecular. La teoría de redes en un principio, quizá por inercia histórica y en el boom de la era genómica, había caminado, escudriñando la superación, sin encontrar un paso definitivo, quizá navegando todavía en la superficie.

Como bien destaca Ingber (2003a), el desarrollo de la teoría de la tensegredad, sienta las bases para abordar el gran problema de la biocomplejidad: La exposición del sustrato físico que explica, con sustento matemático, la relación entre mecánica y bioquímica a nivel molecular.

Es en la tensegredad celular que se sustenta el andamiaje para la organización jerárquica de los sistemas vivos, como bien plantea “de la molécula al organismo”. Este mecanismo primigenio bien puede explicar el origen de la vida celular, sustentado en los principios del diseño natural (Ingber, 2000).

El modelo supera a los previos, en tanto que la forma celular se consideraba dada por la compresión de la membrana al citosol.

El modelo se desarrolla poco después del descubrimiento del citoesqueleto al mejorar la capacidad de la microscopía electrónica; se inspira en las estructuras descritas por Fuller y el concepto es profundizado y dotado, en su desarrollo, de soporte matemático, haciendo uso de la poderosa herramienta computacional.

Se busca entender la conducta celular y del organismo en sistemas jerárquicos, más que en partes aisladas, bajo el concepto de sistemas dentro de otros sistemas, a su vez dentro de otros sistemas: células, tejidos, órganos.

Se exploran las implicaciones del modelo en la biocomplejidad para comprender los procesos de mecanotransducción que explican la bioquímica celular y la formación de patrones biológicos como las redes de la estructura y funcionamiento celular, las redes complejas de genes, proteínas, y las redes de información, que pueden ser un camino para la solución de la *cell signaling*.

Las células, esclarece Ingber, funcionan como redes mecánicas discretas y no como un *continuum* mecánico; donde el estado pre-estrés es el principal determinante de deformabilidad celular. La tensegredad celular es un producto de la resistencia que ofrecen los microtúbulos y de la adhesión a la matriz extracelular frente a las fuerzas de compresión del citoesqueleto.

Las implicaciones del modelo en la complejidad estructural del organismo, como multimodularidad, es que células, tejidos y otras estructuras biológicas tienen en todas las escalas conducta mecánica integrada en una arquitectura de tensegredad (Ingber, 2003b).

El modelo busca explicar la conducta celular y de los tejidos como emergencia de las interacciones colectivas con las redes moleculares complejas. La experimentación lleva a considerar a las variaciones en la forma celular como un simple parámetro de control que puede activar diferentes programas de genes: crecimiento, diferenciación y apoptosis, y que se prueba, por sus propiedades, son atractores de la dinámica, y los cambios en el atractor pueden considerarse como transiciones de fase biológicas. Estas redes estructurales no sólo afectan a los genes, sino también a las redes de proteínas y allanan el camino para la explicación del fenotipo.

La investigación y la experimentación alrededor del modelo proporcionan el andamiaje que profundiza la explicación del funcionamiento del organismo y deviene consecuentemente en una nueva fisiopatología que sienta premisas para la exploración en la causalidad del cáncer y otras de las denominadas enfermedades complejas y también para la búsqueda de nuevas soluciones terapéuticas.

## CÁNCER Y LOS PROCESOS DE DESARROLLO

Partiendo del interés en los factores epigenéticos, en particular el rol del *stromal microenvironment* y la angiogénesis en la formación de tumor, nos dice Ingber, el cáncer es presentado “como una enfermedad de los procesos del desarrollo que gobiernan cómo las células se organizan en tejidos y los tejidos en órganos” (Ingber, 2002, p.547).

En dicho artículo se plantea la contradicción a la hipótesis clásica que considera al cáncer como una enfermedad producto de la proliferación celular irrestricta, y que es, entonces, una enfermedad de la célula. Se rechaza la aproximación reduccionista enfocada en el análisis de las propiedades anormales de las células del tumor individual.

Desde 1982 Ingber y Jamieson (citado en Ingber, 2002, p.547) planteaban que el cáncer podría verse como resultado de la desregulación de los procesos finalmente coordinados que normalmente gobiernan cómo las células individuales son integradas en tejidos, los tejidos en órganos y los órganos en organismos vivientes funcionales.

Entonces el cáncer es considerado como una enfermedad de las interacciones epitelio-mesénquima (EM) y la regulación de la matriz extracelular (MEC).

La argumentación es desarrollada en forma impecable a lo largo del artículo; basada gran parte en trabajo experimental desarrollado hasta entonces, no sólo por su grupo, sino por otros grupos. Se fundamenta desde la histogénesis normal y el control por la MEC y su papel en la desregulación de la interacción EM en la carcinogénesis.

Ingber considera que se abre camino excitante para la futura investigación y para la aplicación de microingeniería, no sólo en el estudio de los fenómenos de la carcinogénesis, sino además su posible aplicación en la terapéutica.

Plantea además que se sientan bases para la *complex systems biology* y con la que convergen algunas conceptualizaciones de la *complex systems science*.

En un trabajo reciente Werfel, et al., (2013), desarrollan un modelo computacional basado en agentes, en el que destaca un magnífico diseño, que muestra que la variación estructural del microambiente de tejido alteró el número de células vecinas y la forma celular, teniendo como resultado un crecimiento patológico, consistente con la progresión de cáncer, en el que no fue necesario el cambio genético.

El trasplante de células de comportamiento anómalo a un medioambiente normal (MEC) o el efecto de la compresión física, que restauran la conducta adecuada de crecimiento, refuerzan los resultados. Se plantea así que las mutaciones genéticas sean posteriores y, a manera de *feedback*, aceleren el progreso del cáncer.

Los resultados obtenidos del modelo computacional fueron comparados con el análisis histológico y mecánico de las glándulas mamarias de ratas transgénicas (C3 (1)-SV 40 Tag) a las 16 semanas de edad (cuando inician cáncer mamario), encontrando analogía entre los hallazgos y el modelo.

La relevancia del estudio es la demostración de que los cambios físicos en el microambiente del tejido (a través de la variabilidad en la forma celular), pueden

inducir cáncer o acelerar su progresión, eventualmente en ausencia de mutación de genes (Werfel, et al., 2013). Finalmente, se destaca también el papel del ruido y su amplitud en el desplazamiento de los atractores en la dinámica.

## CONCLUSIONES

Puede verse que el cáncer y otras de las denominadas enfermedades complejas son un espacio en que pueden ubicarse los límites del conocimiento clásico y en donde surgen alternativas que buscan superarlos, es decir, constituyen un puente entre paradigmas.

También puede verse que surgen otros enfoques a lo largo de un arduo trabajo y que quizá, parafraseando a Proust, se comienza a caminar el mismo camino pero con otra mirada.

Es en la construcción de un nuevo paradigma donde se abren posibilidades para buscar soluciones a los viejos problemas. Es en este camino en el que surgen las revoluciones científicas. Esperemos encontrarnos ya a sus puertas; los logros hasta hoy obtenidos nos hablan de esa posibilidad.

A manera de corolario, podríamos decir también que ya vendrán herederos de Siqueiros a plasmar con su arte una nueva apología de aquellos logros, con los que la humanidad busca construir nuevas y mejores sociedades.

Para finalizar, me ha surgido una pregunta: ¿El trabajo de Ingber no merece un Premio Nobel?

## BIBLIOGRAFÍA

- Aréchiga, H., 2000. *Homeostasis*. México: CEIICH-UNAM, Col. Conceptos.
- Atlan, H., 1979. *Entre el cristal y el humo*. Madrid: Debate.
- Atlan, H., 2003. The living cell as a paradigm for complex natural systems. *ComplexUs*, 1, pp.1-3.
- Barabási, A.L., 2007. Editorial. Network disease – From Obesity to the “Diseasome”. *N Engl J Med*, 357, pp.404–407.
- Bélair, J., Glass, L., an der Heiden, U. & Milton, J., 1995. Dynamical Disease: Identification, Temporal Aspects and Treatment Strategies of Human Illness. *Chaos*, 5(1), pp.1–7. doi:10.1063/1.166069.
- Borja, V.H., Dávila, J., Rascón, R.A., González, M., Fernández, J.E., Mejía, I., González, J. & Escudero, P.M., 2016. Cancer mortality in the Mexican Social Security Institute, 1989–2013. *Salud Pública de México*, 58(2), pp.153–161.
- Craig, J., 2008. Complex diseases: Research and applications. *Nature Education* 1(1), p.184.
- De Pomposo, A., 2015. El concepto de enfermedad y la recuperación de la científicidad en la medicina. En: Ruelas, E., Mansilla, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina. 2013-2014: Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: aplicaciones*. México: Academia Nacional de Medicina de México, Conacyt. pp.1–88.
- Goh, K.I., Cusick, M.E., Valle, D., Childs, B., Vidal, M., & Barabási, A.L., 2007. The human disease network. *PNAS*, 104(21), pp.8685–8690.

- Goldberger, A.L., 1991. Is the normal heartbeat chaotic or homeostatic? *News Physiol Sci.*, 6(2), pp.87–91.
- Goldberger, A.L., Amaral, L.A., Hausdorff, J.M., Ivanov, PCh., Peng, C.K., Stanley, H.E., 2002. Fractal dynamics in physiology. Alterations with diseases and aging. *PNAS*, 99 Suppl 1, pp.2466–72.
- Gómez, H., Lamadrid, H., Cahuana, L., Silverman, O., Montero, P., González, M.C., et al., 2016. The burden of cáncer in México, 1990-2013. *Salud Pública de México*, 58(2), pp.118–131.
- Hoehndorf, R. Schofield, P.N. & Gkoutos, G.V., 2015. Analysis of the human disease using phenotype similarity between common, genetic, and infectious disease. *Sci Report.*, 5, p.10888. doi:10.1038/srep10888.
- Ingber, D.E., 2000. The origin of cellular life. *BioEssays*, 22, pp.1160–1170.
- Ingber, D.E., 2002. Cancer as a disease of epithelial-mesenchymal interactions and extracellular matrix regulation. *Differentiation*, 70, pp.547–560.
- Ingber, D.E., 2003a. Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology. *Journal of Cell Science*, 116, pp.1157–1173.
- Ingber, D.E., 2003b. Tensegrity II. How structural networks influence cellular information processing networks. *Journal of Cell Science*, 116, pp.1397–1408.
- Knox, S., 2010. From ‘omics’ to complex disease: a systems biology approach to gene-environment interactions in cancer. *Cancer Cell International*, 10, p.11. doi:10.1186/1475-2867-10-11.
- Knox, S. & Ochs, M.F., 2013. Implications of systemic dysfunction for the etiology of malignancy. *Gene Regul Syst Bio.*, 7, pp.11–22.
- Loscalzo, J., Kohane, I. & Barabási, A.L., 2007. Human disease classification in the post-genomic era: a complex systems approach to human pathobiology. *Mol Syst Biol.*, 3, p.124.
- Marcum, J.A., 2009. Cancer: complexity, causation and systems biology. *Medicina & Storia*, IX(17–18), pp.267–287. Paper presented at the Seminar on Causality Models in Medicine, 2008, University of Geneva.
- Miramontes, O., 2013. Evolución y materia compleja. En: Miramontes, O. y Volke, K. (eds), *Fronteras de la física en el siglo XXI*. México, CDMX: CopIt-arXives. Disponible en el sitio: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>
- Recordati, G. & Bellini, T.G., 2004. A Deninition of internal constancy and homeostasis in the context of non equilibrium thermodynamics. *Exp Physiol.*, 89(1), pp.27–38.
- Rohilla S., C., 2001. *Causal Architecture, Complexity and Self-Organization in Time Series and Cellular Automata*. PhD. University of Wisconsin at Madison. Disponible en <http://bactra.org/thesis/single-spaced-thesis.pdf> [consultado: 4.abril.2018].
- Rosenblueth, A., 2005. A Critique of Homeostasis. En: *Obra Filosófica*. México, CDMX: El Colegio Nacional. pp.79–92
- Villegas, M., Lifshitz, A. y Cocho, G., 2015. Enfermedades complejas, “un puente” entre paradigmas. En: Ruelas-Barajas, E. y Mansilla-Corona, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina: las ciencias de la complejidad y la innovación médica*. México: Academia Nacional de Medicina-Conacyt, Editorial Intersistemas. pp.141–153.
- Werfel, J., et al., 2013. How changes in extracellular matrix mechanics and gene expression variability might combine to drive cancer progression. *PLoS ONE*, 8(10), e76122.
- Zhou, X., Menche, J., Barabási, A.L. & Sharma, A., 2014. Human symptoms-disease network. *Nat Commun.*, 5, p.4212. doi:10.1038/ncomms5212.



## EMOCIONES, ESTRÉS Y SALUD. DESDE EL PARADIGMA LINEAL AL DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS

*Benjamín Domínguez Trejo\**  
*Erik Leonardo Mateos Salgado\**  
*José Javier Reyes Lagos<sup>§</sup>*

### INTRODUCCIÓN

EL cambio científico no sólo puede concebirse hegemónicamente como un tipo de progreso racional —escalar la montaña para alcanzar la verdad— sino que ha sido también reconceptualizado como un producto social influido psicológicamente y, en cierta medida, un cambio desfasado de los encuadres explicatorios “lineales” vigentes (Mitchell, 2016; Kuhn, 2005). Por ejemplo, la experiencia humana del dolor es el resultado de la interacción del procesamiento nociceptivo con la modulación cognitiva-emocional y su reevaluación (Melzack & Casey, 1968). Los estudios con imágenes (RMf) han rectificado de manera consistente la noción predominante de postular la existencia de un solo “centro del dolor”, en su lugar se ha generado la identificación de un conjunto de estructuras cerebrales —“La matriz del dolor”— que responde sistemáticamente a los estímulos instigadores de dolor y que presumiblemente fundamenta la experiencia subjetiva del dolor (Apkarian, et al., 2005; García-Larrea & Peyron, 2013; Tracey & Mantyh, 2007). Hasta ahora la percepción de la intensidad y desagrado del dolor se han evaluado primordialmente apoyándose en el reporte verbal del paciente, recurriendo muchas veces a escalas visuales análogas (EVAS). Sin embargo, se presentan discrepancias entre las conductas no-verbales y los niveles evaluados con el reporte verbal, particularmente en los pacientes con dolor crónico (Fordyce, et al., 1973). Además, la obtención —incluso para clínicos experimentados— de estas evaluaciones —pacientes con pocas habilidades de comunicación (niños, demencia, etc.) son difíciles de obtener. Para superar estas limitaciones es necesario explorar la aplicación de biomarcadores autonómicos (temp. de la piel) e inmunológicos (IL-6 salival) que revelen o complementen la relación presumiblemente no-lineal entre la respuesta inflamatoria y los cambios emocionales (Mendieta, et al., 2016; Muscatell, et al.,

---

\* Facultad de Psicología, Universidad Nacional Autónoma de México.

§ Facultad de Medicina, Universidad Autónoma del Estado de México.

2016). En los últimos veinte años la investigación en el campo de la psicología de la salud a nivel internacional y latinoamericano ha sido influida por modelos teóricos que explican las diferencias individuales en el comportamiento y en el riesgo de enfermedades dentro de un marco biopsicosocial (Piña-López, et al., 2013; Ogden, 2012), sin embargo, estos modelos han estado condicionados por el abordaje lineal y reduccionista dominante, el cual ha limitado la identificación de la interacción de los componentes biológicos, psicológicos y sociales, de donde emergen nuevos procesos que no son comprensibles al estudiar aisladamente cada componente o proceso y que, al expresarse como la auto-organización del sistema, se imposibilita a los investigadores para estudiarlo. Consideramos que la importancia de incluir el estudio de los sistemas complejos en el ámbito de la psicología de la salud permitiría aportar un conocimiento adicional de los procesos de salud y enfermedad cuando estos no presentan un comportamiento lineal, como puede ejemplificarse por las enfermedades no transmisibles (*non-communicable diseases*: NCDs), también conocidas como enfermedades crónicas, y que no son transmitidas de persona a persona, son enfermedades prolongadas y progresan lentamente. Las cuatro principales son las cardiovasculares, los cánceres, las respiratorias y la diabetes (WHO, 2014) todas ellas vinculadas con la modulación emocional y el estrés.

Una ventaja de estudiar sistemas lineales ha radicado en que es posible predecir su comportamiento, ya que se considera que el tipo de cambio en las causas implica el mismo tipo de cambio en los efectos; además, si es determinista sería posible dividirlo en sus partes más simples y fáciles de estudiar, lo que llevaría a comprenderlo totalmente (Cilliers, 2013; Mitchell, 2009). No obstante, existe evidencia que en el proceso de salud-enfermedad estas características no están presentes siempre, por lo cual el abordaje desde los sistemas complejos está justificado (Sturmberg & Martin, 2013).

Para fines de este capítulo, consideraremos a los sistemas complejos como fenómenos compuestos por una gran cantidad de elementos (o partes del sistema) que interactúan entre sí de forma no lineal, capaces de intercambiar información con su entorno y de adaptar su estructura interna como consecuencia de tales relaciones (Cilliers, 2013; Mitchell, 2009). Debido al múltiple número de factores de entrada que interactúan en los sistemas biológicos complejos, se obtienen salidas complejas. De hecho, el cuerpo humano es considerado como un sistema biológico complejo per se, las salidas (un ejemplo de ello serían las series de tiempo fisiológicas) tienen la peculiaridad de presentar un comportamiento en donde sus propiedades estadísticas cambian conforme el tiempo avanza, es decir, tienen propiedades no estacionarias, además de que se caracterizan por ser irregulares y no lineales.

Para el análisis de los sistemas complejos se ocupan métodos estadísticos que permiten cuantificar el grado de regularidad o irregularidad de un sistema. Los métodos están basados en técnicas de análisis no lineal, de tal forma que la no estacionalidad de las series de tiempo fisiológicas generadas por los seres vivos rompe con el paradigma lineal de la homeostasis y las metodologías bioestadísticas tradicionales (Goldberger, et al., 2002).

## ESTRÉS Y SALUD

Aunque la palabra estrés es más conocida que comprendida, no necesariamente implica que todos están familiarizados con su definición. Hans Selye (1973) usó esta palabra para determinar una respuesta no específica del cuerpo ante alguna demanda frente a los desafíos, y donde esta respuesta busca restablecer una normalidad. Posteriormente se establecieron diferentes definiciones, por ejemplo, como una amenaza real o interpretada a la integridad fisiológica y psicológica de un individuo que resulta en respuestas conductuales y/o fisiológicas; lo importante de esta definición es que considera factores psicológicos como desencadenantes del estrés y también en sus consecuencias, y no se limita solamente a la respuesta biológica que caracteriza al estrés, como propuso Selye. Así, el estrés tiene efecto sobre la fisiología, conducta, experiencia subjetiva y función cognitiva (Levine, 2005).

Los “estímulos estresores” incluyen diferentes factores que producen esencialmente la misma respuesta biológica (Selye, 1973). El estresor puede ser cualquier intrusión al ambiente interno y/o externo, también puede ser el retiro de algún estímulo del ambiente; se puede presentar una o varias veces por corto tiempo o por periodos prolongados; su exposición puede ser constante (Steckler, 2005) y suelen clasificarse como físicos y psicológicos.

Desde los primeros estudios de Selye (1973) se reportó que estresores con la misma potencia, pero cualitativamente diferentes, no producen necesariamente la misma respuesta asociada al estrés, lo que sugería la presencia de no linealidad. Además, el estrés se podría considerar como un sistema con tres componentes: entrada (estímulo estresante), un componente de procesamiento (que incluye la experiencia subjetiva) y la salida (respuestas de estrés), además estos componentes tendrían retroalimentación, comunicación entre cada uno y ciclos de control (Levine, 2005). Así considerado, resulta razonable usar la perspectiva de los sistemas complejos.

UNA NUEVA VISIÓN OBTENIDA POR LA EXPERIENCIA  
DE INVESTIGACIÓN CLÍNICA PSICOLÓGICA EN MÉXICO

Observar, estudiar y tratar de iniciar una intervención psicológica remedial, con cientos de personas privadas de su libertad física, durante el periodo 1967-1982 (Domínguez y Olvera, 1977; Domínguez, 1982; 1983), nos reveló directamente la importancia de las emociones y la conducta social como factores de importancia central para los procesos de salud y la aparición de casi todas las enfermedades transmisibles y no transmisibles; nos percatamos que estábamos frente a un problema que no se podía abordar únicamente desde una perspectiva lineal ni reduccionista. Un enfoque global debería de considerar los comportamientos de tipo socioemocional destacados, como la privación física de la libertad, la falta de higiene, el sexo inseguro, el tabaquismo, el consumo excesivo de alcohol, la dieta poco saludable y los estilos de vida sedentarios (Oldenburg, De Courten & Freaun,

2010; Fisher, et al., 2011), asimismo, debería estudiar sus interacciones e influencias con la “salud mental” y el estado de bienestar.

Una variable que podríamos considerar como parte de un fenómeno complejo es la percepción de poder modular o ejercer algún control sobre los estresores, y es el reflejo de la interacción del estatus socioeconómico, el estilo de crianza y factores de personalidad y que interactúan e influyen el estado de salud. Esta percepción de control tiende a disminuir a medida que se desciende en la escala socioeconómica y aumenta la edad; y tiene consecuencias potencialmente graves. Los que están ubicados en la parte inferior de la escala socioeconómica tienen tres veces más probabilidades de morir prematuramente que los que están en la parte superior. También son más propensos a sufrir depresión, enfermedades del corazón y diabetes. Los efectos del estrés durante los primeros años de vida parecen persistir hasta la edad adulta (Nelson, Lau & Jarcho, 2014).

El epidemiólogo británico Michael Marmot (2004) categorizó este problema como el “síndrome del estatus”, durante años condujo estudios de funcionarios británicos y de otros países que trabajaron en una jerarquía rígida durante décadas, y encontró el papel protagónico de los sospechosos de siempre: el fumar, la dieta y el acceso a la atención sanitaria. Estableciendo una relación directa entre la salud, el bienestar y el lugar que ocupamos en el gran organigrama; según Marmot: “cuanto más alto se encuentra una persona en la jerarquía social, mejor su salud”. De acuerdo con los estudios de Marmot, los pobres tienen mucho menos recursos para afrontar estas situaciones. Así que el estrés que puede incapacitarlos se caracteriza por la falta de un sentido de control sobre el desenlace o destino propio.

A decir de Robert Sapolsky (Sorrells, et al., 2009, p.35), un neurobiólogo de la Universidad de Stanford, el “estrés temprano en la vida y la cicatriz que deja cada experiencia, aumenta el envejecimiento y hace más difícil revertirla”, “nunca es tarde para iniciar una intervención, pero cuanto más tiempo transcurra, el trabajo será más difícil”. Estas investigaciones suministraron evidencia para entender las diferencias raciales y su relación con la longevidad. En Estados Unidos de Norteamérica, en promedio, los blancos vivían cinco años más que los afroamericanos. Otros estudios sugieren que la experiencia subjetiva del racismo<sup>1</sup> contra los afroamericanos –un factor importante de estrés– parece tener efectos importantes sobre la salud (Eisenberger, 2012; Muscatell, et al., 2016). Los porcentajes de discriminación correlacionan con la acumulación de grasa visceral en mujeres, lo que aumenta el riesgo de síndrome metabólico (y por lo tanto el riesgo de enfermedad cardíaca y diabetes). En los hombres se correlacionan con la presión arterial alta y enfermedad cardiovascular. Bruce McEwen ha descrito estas relaciones como una ruta por la cual “la pobreza se mete bajo la piel” (Shonkoff, Boyce & McEwen, 2009). La posición social de los padres, el propio nivel de estrés durante los cambios tempranos de la vida y cómo el cerebro y el cuerpo funcionan, afectan los niveles de vulnerabilidad a las enfermedades degenerativas “no-trasmisibles” hasta varias décadas después.

---

<sup>1</sup> Llamado más recientemente “dolor social”.

Ante estos hallazgos es necesario también considerar el tipo de estrés. Por un lado, el que todos conocemos y hasta cierto punto aguantamos, y que en cierto sentido es parte del tipo de vida que hemos creado. Aunque muchos se quejan de largas y variadas presiones, horas interminables de transporte y trabajo, en realidad, este es un tipo de estrés tolerable; el verdadero estrés con mayúscula es otro y comenzamos apenas a entenderlo. El primer tipo, aunque es desagradable, podemos categorizarlo como manejable en la cantidad correcta, e incluso puede fortalecernos. El segundo puede hacernos más vulnerables, enfermarnos, incapacitarnos o matarnos. ¿Cómo o quién puede distinguirlos? Hasta la fecha los estudios científicos han adoptado una explicación extraña y subjetiva: mientras más indefensa se sienta una persona cuando se enfrenta a un estresor o fuente de estrés, más tóxicos serán sus efectos. Ahora bien, las investigaciones referidas han sido ejecutadas desde el enfoque lineal dominante, queda la interrogante de si la interacción de cada uno de los componentes de la percepción de control del estrés finalmente son el reflejo de una propiedad emergente.

Es importante considerar que la mayoría de estas conductas no saludables, y las enfermedades con las que están asociadas, desafortunadamente son más comunes en los países de Latinoamérica, con poblaciones desfavorecidas y vulnerables, y son casi la norma en las comunidades cautivas (cárceles, hospitales psiquiátricos, asilos, etc.). Condiciones crónicas de salud como las enfermedades cardiovasculares, el cáncer, la diabetes, el dolor y las conductas relacionadas con los factores de riesgo han alcanzado un protagonismo más notable y son cada vez más incapacitantes y frecuentes en los países con ingresos bajos o medios (PIBM) (Daniels, et al., 2014).

Afrontar el estrés cuando se cuenta con recursos de auto-regulación emocional, conocidos como resiliencia,<sup>2</sup> favorece lograr el éxito ante la adversidad, recuperándose de una mala experiencia o establecer una resistencia activa a través de mecanismos de afrontamiento. La resiliencia, sin embargo, sólo tiene una duración momentánea y no es maleable (Lü, Wang & You, 2016). Requiere el desarrollo de una arquitectura cerebral sana, lo que determina, en parte, flexibilidad cognitiva y por consecuencia una respuesta eficiente o mal regulada ante los desafíos o factores de estrés.

Los psicólogos y los especialistas médicos que trabajamos en escenarios hospitalarios como investigadores y clínicos, rutinariamente preguntamos a las personas sobre el grado en el que están experimentando el estrés y una variedad de síntomas emocionales y físicos que van desde la tristeza, el dolor de larga duración, las manos húmedas, la tensión muscular, etc. (Domínguez, 2009). Una aproximación de tipo lineal ha prevalecido en el campo de la salud y debe mucho de su prestigio a su antiguo éxito en su aplicación a las enfermedades infecciosas, donde la identificación de la "causa" (agente infeccioso, virus, bacteria, lesión, etc.) era suficiente para modificar el desenlace (enfermedad).

---

<sup>2</sup> Mecanismo de adaptación flexible, que depende de los rasgos del individuo y las experiencias vividas en el pasado, sobre todo en la infancia, estas pueden o no promover el desarrollo de una arquitectura cerebral sana (McEwen, Gray & Nasca, 2015).

A lo largo de más de sesenta años los psicólogos a nivel internacional iniciaron el estudio de la actividad electrodérmica, la presión arterial, la actividad muscular, la respiración, la actividad del corazón y las ondas cerebrales en respuesta ante estresores físicos o cognitivos. Posteriormente, el interés científico fue cambiado, y posteriormente los psicofisiólogos se interesaron más en el funcionamiento del sistema nervioso central evaluado mediante técnicas de neuroimagen (Apkarian, Hashmi & Baliki, 2011; Ruvalcaba y Domínguez, 2010).

El espectro de aplicaciones de la evaluación psicofisiológica que considera la interacción entre variables fisiológicas y procesos psicológicos, como el estrés o la emoción, en los PIMB se encuentra en campos de la medicina como: cardiología conductual (Figueroa, et al., 2010); cronobiología; psicósomática y medicina conductual (Rodríguez, 2010); el trabajo científico sobre el estrés y la investigación del sueño (Ayala y Mexicano, 2010), e incluso en las disciplinas psicológicas como los escenarios laborales y sociales. Estos trabajos se han venido realizando a través de una variedad de técnicas de medición, la mayoría de ellos en la modalidad “no invasiva”, para registrar y evaluar los diferentes sistemas fisiológicos de una manera que complementen las medidas conductuales y el auto-informe.

Apoyándonos en el enfoque psicofisiológico comenzamos a estudiar diversas problemáticas (Colotla and Domínguez, 1975), incluyendo el estrés post-traumático y nos planteamos: ¿Qué hemos aprendido realmente de las víctimas de desastres y traumas? Concluimos de manera genérica:

- a) No todos necesitan ni pueden beneficiarse de la ayuda psicológica; aprox. 30 % (Bonanno & Mancini, 2008).
- b) Para las personas en los países con ingresos altos (PIA), los eventos traumáticos podrían ser conceptualizados como un evento excepcional, mientras que en los PIBM podrían ser una “respuesta natural” ante la habituación por vivir bajo circunstancias adversas.

El reconocimiento “basado en evidencia” de las limitaciones de los modelos lineales de la psicología conductista, para el abordaje de problemas de naturaleza “compleja” y en especial la búsqueda de una mayor capitalización de las aportaciones psicológicas nacionales, impulsó laboralmente la búsqueda de relaciones profesionales con especialistas del campo médico, expertos en neumología (Dr. Raúl Cicero), algología (Dr. Vicente García Oliveira y Dr. J. Rafael Hernández-Santos), inmunología (Dr. José Montes Montes), pediatría (Dra. Antonieta Flores), cardiología (Dr. Luis Alcocer Díaz-Barreiro), biólogos evolutivos, ingenieros y físicos del campo de las dinámicas no lineales (Dr. Germinal Cocho y Dr. Onofre Rojo). El trabajo transdisciplinario con bioingenieros del Instituto Nacional de Cardiología “Dr. Ignacio Chávez” y de la ESIME Culhuacan del Instituto Politécnico Nacional derivó en la obtención en 2002 del premio “Leon Bialik” a la Innovación Tecnológica, otorgado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el diseño de un equipo electrónico portátil para la medición de los cambios de la temperatura periférica humana como un marcador de la percepción de intensidad del dolor crónico en pacientes adultos.

Desde el enfoque lineal psicofisiológico, el estrés se ha establecido como un fenómeno de lucha o huida –aumentan la adrenalina, la frecuencia cardiaca, la presión arterial– lo cual puede prolongarse indefinidamente y transitar de una función defensora hacia la autoagresión. Históricamente, la reacción movilizadora más conocida del estrés (la conservamos y practicamos) ha sido muy útil para entender cómo escapar de amenazas mortales, como el ataque de leones, perros o ladrones, pero cuando se activa prolongadamente (incluso ante la ausencia de las amenazas reales), lleva al cuerpo hacia la enfermedad. Esto es especialmente perjudicial para los niños cuyo sistema nervioso es, por diseño evolutivo, maleable, casi plástico (Cacioppo & Cacioppo, 2012).

Hasta ahora la variabilidad de la frecuencia cardiaca (HRV en inglés) está sólidamente establecida como un marcador confiable de la regulación vagal cardiaca, en este sentido, presenta una relación inversa con los biomarcadores de los niveles de inflamación (Cooper, et al., 2015). Por ejemplo, se encontró en un estudio con 1601 hombres sanos que la HRV de baja frecuencia (LF-HRV) está asociada con un incremento de los niveles de proteína C reactiva (CRP) (Haarala, et al., 2011). Al estudiar a 682 pacientes después de una cateterización por infarto agudo de miocardio o angina inestable con niveles de troponin elevados, sus niveles de IL-6 presentaron una relación inversa con la variabilidad de la frecuencia cardiaca alta y con la de baja frecuencia (HF-HRV y LF-HRV) (Frasure-Smith, et al., 2009). Esta relación inversa entre la IL-6 y la HRV también se ha observado en pacientes con sepsis, diabetes tipo 1 y 2 (Stuckey & Petrella, 2013). Este tipo de resultados proveen evidencia sólida para respaldar la existencia de una vía vagal antiinflamatoria tanto en hombres como en mujeres y revisten importancia para documentar la importancia clínica del nervio vago (décimo par craneal) y el desarrollo de intervenciones terapéuticas no invasivas para la modulación del proceso inflamatorio. Porges (1992) propuso que el tono vagal derivado de la medición de la arritmia sinusual respiratoria (ASR)<sup>3</sup> podría utilizarse en la medicina clínica como un índice de vulnerabilidad al estrés, optimizando las mediciones descriptivas previas de la variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) utilizada en obstetricia y pediatría; además, destacó que la ASR tenía un origen neural y representaba la respuesta del flujo funcional tónico del vago al corazón. Por lo tanto, la ASR podría constituir un indicador más sensible del estado de salud que una medición más general de VFC, que sólo refleja mecanismos neurales indiferenciados y no neurales. Asimismo, Porges (1992) propuso un abordaje cuantitativo que aplicaba los análisis de series de tiempo para obtener la amplitud de la ASR como un indicador más exacto de la actividad vagal; suministrando datos que demostraban que los infantes maduros saludables tenían una ASR de una amplitud significativamente mayor que la que presentaban los infantes prematuros.

En México, en el contexto de trabajo e investigación durante el periodo 2000-2010, la actividad autonómica en general, y de la ASR en particular, las habíamos

<sup>3</sup> Que es cuando la inhalación aumenta la frecuencia cardiaca al tiempo que momentáneamente se suprime la influencia vagal, y durante la exhalación la frecuencia cardiaca disminuye al tiempo que se reanuda la influencia vagal.

establecido como “marcadores o índices” confiables, amigables, baratos y objetivos para estudiar el estrés. Las investigaciones internacionales habían producido una lista abundante de correlatos de la ASR, incluyendo un amplio rango de problemas físicos, mentales y de la salud. Entre los correlatos ASR-salud/emociones destacaban la ansiedad (Thayer, Friedman & Borkovec, 1996) y la depresión (Rottenberg, 2007).

La evidencia acumulada sugería que la ASR constituía un índice objetivo de la habilidad del sistema nervioso central para regular, a través del sistema nervioso autónomo, las respuestas emocionales y funcionar como un “marcador amigable” de las diferencias individuales en la capacidad de regulación emocional, por ejemplo, en las alteraciones del sueño y el dolor. Por lo tanto, transitamos hacia una reformulación conceptualizando la regulación emocional como “procesos integrados automáticos e intencionales que influyen en las emociones que experimenta una persona, cómo las tiene y cómo las expresa” (Gross, 1998), privilegiando la selección de la respuesta óptima y la inhibición de las respuestas menos funcionales de un amplio repertorio conductual. Esta noción se vinculó con la teoría polivagal (Porges, 2007) según la cual el nervio vago (décimo par craneal) tiene dos ramas con propósitos regulatorios distintos. Uno, el vago más “mielinizado” se origina en el núcleo ambiguo (ubicado en el tallo cerebral) y termina en estructuras asociadas con la emoción y la comunicación (por ejemplo, laringe y músculos faciales). El vago “inteligente” mielinizado juega un papel protagónico en las vías motoras relacionadas con la vocalización, expresiones faciales y para responder a las demandas ambientales. Funciona como un “freno vagal” activo que actúa sobre el sistema nervioso simpático inhibiendo rápidamente este sistema cuando es adaptativo producir respuestas de atención sostenida o involucramiento social y desinhibiendo este sistema cuando es adaptativo luchar o huir (Porges, 2007).

Este tipo de evidencia modificó gradualmente nuestros conceptos tradicionales sobre el estrés y su relación con la enfermedad hacia una perspectiva evolutiva no-lineal, asumiendo que los estados afectivos son el reflejo de las capacidades del cerebro presentes en todos los mamíferos, además los procesos neurodinámicos que subyacen a estas capacidades se pueden clarificar al considerar: a) mediciones conductuales (Mehl, et al., 2001), sin limitarse al uso del autorreporte, b) una comprensión de los substratos del cerebro que provienen de modelos animales, combinándolos juiciosamente con c) el estudio de las relaciones entre experiencias sociales afectivas y de los cambios fisiológicos en humanos (Porges, 2007).

#### ANÁLISIS NO LINEAL DE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA (VFC)

No obstante, y como se mencionó al principio de este capítulo, los modelos teóricos han estado limitados por el abordaje lineal y reduccionista dominante. Es por ello que el análisis lineal de la VFC (siendo parte de dicho análisis los métodos espectrales descritos con anterioridad), no son precisamente las técnicas más adecuadas para el estudio de señales no estacionarias, como es el caso de series de tiempo



de la VFC. Además, dado que las series de tiempo son finitas, presentan problemas técnicos para separar las componentes provenientes de ruido de las señales biológicas relevantes (Contreras, 2007).

El estudio de las irregularidades y la no estacionalidad en la variabilidad de los intervalos cardiacos ha llevado al desarrollo de nuevos métodos matemáticos, y ha sido todo un reto en el campo de la física aplicada a las ciencias biológicas y la ingeniería biomédica. En este contexto, algunos métodos de física estadística han permitido corroborar que la VFC presenta una complejidad o estructura (geometría fractal) que estadísticamente se repite a lo largo de diferentes escalas temporales (Goldberger, 1996; Glass, 2009).

El concepto de *fractal* fue descrito por primera vez en 1975 por Benoît Mandelbrot, y está asociado a formas que son capaces de fragmentarse y poseen irregularidad. El término forma parte de una concepción geométrica para describir y agrupar formas matemáticas o naturales que no son adecuadamente representadas por las estructuras regulares (Mandelbrot, 1989). De esta manera, dicho enfoque se ha utilizado para explorar formas o comportamientos naturales complejos, específicamente en donde se encuentre involucrada cierta aleatoriedad y donde el grado de irregularidad se repita estadísticamente a lo largo de diferentes escalas o ventanas de observación. De esta manera, y como respuesta de un sistema complejo, el ritmo cardiaco normal tiene características fractales, es decir, la estructura del ritmo es autosimilar al ser medida en distintas escalas temporales cuya manifestación se modela a través de una ley de potencia (Hu, et al., 2001).

Como consecuencia, se han desarrollado los llamados métodos fractales para analizar la VFC. Uno de estos métodos es el análisis de fluctuaciones sin tendencia (DFA, *detrended fluctuations analysis*) propuesto por Peng, et al., (1995), este método distingue entre las fluctuaciones complejas intrínsecas al sistema nervioso (involucradas en las acciones vitales del cuerpo humano) y las de origen medioambiental, que también influyen en el ritmo cardiaco. En un estudio realizado por Pikkujämsä, et al., (1999) se investigó la fractalidad de la VFC en niños, encontrando que es semejante a la de adultos jóvenes. Posteriormente Huikuri, et al., (2000) utilizaron el análisis fractal como una herramienta de pronóstico en pacientes con falla del ventrículo izquierdo después de un infarto agudo al miocardio. De forma interesante, al aplicar el DFA a las fluctuaciones cardiacas de personas jóvenes sanas, el análisis arrojó un exponente de escalamiento  $\alpha \approx 1$ , correspondiente a un comportamiento fractal, mientras que personas con alguna disfunción cardiaca presentaron  $\alpha \approx 0.5$ , indicando un proceso estocástico o aleatorio sin correlaciones en el largo plazo. Por lo tanto, la VFC involucra correlaciones a diferentes escalas de tiempo en condiciones normales; por el contrario, estas correlaciones se pierden bajo condiciones patológicas (Goldberger, et al., 2002).

Adicionalmente, se ha demostrado que la VFC es sensible a procesos de inflamación sistémica, por ejemplo, Godin, et al., (1996) demostraron que la endotoxemia inducida por lipopolisacárido (LPS) causa la disminución de la VFC y también provoca el incremento de la regularidad en las fluctuaciones cardiacas. Esta evidencia sugiere que la pérdida de complejidad es consistente con un modelo de

patogénesis por falla orgánica múltiple, en el cual existe un desacople fisiológico entre los sistemas de regulación. Asimismo, Reyes-Lagos, et al., (2016) experimentaron en ratas Dark Agouti machos aplicando una dosis intraperitoneal de LPS. Los investigadores observaron una pérdida del comportamiento fractal en las fluctuaciones cardíacas de ratas endotoxémicas, por lo que estos resultados sugieren que la endotoxemia sistémica podría provocar un desacoplamiento parcial del marcapasos del corazón y del sistema nervioso autónomo. En ese mismo estudio se encontró que la oxitocina redujo algunos síntomas de la conducta de enfermedad (*sickness behavior*) y aumentó la VFC; concluyeron que la oxitocina favorece a un acoplamiento autonómico cardíaco con influencias colinérgicas durante la endotoxemia. Así, estos hallazgos abren la puerta para dilucidar el uso de la oxitocina como un potencial agente antiinflamatorio.

Interesantes son algunos estudios involucrados en el área de ingeniería en fenómenos fisiológicos perinatales. Específicamente, se ha evaluado la VFC a través de métodos no lineales durante el trabajo de parto, un proceso fisiológico en donde la mujer podría manifestar ansiedad y dolor (Robson, et al., 1987). Los mecanismos responsables del inicio del parto siguen siendo desconocidos, sin embargo, algunos estudios apoyan la manifestación de un proceso inflamatorio como su detonante y la posible manifestación de una respuesta inflamatoria mediada por el sistema nervioso autónomo para restringir la inflamación (Reyes-Lagos, et al., 2014). En particular, se ha estudiado la VFC durante el trabajo de parto a término y de bajo riesgo con respecto a otro grupo en el tercer trimestre de embarazo (Reyes-Lagos, et al., 2015). Los resultados mostraron que los cambios dinámicos en la VFC materna, medidos a través de los parámetros fractales, podrían convertirse en características potenciales para identificar el comienzo fisiológico del parto. De esta manera, y con base en estos estudios, el análisis no lineal se está convirtiendo en una técnica ampliamente utilizada para explorar la estructura de la VFC.

#### CONCLUSIONES

Este conjunto de hallazgos configura rutas innovadoras para estudiar el estrés y sus relaciones con las cogniciones, las influencias sociales y las emociones, mejora nuestro entendimiento de cómo estos factores interactúan y contribuyen para lograr estados de salud o enfermedad y de cómo los profesionales de la psicología podemos contribuir a preservar la calidad de vida de personas afectadas por enfermedades no transmisibles en los PIBM. Sin embargo, nos preguntamos: ¿qué tan adecuadas han sido y son nuestras herramientas para este propósito? Pronto será necesario acercarnos a otros campos matemáticos o considerar otros paradigmas: ¿qué tipo de teorías necesitamos o debemos adaptar para guiar nuestras intervenciones en Latinoamérica? Mientras intentamos generar respuestas, es probable que pronto atestigüemos una revolución en el estudio de las interacciones mente-cuerpo con herramientas matemáticas y de los sistemas complejos (Bassett & Gazzaniga, 2011).

El “error de Descartes”, para tomar prestada la elegante expresión de Antonio Damasio, consistió en creer que la mente tiene una vida propia independiente del cuerpo; hoy una sociedad ilustrada ya no cree en el dualismo cartesiano, la división entre cuerpo y mente, pero los vestigios de la vieja concepción sólo se van perdiendo por etapas. Hoy día pocas personas instruidas, por limitadas que estén en neurobiología, dudan que el lenguaje, el movimiento, la percepción y la memoria residan de algún modo en el cerebro. Pero la ambición, el impulso, la previsión, la intuición —aquellos atributos que definen la esencia y personalidad de uno— son hasta hoy vistos por parte de muchos como “extra-craneales”, como si fueran atributos de nuestras ropas y no de nuestra biología. Estas evasivas cualidades humanas están también controladas por el cerebro, y, en especial, por los lóbulos frontales. La corteza prefrontal es el foco actual de la investigación neurocientífica, pero sigue siendo básicamente desconocida para los no-científicos.

Finalmente, la naturaleza y logros alcanzados en esta ruta de esfuerzos han reconfigurado objetivos, ubicándolos cada vez más dentro de la categoría de “investigación translacional”, entendida como la tarea sistemática de seleccionar, depurar, reclasificar, adaptar y, en su caso, analizar y aplicar aquellos hallazgos generados por la investigación básica en neurociencias, realizada principalmente en el extranjero (más del 85%) o nacionales que resulten susceptibles de ser aplicados en el campo clínico —por su potencial de beneficio humano— en problemas complejos de salud; como el estudio y tratamiento del estrés-dolor crónico, tanto en poblaciones adultas como pediátricas en México.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Apkarian, A.V., Baliki, M.N. & Geha, P.Y., 2009. Towards a theory of chronic pain. *Prog Neurobiol.*, 87(2), pp.81–97.
- Apkarian, A.V., Hashmi, J.A. & Baliki, M.N., 2011. Pain and the brain: Specificity and plasticity of the brain in clinical chronic pain. *Pain*, 152(3), S49–S64.
- Ayala, G.F. y Mexicano, M.G., 2010. *Efecto del dolor sobre el sueño*. México: Mente Abierta.
- Bassett, D.S. & Gazzaniga, M.S., 2011. Understanding complexity in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(5), pp.200–209.
- Bonanno, G.A. & Mancini, A.D., 2008. The human capacity to thrive in the face of extreme adversity. *Pediatrics*, 121(2), pp.369–375.
- Cacioppo, S. & Cacioppo, J.T., 2012. Decoding the invisible forces of social connections. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6(51), pp.1–7.
- Cilliers, P., 2013. Understanding complex systems. In: Sturmburg, J.P. & Martin, C.M. (eds.), *Handbook of Systems and Complexity in Health*. New York: Springer.
- Colotla, V. & Domínguez, B., 1975. Behavioral technique and penile erection. *Urology*, 5(2), pp.289–240.
- Contreras, J.G., 2007. La variación del ritmo cardiaco. *Cinvestav*, (enero-marzo), pp.24–27.
- Cooper, T.M., McKinley, P.S., Seeman, T.E., Choo, T., Lee, S. & Sloan, R.P., 2015. Heart rate variability predicts levels of inflammatory markers: Evidence for the vagal anti-inflammatory pathway. *Brain, Behavior, and Immunity*, 49, pp.94–100.

- Daniels, M.E., Donilon, T.E., & Bollyky, T.J., 2014. *The Emerging Global Health Crisis: Non-Communicable Diseases in Low- and Middle-Income Countries*. New York: Council on Foreign Relations.
- Domínguez, B. y Olvera, Y., 1977. El impacto humano de los ambientes excepcionales urbanos. En: Gío-Argáes, R., Hernández Ruiz, I., y Saínez-Hernández, E. (eds.), *Ecología urbana*. México: Conacyt/SGDSDDF/Sesic-SEP/UNAM/Secretaría de Desarrollo Urbano, Ecología/UAM.
- Domínguez, T.B., 1982. *Psicología ecológica. Análisis y modificación de la conducta humana en instituciones de custodia*. México: Dirección General de Publicaciones, UNAM.
- Domínguez, T.B., 1983. Repertorios de sobrevivencia psicológica. *Enseñanza e investigación en psicología*, 9(2), pp.255–265.
- Domínguez, T.B., 2009. The Socioemotional Mind. In: Rojas, M. (coord.), *Measuring the Progress of Societies. Reflections from Mexico*. México, D.F.: Foro Consultivo Científico y Tecnológico. pp.53–61. .
- Eisenberger, N.I., 2012. The pain of social disconnection: examining the shared neural underpinnings of physical and social pain. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(6), pp.421–434.
- Figuroa, C., Alcocer, L., Ramos, B., Hernández, T. y Gaona, B., 2010. Factores de riesgo psicosociales asociados a la insuficiencia cardiaca. *Revista Mexicana de Cardiología*, 21(2), pp.70–74.
- Fisher, E.B., Fitzgibbon, M.L., Glasgow, R.E., Haire-Joshu, D., Hayman, L.L., Kaplan, R.M., Nanney, M.S. & Okene, J.C., 2011. Behavior matters. *American Journal of Preventive Medicine*, 40(5), pp.e15–e30.
- Fordyce, W.E., Fowler, R.S.Jr., Lehmann, J.F., Delateur, B.J., Sand, P.L., & Trieschmann, R.B., 1973. Operant conditioning in the treatment of chronic pain. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 54(9), pp.399–408.
- Frasure-Smith, N., Lespérance, F., Irwin, M.R., Talajic, M. & Pollock, B.G., 2009. The relationships among heart rate variability, inflammatory markers and depression in coronary heart disease patients. *Brain Behav. Immun.*, 23 (8), pp.1140–1147.
- García-Larrea, L. & Peyron, R., 2013. Pain matrices and neuropathic pain matrices: A review. *Pain*, 154, Suppl. 1, pp.S29-S43.
- Glass, L., 2009. Introduction to controversial topics in nonlinear science: Is the normal heart rate chaotic? *Chaos*, 19(2). doi:10.1063/1.3156832.
- Godin, P.J., Fleisher, L.A., Eidsath, A., Vandivier, R.W., Preas, H.L., Banks, S.M., Buchman, T.G. & Suffredini, A.F., 1996. Experimental human endotoxemia increases cardiac regularity: results from a prospective, randomized, crossover trial. *Critical care medicine*, 24(7), pp.1117–1124.
- Goldberger, A. L., Amaral, L.A., Hausdorff, J.M., Ivanov, P.C., Peng, C.K. & Stanley, H.E., 2002. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *PNAS*, 99 Suppl. 1, pp.2466–2472.
- Goldberger, A.L., 1996. Non-linear dynamics for clinicians: Chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *Lancet*, 347, pp.1312–1314.
- Gross, J.J., 1998. The emerging field of emotion regulation: an integrative review. *Rev. Gen. Psychol.*, 2(3), pp.271–299.
- Haarala, A., Kähönen, M., Eklund, C., et al., 2011. Heart rate variability is independently associated with C-reactive protein but not with Serum amyloid A. The cardiovascular risk in Young Finns study. *Eur. J. Clin. Invest.* 41(9), pp.951–957.

- Hu, K., Ivanov, P. C., Chen, Z., Carpena, P. & Stanley, H.E., 2001. Effect of trends on detrended fluctuation analysis. *Phys Rev. E, Stat, Nonlin Soft Matter Phys*, 64(1 Pt 1), p.11114.
- Huikuri, H.V, Mäkikallio, T.H., Peng, C.K., Goldberger, A.L., Hintze, U. & Møller, M., 2000. Fractal correlation properties of R-R interval dynamics and mortality in patients with depressed left ventricular function after an acute myocardial infarction. *Circulation*, 101(1), pp. 47–53.
- Kuhn, T.S., 2005. *La estructura de las revoluciones científicas*. México: FCE.
- Levine, S., 2005. Stress: an historical perspective. In: Steckler, T., Kalin, N.H. & Reul, J.M.H.M. (Eds.), *Handbook of stress and the brain*. Amsterdam: Elsevier. pp.3–23.
- Lü, W., Wang, Z. & You, Y., 2016. Physiological responses to repeated stress in individuals with high and low trait resilience. *Biological Psychology*, 120, pp.46–52.
- Mandelbrot, B.B., 1989. Fractal geometry: What is it, and what does it do? *Proc. R. Soc. Lond. A*, 423, pp.3–16.
- Marmot, M., 2004. *The Status Syndrome: How Social Standing Affects Our Health and Longevity*. New York: Holt and Company.
- McEwen, B.S., Gray, J.D. & Nasca, C., 2015. Recognizing resilience: Learning from the effects of stress on the brain. *Neurobiology of Stress*, 1(1), pp.1–11.
- Mehl, M.R., Pennebaker, J.W., Crow, M., Dabbs, J. & Price, J., 2001. The Electronically Activated Recorder (EAR): A device for sampling naturalistic daily activities and conversations. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 33(4), pp.517–523.
- Mendieta, D., De la Cruz-Aguilera, D.L., Barrera-Villalpando, et al., 2016. IL-8 and IL-6 primarily mediate the inflammatory response in fibromyalgia patients. *Journal of Neuroimmunology*, 290, pp.22–25.
- Melzack, R. & Casey, K.L., 1968. Sensory, motivational, and central control determinants of pain: a new conceptual model. In: Kenshalo, D. (ed.), *The skin senses*. Springfield: Charles C. Thomas.
- Mitchell, M., 2009. *Complexity. A guided tour*. Oxford University Press.
- Mitchell, S.D., 2016. The paradigm shift in perspective. *Science*, 351(6280), p.1404.
- Muscattell, K.A., Moieni, M., Inagaki, T.K., et al., 2016. Exposure to an inflammatory challenge enhances neural sensitivity to negative and positive social feedback. *Brain, Behavior, and Immunity*, 57, pp.21–29.
- Nelson, E.E., Lau, J.Y. & Jarcho, J.M., 2014. Growing pains and pleasures: how emotional learning guides development. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(2), pp.99–108.
- Ogden, J., 2012. *Health Psychology: A Textbook*. 5th ed. Maidenhead, UK: Open University Press.
- Oldenburg, B., de Courten, M., & Frean, E., 2010. The contribution of health psychology to the advancement of global health. In: Suls, J.M., Davidson, K.W. & Kaplan, R.M. (eds.), *Handbook of health psychology and behavioral medicine*. New York: Guilford Press. pp.397–408.
- Peng, C.K., Havlin, S., Stanley, H.E. & Goldberger, A.L., 1995. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos*, 5(1), pp.82–87.
- Pikkujämsä, S.M., Mäkikallio, T.H., Sourander, L.B., et al., 1999. Cardiac interbeat interval dynamics from childhood to senescence: comparison of conventional and new measures based on fractals and chaos theory. *Circulation*, 100(4), pp.393–399.
- Piña López, J.A., Sánchez, C., García, I., Ybarra, J. y García, C., 2013. Psicología y salud en

- México: algunas reflexiones basadas en el sentido común y la experiencia. *Diversitas: Perspectivas en Psicología*, 9(2), pp.347–360.
- Porges, S.W., 1992. Vagal tone: a physiologic marker of stress vulnerability. *Pediatrics*, 90, pp.498–504.
- Porges, S.W., 2007. The polyvagal perspective. *Biological Psychology*, 74(2), pp.116–143.
- Reyes-Lagos, J.J., Echeverría-Arjonilla, J.C., Peña-Castillo, M., et al., 2015. A comparison of heart rate variability in women at the third trimester of pregnancy and during low-risk labour. *Physiology & Behavior*, 149, pp.255–261.
- Reyes-Lagos, J.J., Echeverría-Arjonilla, J.C., Peña-Castillo, M.Á., et al., 2014. Physiological, Immunological and Evolutionary Perspectives of Labor as an Inflammatory Process. *Advances in Neuroimmune Biology*, 5(2), pp. 75–89.
- Reyes-Lagos, J. J., Hadamitzky, M., Peña-Castillo, M.Á., et al., 2016. Exogenous oxytocin reduces signs of sickness behavior and modifies heart rate fluctuations of endotoxemic rats. *Physiology & Behavior*, 165, pp.223–230.
- Robson, S.C., Dunlop, W., Boys, R.J. & Hunter, S., 1987. Cardiac output during labour. *British Medical Journal (Clin Res Ed)*, 295(6607), pp.1169–1172.
- Rodríguez, G., 2010. Desarrollo de la medicina conductual en México. *Revista Latinoamericana de Medicina Conductual*, 1(1), pp.5–12.
- Rottenberg, J., 2007. Cardiac vagal control in depression: a critical analysis. *Biological Psychology*, 74(2), pp.200–211.
- Ruvalcaba, P.G. y Domínguez, T.B., 2010. Sobre la relación entre reacciones adaptativas y dolor crónico miofascial: La perspectiva polivagal. *Revista Latinoamericana de Medicina Conductual*, 1(1), pp.83–93
- Selye, H. 1973. The Evolution of the Stress Concept: The originator of the concept traces its development from the discovery in 1936 of the alarm reaction to modern therapeutic applications of syntoxic and catatoxic hormones. *American Scientist*, 61(6), pp.692–699.
- Shonkoff, J.P., Boyce, W.T. & McEwen, B., 2009. Neuroscience, Molecular Biology, and the Childhood Roots of Health Disparities. *JAMA*, 301(21), pp.2252–59.
- Sorrells, S.F, Caso, J.R, Munhoz, C.D. & Sapolsky, R.M., 2009. The Stressed CNS: When Glucocorticoids Aggravate Inflammation. *Neuron*, 64(15), pp.33–39.
- Steckler, T. (2005). The neuropsychology of stress. In: Steckler, T., Kalin, N.H. & Reul, J.M.H.M. (Eds.), *Handbook of stress and the brain*. Amsterdam: Elsevier. pp.25–42.
- Stuckey, M.I. & Petrella, R.J., 2013. Heart rate variability in type 2 diabetes mellitus. *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 41(2), pp.137–147.
- Sturmberg, J.P. & Martin, C.M., 2013. Complexity in Health: An introduction. In: Sturmberg, J.P. & Martin, C.M. (eds.), *Handbook of Systems and Complexity in Health*. New York: Springer. pp.1–17.
- Thayer, J.F., Friedman, B.H. & Borkovec, T.D., 1996. Autonomic characteristics of generalized anxiety disorder and worry. *Biological Psychiatry*, 39(4), pp.255–266.
- Tracey, I. & Mantyh, P.W., 2007. The cerebral signature for pain perception and its modulation. *Neuron*, 55(3), pp.377–391.
- West, B.J., 2013. Mathematical principles: Tales of tails. In: Sturmberg, J.P. & Martin, C.M. (eds.), *Handbook of Systems and Complexity in Health*. New York: Springer. pp.63–80.
- WHO (World Health Organization), 2014. *Global status report on noncommunicable diseases 2014*. Geneva: WHO.

## COMPLEXUS CORDIS: SALUD Y PATOLOGÍA CARDIOVASCULAR

*Hermes Ilarraza Lomelí, María Dolores Rius Suárez,  
Rafael Chávez Domínguez, Lilia Rodríguez,  
Aquiles C. Ilarraza Lomelí*

### INTRODUCCIÓN

EL corazón ha constituido siempre un órgano enigmático, estrechamente asociado con las emociones y la vida misma. En el siguiente texto estudiaremos la evolución del pensamiento humano sobre la existencia y trascendencia del sistema cardiovascular, iniciando por su historia y terminando con el límite del conocimiento.

### EL CORAZÓN A TRAVÉS DE LA HISTORIA

La medicina no escapa al “signo de los tiempos”, por ello a partir del conocimiento de estos, es posible concebir a los organismos vivos como los sistemas complejos por excelencia, lo que obliga a realizar una revisión epistémica de los principios que la rigen.

Javier Rosado (2006, p.7)

El cuerpo humano es una maravillosa estructura llena de elementos que interactúan constantemente, en la búsqueda de mantener su identidad a pesar de la acción de múltiples procesos que afectan este equilibrio. Históricamente, cuando el ser humano tomó conciencia de su existencia, comenzó su necesidad de explicar aquello que le rodeaba, incluyéndole a él mismo. Es a través de milenios y muchas civilizaciones que nuestra especie ha utilizado diversas formas de estudio, como son: el empirismo primitivo, el pensamiento mágico-religioso, la especulación, la analogía, el materialismo, la hermenéutica, la mayéutica, el determinismo (karma o escolástica), el naturalismo, el mecanicismo, el método científico, la evidencia estadística y, finalmente, las ciencias de la complejidad. Es prudente remarcar que en ocasiones, el ser humano ha permanecido aferrado durante largos periodos a diversos paradigmas, inmerso en un estado tautológico. Hoy día vivimos nuevamente una transición epistemológica, crisis cognoscitiva que, a la vez, nos muestra los límites de nuestra mejor herramienta y nos enseña el nuevo camino; sin duda oscuro, pero prometedor.

---

Instituto Nacional de Cardiología “Ignacio Chávez”.

## El corazón de la Antigüedad y la Edad Media

En la Edad de Piedra, particularmente durante el periodo Neolítico, el hombre primitivo consideraba a la enfermedad y la muerte como algo mágico, que tal vez las interpretó como el diseño de una entidad espiritual superior a él. Desconocemos de qué manera nuestros ancestros concebían el corazón, aunque sería muy factible que algún neandertal se hubiese reclinado sobre el pecho de otro y hubiera escuchado los latidos de su corazón.

En la Edad Antigua, los egipcios acostumbraban embalsamar los cuerpos de sus personajes importantes, en la búsqueda de mantenerlos incorruptos. Durante dicho proceso, disponían de las vísceras del difunto en cuatro vasos elaborados cuidadosamente en piedra, conocidos como *vasos canopos* (fig. 1). Cada vaso estaba relacionado a una deidad y dentro de aquel relacionado con *Amset* sería almacenado el hígado, los pulmones en



Figura 1: Vasos canopos. Fuente: [Wikimedia](#)

el de *Hapy*, el estómago en el vaso de *Duamutef* y, finalmente, los intestinos en el de *Qebehsenuf*. Es remarcable el hecho de que, durante la momificación, el corazón nunca era extraído del tórax (Historia y Arqueología, 2015).

El papiro Edwin Smith es probablemente el documento médico más antiguo que ha sido encontrado, perteneciente a la dinastía XVIII de Egipto (c. 1580 a.C.); en el que se describen diversos tipos de tratamientos y se hace referencia a la anatomía cardíaca y de otros órganos (fig. 2).

Es con los persas y los griegos cuando el ser humano comenzó a estudiar de una manera sistemática e íntima a su prójimo, mediante la *dissección corporal*. Los primeros anatomistas se percataron de que, en algunos cadáveres, se observaba un incremento importante del tamaño del corazón y a esta congestión cardíaca le llamaron *infarto* (lat. *infarcio*, 'rellenar'). En esa época también se practicaron disecciones en animales vivos y los fenómenos ahí observados fueron extrapolados por analogía al ser humano. Algunos historiadores atribuyen a Aristóteles el primer concepto de *corazón como bomba*, junto con el de *circulación sanguínea*.

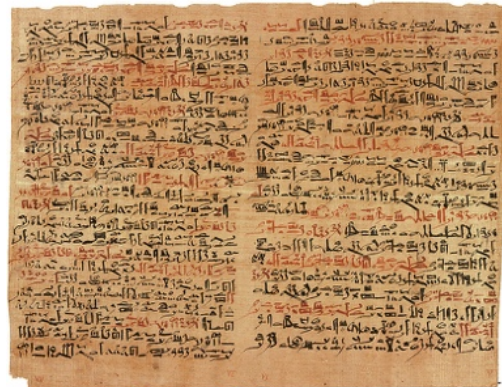


Figura 2: Papiro Edwin Smith.

A través de estas primeras y rudimentarias disecciones, los médicos-fisiólo-



gos de la época darían explicación, con una base claramente aristotélica de causalidad, a las funciones corporales y sus alteraciones. Un ejemplo es el flujo de la sangre, que entonces se pensaba era formada por el hígado y posteriormente cambiaba de forma gracias a la acción de los diversos órganos del cuerpo. Galeno hablaba de diversos tipos de *pneuma* (soplo, *spiritus*), entre los cuales destacaba el que iba del hígado a las venas y de ahí al resto del cuerpo (*pneuma natural*); otro que iría del corazón a las arterias (*pneuma vital*) y uno más haría lo propio desde el cerebro hasta los nervios (*pneuma animal*). En esa época se consideraba que la sangre transitaba directamente del corazón derecho al izquierdo a través de pequeñas comunicaciones entre ellos, para mezclarse posteriormente con el aire proveniente de la *traquearteria*. Finalmente, esta sangre *pneumatizada* corría a través de las arterias para llegar al cerebro, lugar desde el cual pasaba a los nervios para llevar a cabo la vida de relación. Así, la *sustancia* sufría una serie de transformaciones: de *alimento* en *quilo* (estómago), de quilo en *sangre venosa* (hígado), de sangre venosa en *sustancia propia* de cada órgano que la recibía y finalmente en *pneuma animal* (cerebro) (Fresquet, 2011).

Por un lado, es fácil notar que estas observaciones e ideas constituyen una intrincada *red de estructuras y procesos* que interactúan de una manera natural (*physis*). Por otro lado, llama la atención que el pragmático paradigma de *causa-consecuencia*, otorga a este modelo fisiológico una simpleza cautivadora, que se basaba sin saberlo aún, en el concepto de *linealidad*.

Al disertar sobre la enfermedad, Claudio Galeno de Pérgamo decía que los síntomas (*symptoma*, coincidencia) eran aquellas señales manifiestas en el paciente que permitían al médico conocer la patología (*páthos*); que era, a su vez, una disposición alterada del cuerpo (*diathesis*). Al asociar los síntomas con la exploración física y las alteraciones anatómicas del enfermo se sentaron las bases de la *clínica*. En la Grecia clásica se pensaba que los estados morbosos estaban determinados por tres tipos de causas: externas, internas o inmediatas. Posteriormente, se clasificó deductivamente a las enfermedades en cuatro tipos: alteración o corrupción de la mezcla, llamadas enfermedades humorales; patologías asociadas a la perturbación de las cualidades de las partes similares y a la tensión o relajación de sus meatos; el resultado de daños estructurales de los órganos; y, finalmente, las causadas por soluciones de continuidad en todo el cuerpo. Galeno describe con gran detalle, en el primero de sus documentos del cuerpo doctrinal, la importancia de la *semiología del pulso* (Sabán, 2012; Pino, 2004).

Tiempo después, la evolución del pensamiento racional del *mundo occidental* se vio embrutecida durante casi mil años por el *oscurantismo determinista*, cuando se creía que todo estaba escrito y predestinado. Muchas de las prácticas médicas se convirtieron en tabú e incluso pecado, mientras la enfermedad permanecía bajo las ropas y sábanas. Sin embargo, en Oriente, personajes como *Ibn Sina* (Avicena, s. VIII d.C.), consideraban que el corazón derecho estaba lleno de sangre, mientras que el izquierdo de espíritu, e intuían por primera vez, la presencia de una *circulación pulmonar*, fenómeno que posteriormente sería descrito en detalle por Michel de Servet en el siglo XVI.

## El corazón y el Renacimiento

Es durante el Renacimiento (siglos XV y XVI) cuando el ser humano vuelve a ser un protagonista, principalmente en las artes y en la novedosa ciencia. Ahí se dieron las más detalladas y artísticas descripciones anatómicas del corazón y sus vasos sanguíneos, bosquejos que formarían parte de esa perfecta máquina humana, soñada y descrita por Andreas Vesalius (1543) en *De humani corporis fabrica* (fig. 3). Ese renacer de la cultura helénica promovió la recuperación de la clínica y el análisis deductivo en el estudio de la salud y la enfermedad.



**Figura 3:** Andreas Vesalius, *De humani corporis fabrica* (1543).

## El método científico estudia al corazón

En la época post-renacentista la curiosidad humana se vuelve más racional y se apoya en conocimientos estructurados sistemáticamente, lo que conoceremos después como *ciencia*. Fueron personajes como Leonardo da Vinci, Descartes, Galileo, y naturalmente Leibniz y Newton, entre otros, quienes dieron gran parte de la forma a este nuevo método para el desarrollo del conocimiento.

Mediante el proceso de *análisis*, el estudioso segmenta cada fenómeno en los elementos que lo conforman, reduciéndolo a su mínima expresión en un proceso *reduccionista*, para poder entenderlo con mayor facilidad; posteriormente solamente tendrá que unir nuevamente esas piezas. Así, el corazón fue estudiado también de esa manera que lo divide en diferentes segmentos anatómicos para su estudio. Hoy día existen congresos enteramente destinados al estudio de un elemento tan pequeño como la orejuela del atrio izquierdo (Left Atrial Appendage Congress, Frankfurt).

René Descartes o *Renatus Cartesius*, considerado como el creador de la fisiología mecanicista de la medicina (*iatromecánica*) y de la geometría analítica, introdujo uno de los principales conceptos útiles para el científico: la *linealidad*. Así, con el uso de la geometría, era posible predecir el comportamiento de todo fenómeno en el futuro, para lo cual solamente se requería graficar las observaciones realizadas y obtener la ecuación de la línea que las representa. Con esta ecuación, el investigador puede *extender su conocimiento* más allá de los datos observados, es decir: le permite *inferir* o predecir lo que pasaría con la información en una situación diferente, asumiendo que el fenómeno tiene un *comportamiento lineal*. Este método fue inmediatamente puesto en práctica para el estudio de la fisiología y patología cardiovasculares. Esta estrategia le permite al médico realizar predicciones a largo plazo sobre diversos desenlaces, como la aparición de ciertas enfermedades o la mortalidad; en este momento aparece el concepto de *población en riesgo*.

El mismo Descartes, desde una *fisiología mecanicista*, pensaba que la sangre circulaba en el organismo y distribuía los nutrientes necesarios para subsistir. Fue posteriormente el médico sir William Harvey, contemporáneo de Descartes, quien basado en la fisiología (vivisecciones), la anatomía y la embriología, describió lógica y secuencialmente la manera en que la bomba cardiaca impulsaba la sangre a través de todo el cuerpo (Harvey, 1928).

## Nacimiento de la homeostasis

La fisiología de los seres vivos ha sido tradicionalmente explicada como una tendencia a procurar un estado de equilibrio o *estado estable*. Este modelo fue inicialmente propuesto en 1865 por Claude Bernard, como el mantenimiento casi constante de un medio interno o "*milleu interieur*", a pesar de diversos cambios en las condiciones ambientales. Este concepto sería popularizado posteriormente por Walter B. Cannon (1932) como *homeostasis*. Se considera que este *estado estable* se mantendrá así, hasta el momento en que la acción de un estímulo le haga cambiar (Davies, 2016). Sin embargo, los seres vivos pueden comportarse de manera

más compleja, incluso en sus componentes elementales: las células. En la actualidad se considera que los organismos pueden tener cinco tipos de comportamiento fisiológico: equilibrio (estado estable), periodicidad, cuasi-periodicidad, caos y comportamiento aleatorio (Sharma, 2009).

La ciencia, desde hace más de trescientos años, ha contribuido al desarrollo de numerosos avances tecnológicos, tanto en el campo de la física como en el de la química y la biología. Así, el estudio de los procesos fisiológicos y patológicos de un organismo abarcan el comportamiento de las funciones moleculares-bioquímicas, celulares, tisulares, orgánicas y sistémicas. El médico puede ahora explicar los diferentes estados de salud o enfermedad desde una perspectiva *fisiopatológica*, al establecer una asociación causa-consecuencia.

En la actualidad, y gracias a la introducción del concepto de *probabilidad*, la ciencia admite que puede equivocarse en algo, lo que llamamos azar. Particularmente el estudio de la cardiología ha encontrado en la bioestadística un instrumento útil. La llamada *medicina basada en la evidencia* reconoce que los principios clínicos y epidemiológicos no pueden sustentarse en la descripción de un solo caso, debido que estos fenómenos tienen una gran variabilidad. Hoy en día se utilizan grandes muestras poblacionales para construir diversos tipos de modelos matemáticos predictivos: asociación bivARIABLE y multivariable, regresión lineal y logística, modelos actuariales, etc. Es ahora relevante la identificación y cuantificación del azar en dichas predicciones. Es muy frecuente ver al cardiólogo utilizando alguna herramienta de cálculo de riesgo, ya sea para conocer la probabilidad de que un paciente pueda presentar un infarto del miocardio o para la valoración de un enfermo que será sometido a una cirugía no cardiovascular. La mayor parte de las decisiones médicas se toman con base en estas poderosas herramientas estadísticas.

Al presente, la ciencia goza de una gran reputación, en parte gracias a que su método se pone constantemente a prueba mediante un proceso de *refutación y comprobación*. Es indudable que, mediante la ciencia, el ser humano ha podido resolver innumerables problemas y desarrollar grandes avances tecnológicos que le han permitido vivir más y mejor. Ahora, este proceso de *auditoría* ha detectado que el método científico convencional no siempre nos muestra la verdad, sino una imagen virtual de la naturaleza y en ocasiones la información obtenida es incluso una falacia.

### Los sistemas abiertos, no lineales y complejos

La estructura y función del sistema cardiovascular han sido estudiadas en los últimos siglos desde una perspectiva lineal, reduccionista y cerrada; con el fin de integrarlas en forma de ecuaciones matemáticas para poder predecir su comportamiento. Sin embargo, desde hace poco más de un siglo, los estudiosos del tema han observado que la explicación a un sinnúmero de fenómenos escapa a esta metodología; las predicciones científicas no parecen ser tan precisas ni certeras, por lo que están ahora en tela de juicio.

Al respecto, podemos decir que el *método científico* suele estudiar particularmente el *estado estable o de equilibrio* de la materia, mediante el uso de sistemas de

registro de señales y de la matemática convencional. El científico, quien se encuentra supuestamente fuera del sistema que está estudiando, trata de enmarcar sus observaciones por *fenómenos periódicos* con patrones cíclicos y predecibles, los que en ocasiones incluyen series de cientos o miles de datos. Sin embargo, esta capacidad predictiva parece ser más débil de lo que se piensa; por ejemplo, sin importar cuántos latidos se hubieran estudiado, es prácticamente imposible saber con exactitud en qué momento tendrá lugar la siguiente contracción cardiaca. Incluso, se ha observado en más de una ocasión que esta periodicidad no es tan fácil de caracterizar, ya que puede incluir uno o más tipos de frecuencias simultáneas, que al dividirse entre sí no resultan en un número racional, es decir tienen un comportamiento *cuasi-periódico*. Más allá de esto, algunos fenómenos exhiben una dinámica conocida como *caótica*, sin un patrón cíclico reconocible y con una gran libertad para adaptarse a diversas circunstancias; una capacidad que puede mantener gracias a encontrarse contenida en lo que se conoce como *condiciones de frontera*. Las primeras descripciones de esta *dinámica caótica* se dieron gracias a la aparición de las computadoras que pueden analizar millones de datos con sus nuevas y potentes herramientas. Es prudente señalar que, la utilización del término *caos* ha sido históricamente desafortunada, ya que con frecuencia se le confunde con *azar* o *ruido*, los cuales, a diferencia del primero, constituyen una pérdida completa del orden de la información. Matemáticamente, el caos puede darse en un sistema cuyo comportamiento sea tan complejo que pareciera un completo desorden, sin serlo realmente. Será a través de las nuevas *matemáticas complejas* que podremos, en un futuro, identificar novedosos patrones de datos, otrora encriptados como un fenómeno aparentemente aleatorio.

Es importante identificar el tipo de comportamiento de un fenómeno para poder elegir la estrategia idónea para su estudio y, en general, se puede decir que los fenómenos en estado estable, periódicos o cuasi-periódicos, pueden ser abordados desde un enfoque reduccionista; pero esta aproximación no es adecuada para el estudio del *comportamiento complejo*. El abordaje de esta *complejidad* constituye la frontera actual del conocimiento y exige un replanteamiento conceptual y una reingeniería global de su método; desde los instrumentos de medición y análisis hasta el desarrollo *ex profeso* de esa matemática especializada.

Al hablar de *dinámica*, diremos que es una rama de la física que estudia el movimiento de los cuerpos en el espacio, bajo la acción de un sistema de fuerzas; mientras que llamamos *dinámica en la biología* al abordaje del comportamiento de los seres vivos y cómo éste es controlado (Sharma, 2009). Se suele decir que un sistema es *dinámico* cuando es determinista, es decir predecible, ya que obedece al principio de causalidad. Este segundo impuesto deriva de la tercera meditación de Descartes: "las ideas necesitan una causa formal y una causa real, mismas que deben tener las características necesarias para producir un determinado efecto, en este caso: *la idea*" (Descartes, 1977 [1641]). Bajo tales preceptos, el azar claramente no es un sistema dinámico.

Ahora, los sistemas dinámicos pueden ser lineales o no. La *dinámica lineal* puede ser estudiada desde un enfoque reduccionista con una alta capacidad predictiva,

donde la suma del comportamiento de los elementos que lo componen condiciona el desempeño total del fenómeno y la presencia de pequeños cambios en los agentes causales condiciona solamente un efecto pequeño a nivel general. Sin embargo, en la *dinámica no lineal* sucede algo diferente, ya que el efecto global del sistema no depende solamente de las propiedades sumatorias de sus elementos constituyentes, sino de las complejas interacciones existentes entre ellos; esto promueve la aparición inesperada de diversas situaciones o hechos que se conocen como *propiedades emergentes*, haciendo que *el todo sea algo más que la suma de sus partes*, como el sistema cardiovascular es mucho más que la suma del corazón y la red vascular. Este tipo de comportamiento es difícil de explicar desde un abordaje reduccionista y, si se insiste en utilizarlo, se podría incurrir en esa falacia. Este tipo de dinámica suele asociarse con la aparición de eventos repentinos, discontinuos y casi siempre imprevistos, como una erupción volcánica, un terremoto o un infarto del miocardio. El tipo de dinámica no lineal más común en los seres vivos es el caótico, que además es *sensible a las condiciones iniciales del sistema*; es decir, cuando la presencia de pequeñas variaciones en el origen pueden ser iterativamente amplificadas de manera exponencial y modificar espectacularmente el efecto final. Naturalmente, este tipo de comportamiento no puede ser predicho con precisión a mediano o largo plazo.

El latido cardiaco es un *oscilador*, es decir, un sistema que pasa por un estado inicial o *evento marcador* para posteriormente recorrer una serie de momentos o estados y finalmente regresar a ese origen (Ruelas y Mansilla, 2006). La manera en que se comporta este oscilador puede variar desde la periodicidad hasta el ruido y viceversa, lo que puede asociarse a estados de salud o de enfermedad.

Al avanzar en el estudio del aparato cardiovascular como un sistema complejo, abierto y no lineal, nos iremos familiarizando con nuevos conceptos, términos, métodos y herramientas como: espectro de potencia, espacio fase, mapa de recurrencia, mapa de Poincaré, exponente de Lyapunov, mapa de Hénon y entropía, entre otros. El concepto de estabilidad de un sistema cobra un nuevo sentido, desde el inherente al sistema solar hasta la propia del modelo atómico. No es raro escuchar a un cardiólogo decir que un paciente con un infarto del miocardio “se encuentra estable, pero podría suceder cualquier cosa, en cualquier momento”.

El corazón y los vasos sanguíneos constituyen un sistema y un subsistema, a la vez, siendo un conjunto de elementos que interactúan entre sí y mantienen su identidad más allá del equilibrio. La teoría de los sistemas dinámicos cuantifica sus estados y evolución. La dinámica de un sistema está regulada en parte por las condiciones de frontera que la contienen, aunque existen alteraciones puntuales dentro del sistema (fluctuaciones) o fuera de él (perturbaciones) que pueden generar cambios incluso desastrosos para su integridad. La llamada *teoría ergódica* puede ayudarnos en el estudio del comportamiento promedio de un sistema dinámico, integrando modalidades de estudio como los teoremas de convergencia, propiedades de recurrencia y la teoría de la entropía (Gutiérrez, 1992). La llamada *teoría clásica de las perturbaciones* puede aplicarse para inducir minúsculos alejamientos en la dinámica de un sistema con el fin de estudiar su estabilidad.

La *entropía* es otro concepto que se escucha frecuentemente al hablar de complejidad. Desde el punto de vista físico, la entropía es una magnitud que mide, de alguna manera, el grado de organización de un sistema donde a mayor azar, mayor entropía. Esta es una función de estado, de carácter extensivo que crece de manera espontánea, describiendo la *irreversibilidad termodinámica del sistema*. Este concepto de transformaciones “disipativas” también puede extenderse a otros dominios, como sería el manejo de la información. El sistema cardiovascular es termodinámicamente disipativo, que maneja una gran cantidad de información, aunque en general presenta una dinámica con baja entropía. La dinámica cardíaca estudiada mediante las *proporciones de entropía*, puede ayudar al médico a identificar diversos tipos de enfermedades, particularmente al evaluar fenómenos de *auto-organización*, característica de los fenómenos complejos y que reviste importancia en la regulación del sistema cardiovascular; desde la activación eléctrica del corazón hasta el control de la tensión arterial (Rodríguez, 2010).

El profesor Edgar Morin, filósofo y sociólogo, ha postulado la necesidad de adoptar un nuevo enfoque que pueda complementar, y en ocasiones sustituir, a la ciencia tradicional de tipo reduccionista, por un abordaje transdisciplinar donde las variables representen un verdadero *tejido* de interacciones. Así, él acuña el término *complejidad* (del latín *complexus, complecti*) que a la vez significa entrelazar y abarcar (RAE, 2017a; Morin, 1996). En los siguientes apartados iremos viendo los principales aspectos del estudio del sistema cardiovascular desde varios enfoques, incluyendo la complejidad (Nandiwada & Dang-Vu, 2010; Carrizo, Espina-Prieto y Klein, 2004).

La lógica de la termodinámica de los procesos irreversibles es capaz de dar cuenta del concepto fisiológico de *homeostasis* (*ὁμοιος*, similar; *ἵσθημι*, inmóvil), ya sea en la forma de *equilibrio* o de *no equilibrio* de la economía del cuerpo humano, en la forma de una complejísima *estructura disipativa*. Es precisamente la tendencia natural a alcanzar el estado de equilibrio, es decir, de entropía máxima (teorema H de Boltzmann), la que entra en oposición dialéctica con esa otra tendencia de intercambiar el mínimo de entropía con el medio circundante, al encontrarse el sistema fuera del estado de equilibrio (teorema de Prigogine). (De Pomposo, 2015, p.5)

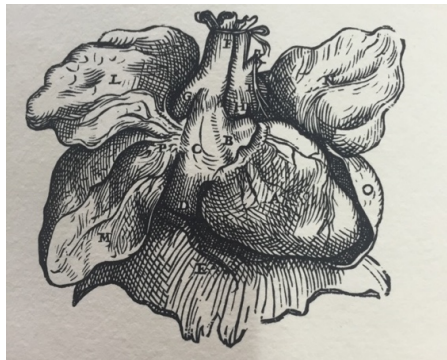
Más adelante retomaremos algunos conceptos sobre la complejidad y cómo se pueden aplicar al estudio del sistema cardiovascular.

‘DE HUMANI CORPORIS FABRICA’ A LA FRACTALIDAD:  
LA FORMA DEL CORAZÓN Y SUS VASOS

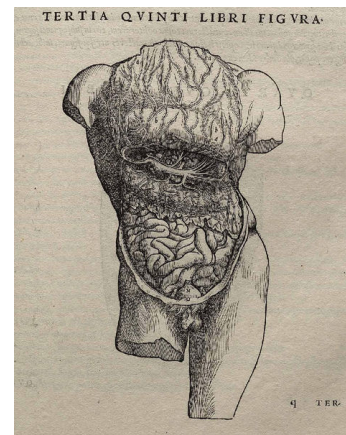
[La estructura de los órganos, a nivel micro y macroscópico,] son el “mapa” de los patrones de organización que se dan en los sistemas termodinámicamente abiertos [...] intercambiando materia y energía con su entorno, todo con el solo fin de permanecer en la estabilidad transitoria que llamamos *existencia*.

Alexandre de Pomposo (2015, p.4)

En su invaluable obra *De humani corporis fabrica*, Andreas Vesalius nos introduce a una manera de estudiar al organismo que ha subsistido hasta nuestros días, mediante su desarticulación en grandes sistemas corporales, después en los órganos y los tejidos que los conforman; esta estrategia nos permite llegar a las células, sus organelos, moléculas y átomos (fig. 4) (Vesalius, 1543). Una vez que el estudiante del tema ha desarmado todo el sistema, lo analiza parte a parte, tanto en su arquitectura como en su función, en espera de poder comprenderlo totalmente al simplemente sumar sus componentes. Por desgracia, aunque en teoría esta estrategia suene cómodamente lógica, en realidad no es tan eficaz. Si en lugar de fragmentar el sistema, este se mantuviera incólume, se podrían apreciar un sinnúmero de interacciones que entrelazan sus componentes y conforman por ende su estructura, como un fino y denso tejido, la *complejidad* según Morin (Ibarra, 2015). En este apartado analizaremos la anatomía y parte de la función del sistema cardiovascular desde la perspectiva compleja.



(a) En esta imagen se observan el corazón y los pulmones.



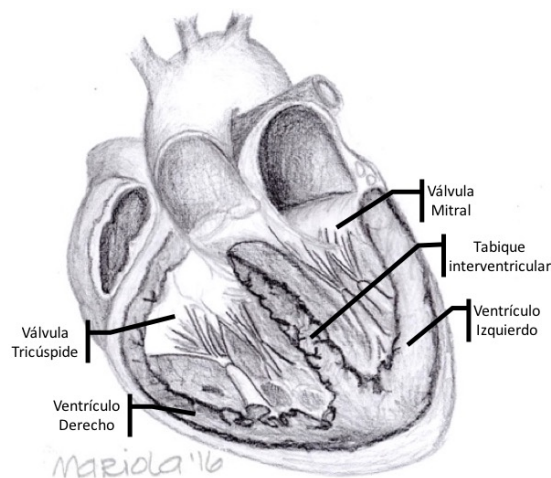
(b) En esta imagen se observan los vasos sanguíneos del epiplón.

**Figura 4:** Cortesía de la biblioteca “Alfredo de Micheli” del Instituto Nacional de Cardiología “Ignacio Chávez”, Ciudad de México.



## Generalidades anatómicas

El corazón es un órgano de forma cónica que se localiza asimétricamente en el mediastino medio con sus dos terceras partes y su vértice dirigido habitualmente hacia la izquierda. Se encuentra apoyado sobre el diafragma, y se relaciona por adelante con el esternón y por detrás el esófago, la aorta y la columna vertebral; en el plano sagital, se proyecta entre el segundo y el quinto espacios intercostales. El corazón es un órgano cavitado conformado esencialmente por músculo y tejido conectivo. Funcionalmente, se puede decir que al sistema cardiovascular lo constituyen dos bombas hidrodinámicas conectadas en serie: el *corazón derecho* (atrio y ventrículo derechos) conectados hacia atrás con la circulación venosa sistémica y hacia delante con la circulación arterial pulmonar; y el *corazón izquierdo* (atrio y ventrículo izquierdos) conectados hacia atrás con la circulación venosa pulmonar y hacia delante con la circulación arterial sistémica (fig. 5).



**Figura 5:** Corte longitudinal del corazón. Cortesía de María Dolores Rius Suárez.

En relación con la conformación de las paredes del corazón, podemos decir que su capa más interna (*endocardio*) reviste a las cavidades y está íntimamente adherida a la siguiente capa constituida por el músculo cardíaco (*miocardio*). El miocardio suele dividirse, con fines electrocardiográficos, en dos porciones: subendocardio y subepicardio. En la cara externa del miocardio encontramos una tercera capa de tejido conectivo conocida como *epicardio*. Finalmente, el corazón se encuentra contenido en una bolsa que se conoce como *pericardio*, el cual tiene dos hojas: una interna, en estrecho contacto con la superficie cardíaca (pericardio visceral) y otra externa, que está fija a los grandes vasos que salen del corazón (pericardio parietal) (Guadalajara, 2003; Hall, 2011).

El corazón posee una base y un vértice, también llamado ápex. La base está situada hacia atrás y se compone fundamentalmente por ambas aurículas o atrios,

frente a las 6a. a 9a. vértebras torácicas. En la porción más cefálica de la base se encuentran los grandes vasos arteriales: la aorta y la arteria pulmonar. El ápex es romo y está formado prácticamente por el ventrículo izquierdo (VI) (Moore, 1993).

Las paredes del corazón dan estructura a cuatro cavidades: dos aurículas y dos ventrículos. La *bomba cardíaca* está formada inicialmente por el miocardio que, al contraerse, aumenta la presión dentro de las cavidades y provoca que la sangre salga de ellas; en el corazón existen también cuatro estructuras valvulares, que dirigen el sentido del flujo sanguíneo: la válvula mitral, la válvula tricúspide, la válvula aórtica y la válvula pulmonar. Las válvulas ventrículo-arteriales (aórtica y pulmonar) se conocen como sigmoideas y forman parte del esqueleto fibroso del corazón. Las otras dos válvulas (atrio-ventriculares) tienen más elementos y poseen tanto tejido fibroso como muscular, en la región conocida como *aparato subvalvular*.

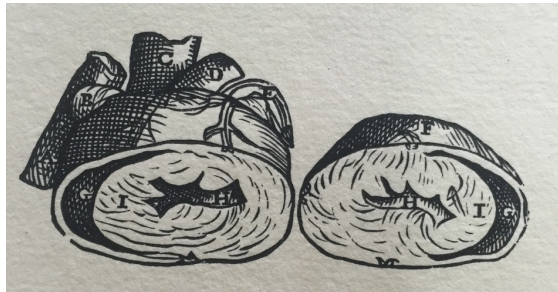
Habitualmente se han estudiado los fenómenos naturales como sistemas en equilibrio y cerrados, donde la interacción con el entorno pareciera ser nula (Rius, 2015). El corazón y sus vasos conforman una estructura que nos muestra un sistema abierto con una íntima interacción con todo el organismo. El estudio del corazón tradicionalmente se ha limitado a su función de bombeo, sin embargo, el hecho de interactuar estrechamente todos los órganos de la economía, requiere de la  *fina modulación* por parte de diversas estructuras, sistémicas y locales, tanto en el *medio interno* como con el ambiente; este hecho determina, en mucho, su anatomía. La interacción de las unidades estructurales y los procesos de regulación entre el sistema cardiovascular y el resto del organismo es esencialmente *compleja*, lo cual le permite una versátil capacidad adaptativa en respuesta a las exigentes demandas de su entorno.

Hablando de las estructuras que conforman el sistema cardiovascular, “cuanto más distinguible sea un subsistema de otro, mayor será la variedad de posibles relaciones entre ellos, más complejo será el sistema en su totalidad y mayor será su capacidad de auto-organización” (De Pomposo, 2015, p.2). Así, las particularidades de cada estructura les confiere una función especializada, misma que se integra con el resto del cuerpo.

Las aurículas son cavidades contenidas por una pared delgada que actúan como una antesala a la cámara ventricular, funcionando como reservorio y también como una pequeña bomba. Son cámaras que manejan baja presión y el vaciamiento hacia los ventrículos encuentra una mínima resistencia a través de las válvulas atrioventriculares abiertas. Las paredes de la aurícula derecha (AD) se caracterizan por tener numerosas salientes musculares conocidas como *columnas carnosas* que le dan un aspecto rugoso; y a través de estas paredes desembocan ambas venas cavas (superior e inferior). En su porción anterior o ventral se encuentra la orejuela derecha, de forma triangular. En el piso de la aurícula se encuentra la válvula tricúspide. Llama mucho la atención que las paredes de la aurícula izquierda (AI) son muy diferentes, siendo prácticamente lisas, donde recibe a las cuatro venas pulmonares, y posee una orejuela que es más larga y estrecha, con un aspecto *vermiforme*. La comunicación con el VI es a través de la válvula mitral. Ambas aurícu-

las se encuentran separadas por un tabique músculo-fibroso (septum interauricular), el cual es producto de varios procesos de proliferación y reabsorción celular durante la vida intrauterina. El corazón posee dos cámaras que manejan una alta presión sanguínea, conocidas como *ventrículos*, que se encuentran separados por un tabique (septum interventricular). Los ventrículos son cavidades más grandes y sus paredes son significativamente más gruesas que las auriculares. El ventrículo derecho (VD) tiene forma de media luna y aunque tradicionalmente se le sitúa a la derecha del VI, en realidad lo *envuelve* (vide infra) (Torrent-Guasp, 1998). En la pared del VD se observa una banda muscular (banda moderadora) que dirige el flujo de la sangre, conformando *virtualmente* dos compartimentos funcionales: una cámara de entrada y otra de salida. Las paredes del VD dan forma a diversas estructuras como las columnas carnosas, tres músculos papilares del aparato subvalvular, la banda moderadora, la válvula tricúspide y el infundíbulo pulmonar o tracto de salida (Bouzas, 2009). El VD impulsa la sangre a través de su válvula semilunar (pulmonar) hacia los pulmones, donde se intercambiarán los gases en un proceso denominado *hematosis*, dentro de la intrincada y fina red alveolo-capilar. El llamado *corazón derecho* opera como un sistema de baja presión y alto volumen. La función del corazón derecho y la circulación pulmonar necesita acoplarse con las estructuras vecinas, cuya función le impone diversas situaciones de exigencia como son las variaciones de la presión intrapleural y los cambios de posición, entre otros (Bouzas, 2009; Greyson, 2010).

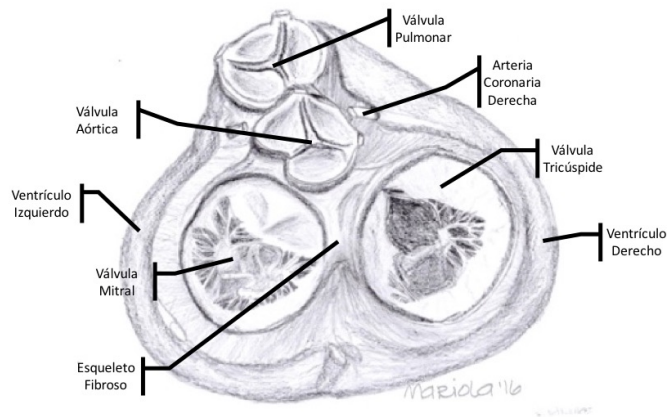
Las paredes del VI son tres veces más gruesas que las del VD y su forma es cónica, el septum es liso en sus dos tercios superiores y las demás paredes tienen trabéculas carnosas pequeñas y no entrelazadas (fig. 6). Este ventrículo carece de una crista supraventricular, y posee dos músculos papilares, uno antero-lateral y otro postero-medial que contienen el desplazamiento de las valvas de la válvula mitral hacia la aurícula durante la poderosa contracción ventricular.



**Figura 6:** Sección transversal del corazón a nivel de ambos ventrículos. Se aprecia cómo el grosor del ventrículo izquierdo es mucho mayor que el del derecho. Cortesía de la biblioteca "Alfredo de Micheli" del Instituto Nacional de Cardiología "Ignacio Chávez", CDMX.

La bomba cardíaca requiere de cuatro *válvulas*, estructuras que permiten el flujo unidireccional de la sangre, cuyos anillos conforman el *esqueleto fibroso* del corazón (fig. 7). Las válvulas atrioventriculares tienen un anillo donde se fija uno de los

bordes de las valvas que las conforman, siendo dos para la mitral y tres para la tricúspide. El *borde libre* de las valvas se desplaza como resultado de los cambios de presión entre la aurícula y el ventrículo. La disminución de la presión intraventricular y la contracción atrial en la diástole ventricular, generan un *gradiente de presión*, que desplaza las valvas hacia el ventrículo, las válvulas se abren y la sangre fluye a través de ellas. Durante la contracción de los ventrículos (sístole), sube la presión interna y se desplazan las valvas hacia la aurícula, movimiento limitado por la acción de los músculos papilares insertos en las valvas, lo que evita su prolapso y la consecuente inversión del sentido del flujo sanguíneo (regurgitación). En contraparte, las válvulas semilunares tienen tres valvas cada una, con un borde fijo y otro libre, careciendo de músculos papilares. Estas estructuras dirigen el flujo sanguíneo de los ventrículos hacia los grandes vasos.

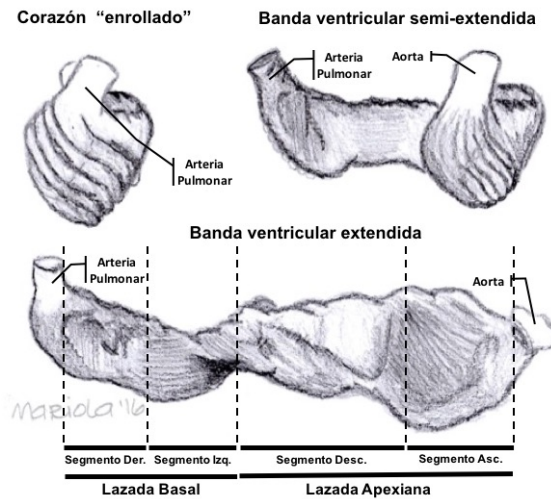


**Figura 7:** Base del corazón posterior a la resección de ambos atrios. Aquí se observa la conformación del esqueleto fibroso y la situación de las cuatro válvulas del corazón. Cortesía de María Dolores Rius Suárez.

### La banda ventricular y el nuevo concepto del movimiento del corazón

Francesc Torrent Guasp (1930-2005), cardiólogo español dedicado al estudio de la anatomía y fisiología cardíaca, describió un revolucionario modelo de estructura y funcionamiento de las fibras miocárdicas. Propone que ambos ventrículos son conformados por una sola banda ventricular continua, que se tuerce sobre sí misma y se trenza en forma de un helicóide, con inicio y fin en el nacimiento de los grandes vasos (fig. 8). La disposición tridimensional helicoidal de la banda muestra dos *lazadas*: una en la base y otra en el ápex. Ambas lazadas dan forma a estructuras anatómicas diferentes, integrando diferentes segmentos de miocardio ventricular. La lazada basal conforma los segmentos derecho e izquierdo, mientras que la laza-

da apexiana los segmentos descendente y ascendente. Estos hallazgos señalan que la contribución de la contracción atrial en el llenado ventricular es mínima y que existe un activo mecanismo de succión ventricular durante la diástole, producto de la contracción miocárdica (Torrent-Guasp, 1998; Carrillo-Esper y Sánchez-Zúñiga, 2006).



**Figura 8:** Banda miocárdica ventricular. En estos esquemas se observa cómo el miocardio ventricular constituye una sola banda que se enrolla en sí misma para formar las estructuras del corazón, donde el ventrículo derecho abraza al izquierdo. Es de llamar la atención que existe diferente disposición de las fibras musculares dependiendo del segmento de la banda. Dibujo cortesía de María Dolores Rius Suárez.

Con el fin de describir la secuencia de contracción de la *banda miocárdica ventricular*, el mismo Dr. Torrent-Guasp señaló la presencia de cuatro puntos clave en el movimiento de la banda muscular (Cosín y Hernández, 2013). El primero se localiza en el epicardio de la zona subpulmonar, en el segmento derecho de la lazada basal; el segundo punto se encuentra en la pared lateral del ventrículo izquierdo, en el segmento izquierdo de la lazada basal; al tercero lo ubicó en la zona anterior del ápex ventricular izquierdo donde se encuentra el segmento descendente de la lazada apexiana; y, finalmente, el cuarto está en el epicardio de la zona subaórtica, a nivel del segmento ascendente de la lazada apexiana (Torrent-Guasp, 2001).

Asimismo, el concepto de esta *banda miocárdica ventricular* propone una nueva teoría de la propagación del estímulo eléctrico, el cual formaría una especie de *concha externa* a nivel de la lazada basal que, originándose en la raíz de la arteria pulmonar, pasaría a la raíz de la aorta activando así la mitad basal de ambas cavidades ventriculares. Finalmente, la excitación-contracción alcanzaría el resto del miocardio hasta la lazada apexiana, provocando el consecuente incremento en la presión intraventricular.

La organización del miocardio en una banda helicoidal nos permite observar la contracción miocárdica y su repercusión hemodinámica desde otra perspectiva. La dirección vectorial de la contracción está condicionada por la propia arquitectura de la banda y explica en parte la gran eficiencia mecánica del corazón. La disposición helicoidal de las fibras musculares permite un movimiento de torsión y deslizamiento entre los dos helicoides en relación al eje longitudinal, lo que produce una acción semejante a la de un tornillo que acerca y aleja el ápex de la base ventricular (Cosín y Hernández, 2013). Así, parece más fácil entender el mecanismo por el cual cae la función del ventrículo cuando un paciente presenta un bloqueo completo de rama izquierda, debido a la pérdida de esta dinámica helicoidal de contracción.

La estrecha interacción entre la *estructura* y la *función* de un sistema es fundamental para comprenderle desde un punto de vista complejo. Así podemos ver que, desde la ultraestructura de los canales iónicos hasta la disposición macroscópica de los grupos celulares, se pueden aclarar algunas dudas que desde la perspectiva reduccionista aún no tenían explicación (De Pomposo, 2015). Un claro ejemplo es la idea de la diástole ventricular, conceptualizada como un fenómeno de relajación, un momento donde pareciera que nada ocurre. Sin embargo, ahora se considera que durante la diástole ciertos segmentos de la banda cardiaca se relajan mientras que otros pudieran contraerse, lo que produciría un fenómeno activo de succión que contribuye al incremento del gradiente y al llenado de los ventrículos. Otro ejemplo es la explicación de la gran falla ventricular derecha observada en ciertos infartos de la pared inferior del corazón, misma que no tendría lugar desde el punto de vista reduccionista, pero sí cuando se piensa que se trata de una propiedad emergente e inesperada. Por otro lado, el crecimiento de una de las cavidades, en ocasiones propicia el fallo de las otras mediante un fenómeno conocido como *interdependencia ventricular*, al parecer condicionado por la ecualización de las presiones cardíacas por restricción del pericardio, pero posiblemente también podría ser explicado por la conformación de la banda cardiaca.

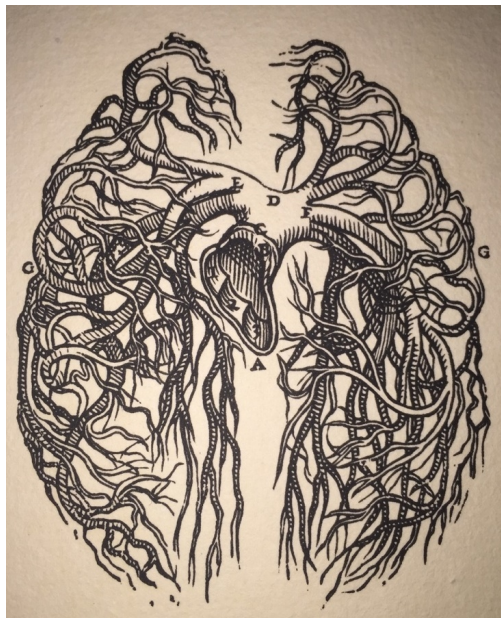
## Sistema de vasos sanguíneos

La formación de los vasos sanguíneos, proceso conocido como *angiogénesis*, se observa tanto en la vida intrauterina como en la edad adulta. Es un fenómeno interesante que comienza con la formación de conglomerados celulares, los cuales posteriormente se cavitan mediante la *apoptosis* y se conjuntan para formar ductos que después se integrarán en una red (Martínez-Ezquerro y Herrera, 2006). La diferenciación del tejido no especializado en vasos sanguíneos obedece a la acción de señales intracelulares e intercelulares, circunstancias que parecieran participar como fluctuaciones, perturbaciones o incluso atractores.

La circulación de la sangre es descrita en el siglo XVII por William Harvey (1928), en su *Exercitatio Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus*. En términos generales, la sangre es impulsada por las dos bombas que conforman el corazón, mismas que irrigan los dos grandes territorios corporales: la circulación

sistémica y la circulación funcional pulmonar (fig. 9). La sangre sale inicialmente del ventrículo izquierdo hacia la arteria más grande del cuerpo, la aorta, cuyas características elásticas aminoran la elevada presión ventricular izquierda, por lo que le conoce como vaso de *amortiguación*. Si este fenómeno no se diera en este territorio vascular, los tejidos podrían sufrir a la larga un deterioro asociado a esta extrema pulsatilidad (fig. 10) (Cymerknop, et al., 2013). Posteriormente, el flujo sanguíneo recorre prácticamente todo el organismo a través de arterias de *conducción*, vasos que van disminuyendo su calibre progresivamente hasta llegar a las pequeñas arterias (arteriolas) conocidas como vasos de *resistencia*, donde la presión arterial disminuye importantemente, lo que evita el daño mecánico que pudiera infringirse a los vasos tisulares. A partir de ahí, la sangre atraviesa los tejidos mediante una muy fina red de vasos donde se da el intercambio de sustancias, conocidos como *capilares*.

El líquido bombeado por el corazón de forma anterógrada hacia los tejidos corporales necesita de una red de vías para regresar al corazón. Así, de manera recíproca a la circulación arterial, la red venosa acompaña a la red arterial y sus ramas correspondientes.

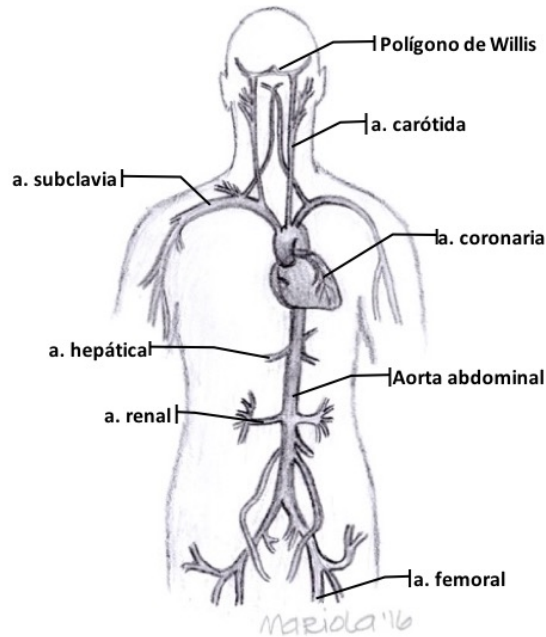


**Figura 9:** La circulación pulmonar descrita por Andreas Vesalius. Cortesía de la biblioteca “Alfredo de Micheli” del Instituto Nacional de Cardiología “Ignacio Chávez”, Ciudad de México.

capilar, donde se lleva a cabo el intercambio de gases con el exterior. Posteriormente, la sangre oxigenada regresa por las venas pulmonares al atrio izquierdo y finalmente al ventrículo izquierdo, para cerrar el ciclo.

Una vez que la sangre sale de los capilares se incorpora a un sistema de pequeñas venas (vénulas) que van confluyendo en vasos cada vez más grandes, que pueden almacenar grandes volúmenes de sangre a una baja presión (vasos de *capacitancia*) y llegan finalmente al corazón derecho. Existe otro sistema de drenaje tisular, paralelo al venoso, que drena al sistema de venas cavas y también posee propiedades inmunológicas: el sistema linfático.

La sangre recibida por la aurícula derecha pasa al ventrículo derecho para ser impulsada hacia la circulación pulmonar, donde una red muy parecida a la sistémica (vasos de *amortiguación*, *conducción*, *resistencia*, *intercambio* y *capacitancia*) pone en estrecho contacto a la sangre con el aire pulmonar a través de la membrana alveolo-



**Figura 10:** Aorta y sus principales ramas. Aquí se representan algunos de los principales vasos arteriales que surgen de la aorta. La distribución de los vasos tiene diferente dimensión de fractalidad con relación a su escala, siendo para los grandes vasos del orden de 2.33. Cortesía de María Dolores Rius Suárez.

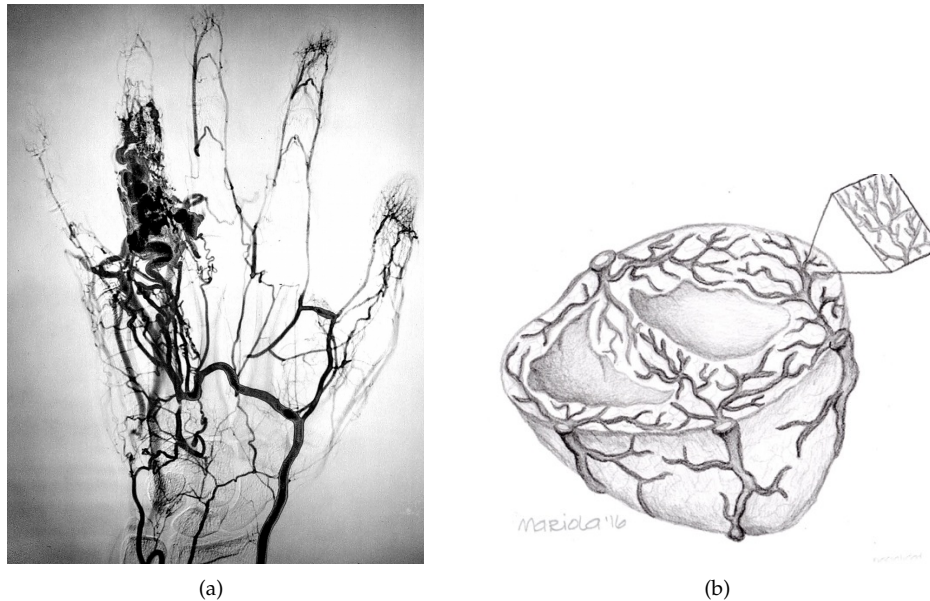
### Fractalidad en la disposición de los vasos sanguíneos

La distribución de los vasos sanguíneos varía ampliamente en una distribución interesantemente geométrica. Esta ramificación conforma redes de distribución que confieren al sistema vascular diferentes niveles de organización y promueven que el flujo sanguíneo pueda presentar un comportamiento especial, desde los puntos de vista hemodinámico y termodinámico.

La descripción de la forma de los objetos ha sido dominada desde hace siglos por la geometría euclidiana, sin embargo, no describe con precisión algunas estructuras también presentes en la naturaleza (Sharma, 2009). Un ejemplo son los *fractales*. El término fractal viene del latín “fractus”, que significa quebrado o fracturado, lo que refleja sus características de auto-similaridad. En palabras de Mandelbrot: *un fractal es una forma geométrica áspera o fragmentada que se puede dividir en partes, cada una de las cuales es una copia (al menos aproximadamente) de la reducción de tamaño de la totalidad*. En los fractales, la medición depende de la unidad que se use para estimarla, la longitud entre dos de sus puntos incrementa al aumentar el detalle con que son examinados, es decir, que la estructura básica se repite a *diferentes escalas* (Reyes, 1996). La noción de longitud carece de significado en el caso



de los fractales, por lo que los matemáticos han ideado un número que le llaman *dimensión fractal*, para cuantificar de qué modo se llena el espacio. Un punto carece de dimensiones (dimensión 0), mientras que una línea tiene dimensión 1, un círculo 2 y una esfera 3; es decir, números enteros. En contraste, los fractales, debido a sus características estructurales tienen dimensiones fraccionarias. Por ejemplo, la dimensión fractal del copo de nieve de Koch es de 1.2618 (Gutierrez y Hott, 2004; Mancardi, et al., 2008; Takahashi, 2014; Masters, 2004).

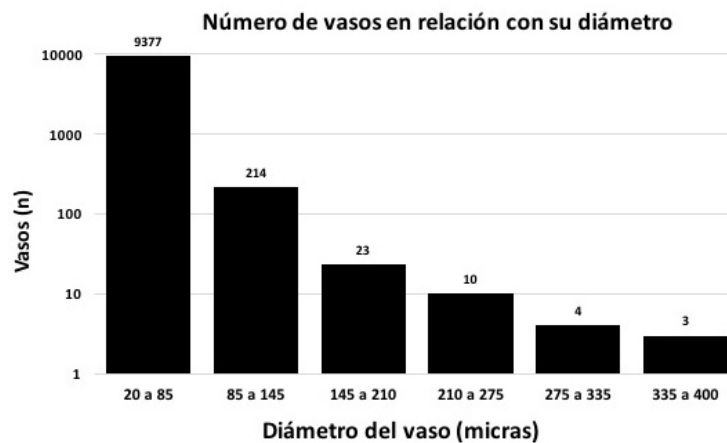


**Figura 11:** Fractalidad de la circulación arterial. Aquí se observa la disposición de los vasos arteriales en la circulación de la mano (a) y en el árbol coronario (b). Fuentes: (a) [Wikimedia](#) y (b) cortesía de María Dolores Rius Suárez.

Los seres humanos están compuestos por células, tejidos, órganos y sistemas, que interactúan de una manera compleja. Esta megaestructura requiere de tres sistemas acoplados para su funcionamiento: el primero provee el suministro de nutrientes y oxígeno a los tejidos (árbol arterial); el segundo establece el área de intercambio con ellos (red capilar); mientras que el tercero se encarga de la adecuada eliminación de los desechos celulares (sistema venoso). La correcta función de este sistema vascular es crucial y depende en mucho de su distribución espacial (Sharma, 2009). La dimensión fractal del árbol vascular la determina su estructura ramificada, que le confiere la mayor capacidad de distribución de la sangre a la vez de ocupar el mínimo volumen (fig. 11). Además, podemos ver que las estructuras vasculares de menor calibre son piezas auto-similares de los vasos de mayor calibre, resultado a su vez de la subdivisión y ampliación invariante de la estructura (Mancardi, et al., 2008). Se ha calculado que el árbol arterial tiene una dimensión

fractal promedio de 2.7, semejante a la del brócoli o la cromatina. La dimensión fractal varía desde 2.33 a nivel de los grandes vasos, donde el flujo es más turbulento, mientras que en los capilares es muy cercano a 3 (Gabrys, Rybaczuka & Kedziab, 2005; Braun, 1996; Récamier, et al., 2014).

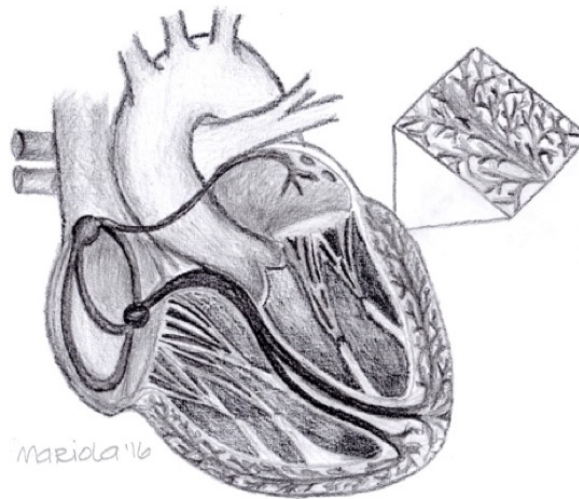
Para el árbol vascular existen al menos tres órdenes de magnitud que son auto-similares, a partir de los vasos más grandes (5 mm para mamíferos pequeños) a las arteriolas más pequeñas (10-20  $\mu\text{m}$  para mamíferos pequeños). Las redes pequeñas que se encuentran en los capilares que se alimentan de las arteriolas tienen una topología diferente al resto del árbol vascular y algunos consideran que no son parte de la red fractal (Hall, 2011). Las arterias se van ramificando en arterias cada vez más pequeñas que continúan en una red de arteriolas, la cual culmina en una madeja de capilares, vasos microscópicamente pequeños que deberán contener el mismo volumen sanguíneo que pasó por las grandes arterias. Posteriormente, a partir de los capilares se forman las vénulas que serán afluentes de venas cada vez más grandes hasta llegar a las cavas inferior y superior (Zamir, 2001). Esta distribución obedece a la *ley de potencias* (fig. 12).



**Figura 12:** Distribución de los vasos sanguíneos. En esta gráfica se aprecia que el número de vasos va aumentando exponencialmente conforme disminuye su calibre, fenómeno que sigue la llamada *ley de potencias*.

El corazón también contiene otras estructuras que tienen una apariencia fractaliforme, como en la organización de los cardiomiocitos (fibrillas, miofilamentos), la disposición de la red de His-Purkinje en el sistema de conducción del corazón y la estructura de los tejidos conectivos cardíacos como las cuerdas tendinosas y valvas de la válvula aórtica (fig. 13) (Sharma, 2009).

En la vasculatura del sistema cardiovascular se observan dos fenómenos básicos. El primero obedece a la distribución anatómica, donde el sistema vascular necesita alcanzar cada parte del cuerpo, ocupando el menor volumen posible. El segundo aspecto es hemodinámico, donde el sistema vascular debe de ir reduciendo



**Figura 13:** Aquí se observa que la arborización del sistema de conducción también tiene una geometría fractal. Dibujo cortesía de María Dolores Rius Suárez.

la velocidad del flujo y la presión ejercida contra las paredes de los vasos a medida que alcanza los capilares, acción esencial para garantizar un mejor intercambio con los tejidos, a la vez que se protege la integridad de las delgadas paredes de los vasos más pequeños. El patrón básico de distribución de la sangre es fractal, y esto se da por la anatomía del árbol vascular y por la regulación local del tono vascular (Zamir, 2001). La disminución en la longitud y diámetro de los vasos, junto con el aumento del número de ellos, reduce la pérdida de energía en el transporte del vital fluido, al reducir su entropía (Sharma, 2009; Mancardi, et al., 2008). Los vasos sanguíneos exhiben cambios de diámetro que generan cambios en la resistencia (Sharma, 2009). Las sustancias vasodilatadoras disminuyen la presión local y aumentan el diámetro del vaso para mantener el sistema temporalmente estable.

El árbol arterial se encuentra sometido a la presencia de ondas mecánicas que se propagan, reflejan y superponen, muy semejante al comportamiento observado en los sistemas de comunicaciones. Este fenómeno de reflexión tiene lugar cuando una onda cambia el sentido de su propagación ante la presencia de un medio diferente de transmisión. Un ejemplo de ello son las bifurcaciones y discontinuidades características de la red arterial, observándose que la mayor parte de las reflexiones ocurre a nivel arteriolar, donde se evidencia gran cantidad de ramificaciones a cortas distancias. Esta situación da lugar a una reflexión difusa con el retorno de ondas provenientes de distintas distancias que regresan hasta la aorta proximal en forma aleatoria. Esto genera distintas morfologías de la onda de pulso.

Un componente de la sangre que contribuye a una adecuada hemodinámica es la hemoglobina, que tiene la propiedad de transportar al oxígeno e incluso un comportamiento alostérico, que le permite incluso amortiguar el pH.

En el sistema cardiovascular se integran diferentes componentes con diversas funciones que le confieren un comportamiento complejo, abierto y no lineal. Se dice que cuanto más distinguible es un subsistema de otro, mayor será la variedad de posibles relaciones entre ellos, más complejos serán los sistemas y mayor será su capacidad de auto-organización (Trainini, et al., 2015).

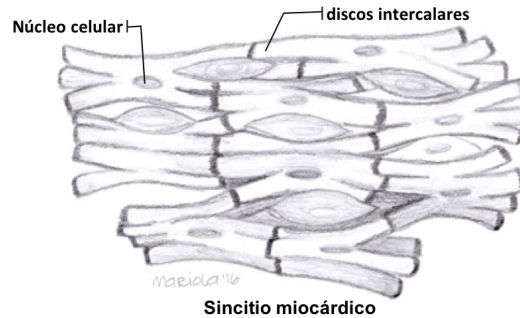
Así, el estudio actual de la anatomía cardiovascular, desde una perspectiva que va de lo reduccionista a lo complejo, nos permite observar que su función no es la de una simple máquina con un comportamiento predecible. El sistema cardiovascular es anatómicamente un conjunto de osciladores acoplados que interactúan entre sí y con su medio, situación que le confiere propiedades fisiológicas diversas, mismas que pueden ir desde un comportamiento lineal hasta lo caótico, e incluso aleatorio. La descripción anatómica, desde la clásica geometría euclidiana hasta la fractalidad, hace pensar que el sistema cardiovascular sea un sistema abierto, de intercambio termodinámico interno y externo, lo que le permite, por toda su vida, mantener su nivel de definición estructural (De Pomposo, 2015, p.7).

#### ULTRAESTRUCTURA DEL CORAZÓN: LOS MIOCARDIOCITOS

Como ya hemos visto, la estructura de un sistema puede centrarse en dos elementos básicos: morfología y función. Así, la materia y los procesos termodinámicos se encuentran estrechamente relacionados. A continuación veremos que, dentro del organismo, cobrarán vital importancia las propiedades disipativas del sistema cardiovascular.

El miocardio es conjunto de millones de células conocidas como miocitos, que conforman un *sincitio*, con diversos grados de integración y orientación, que coexisten con otras estructuras como son los vasos sanguíneos y el tejido conectivo (fig. 14). La distribución de las fibras de músculo cardíaco presentan una geometría irregular en muchas ocasiones de forma ramificada (Rodríguez, et al., 2006). Debido a las características intrínsecas de los miocitos y sus tipos de uniones intercelulares, se dan complejos procesos de auto-organización que permiten que el corazón se coordine como una gran célula.

El miocito o miofibrilla está cubierto por una membrana celular esencialmente lipoproteica conocida como *sarcolema*, a su vez integrada por dos membranas, una que en su exterior tiene una red muy densa de polisacáridos con carga negativa, los cuales captan el calcio extracelular (*glicoláliz*); la otra capa denominada *plasmalema*, es una membrana semipermeable y constituye la verdadera frontera entre el citoplasma y el espacio extracelular. Esta membrana es semipermeable a los iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), cloro ( $\text{Cl}^-$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ). El sarcolema sufre invaginaciones en la miofibrilla y forman túbulos que atraviesan la célula miocárdica en forma transversal (*sistema T*). Este sistema conforma una red tubular a lo largo de la miofibrilla, conocida como el *retículo sarcoplásmico*, lo que hace que la interacción del miocito con el medio sea más estrecha. Los cardiomiocitos están unidos entre sí por uniones intercelulares tipo desmosomas conocidas como *discos intercalares*, que le confieren a la unión celular la característica de tener una



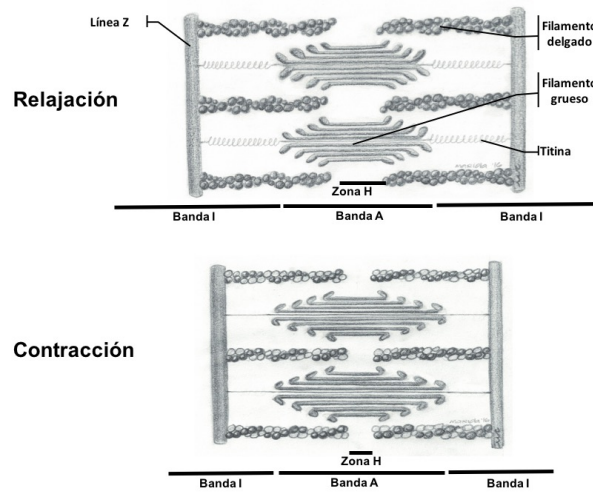
**Figura 14:** Los miocitos se agrupan de manera escalonada formando un sincitio de alta resistencia mecánica y baja resistencia eléctrica. Dibujo cortesía de María Dolores Rius Suárez.

alta resistencia mecánica para soportar la contracción muscular y una baja resistencia al paso del estímulo eléctrico. Tanto el sarcolema como los discos intercalares forman uniones permeables que permiten una difusión casi totalmente libre de los iones (Guadalajara, 2003).

Histológicamente, se considera a la sarcómera como la unidad anatómica y contráctil del músculo cardíaco (fig. 15). Esta se encuentra formada por moléculas proteicas de actina (filamentos delgados) que constituyen cadenas en las cuales se encuentran intercaladas moléculas de otra proteína llamada miosina (filamentos gruesos). La sarcómera está delimitada por las *líneas Z*, donde se insertan las moléculas de actina entre dos sarcómeros, junto con las moléculas de *titina*. El centro de la sarcómera está formado por las *bandas A*, conformadas por filamentos de miosina intercalados con moléculas de actina y en ellas se observa una zona más oscura llamada *zona H*, constituida por moléculas de miosina en forma globular. Entre las líneas Z y las bandas A se encuentran las *bandas I*, estructuradas sólo por actina.

Los miofilamentos están conformados por proteínas miocárdicas contráctiles que son: la actina (G y F), la tropomiosina y la miosina (meromiosina pesada y ligera). La troponina con sus tres subunidades (C, T e I) se encarga de regular la contracción muscular.

El acoplamiento entre la excitación eléctrica y la contracción mecánica, se da dentro de los cardiomiocitos, como resultado de los cambios de la polaridad de la membrana a los iones y el efecto voltaico de estos, principalmente del calcio en la ultraestructura de las proteínas contráctiles de la fibra muscular; este fenómeno se propaga en todo el miocardio como un fenómeno de *resonancia*. Análogamente al potencial de acción, la estabilidad mecánica de los sistemas tiende a instalarse en un mínimo potencial, fijando así un estado de equilibrio, estable o metaestable, que mantiene al sistema con una estructura definida. Sin embargo, las *fluctuaciones*, esas variaciones internas del sistema, pueden hacer que esta situación cambie en algún momento, a través de un fenómeno de resonancia, lo que empuja al sistema



**Figura 15:** En este esquema se observan los componentes de la sarcómera y cómo se deslizan los filamentos de proteínas durante la contracción muscular. Dibujo cortesía de María Dolores Rius Suárez.

a “tomar decisiones” acerca de su configuración estructural. Lo más interesante es que es posible estabilizar estos sistemas por medio de una o un sinnúmero de resonancias (Prigogine & Nicolis, 1977 citado en De Pomposo, 2015, p.79).

### Potencial de acción transmembrana

Al momento de darse la contracción muscular, se observa cómo las moléculas de actina se desplazan sobre las de miosina y el sarcómero acorta su longitud, acción mediada principalmente por la presencia de iones de calcio. El retículo sarcoplásmico recibe los  $\text{Ca}^{++}$  gracias a la acción de la bomba de calcio, regulada por un receptor de fosfato, mecanismo esencial en la respuesta adrenérgica del miocardio. Aquí se encuentran también diversos sistemas enzimáticos que regulan la actividad eléctrica y mecánica de la miofibrilla, tanto en contracción como en relajación.

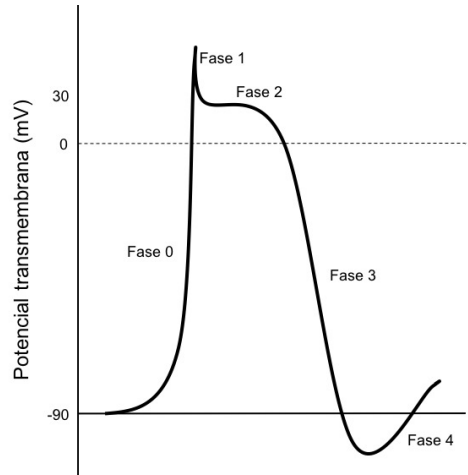
La actividad eléctrica del corazón se representa gráficamente como *potencial de reposo* y *potencial de acción transmembrana*, que comprende varias fases como la despolarización, repolarización e hiperpolarización. Durante el potencial de reposo, el plasmalema actúa como barrera iónica, manteniendo altas concentraciones intracelulares de  $\text{K}^+$ , así como bajas concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{++}$ . En la despolarización y al inicio de la llamada fase 2, los canales de calcio en la membrana celular se abren y permiten el paso de  $\text{Ca}^{++}$  desde el exterior de la célula y posteriormente lo libera a la maquinaria contráctil. La acción del calcio comienza al unirse con la troponina C que desactiva la troponina I y la cabeza de la miosina entra en contacto con la actina, por lo que la sarcómera se acorta. En la formación

de estos *puentes transversos* entre actina y miosina se utiliza energía obtenida de la ruptura de enlaces de la molécula ATP (trifosfato de adenosina) (Guadalajara, 2003).

El potencial eléctrico que se observa en los miocardiocitos, y que le confiere sus propiedades de automatismo y excitabilidad, es el resultado de los gradientes de la composición iónica a través de la membrana celular, incluyendo diversos metales como el sodio, potasio y calcio, elementos halógenos como el cloro y proteínas aniónicas (Iturralde, 2008). El sarcolema es semipermeable a los iones y al agua, además de contar con diversos tipos de canales para el transporte de iones. Estos canales son estructuras proteicas que atraviesan la membrana, compuestas de un poro y varias subunidades moduladoras, siendo sensible a los cambios de voltaje cerca de él. El *potencial de acción* es un fenómeno oscilatorio del voltaje celular asociado con la diferencia de potencial establecido por cambios, más o menos estereotipados, en las concentraciones de diversos iones a ambos lados de la membrana. Como ejemplo podemos citar que existen cuatro tipos de canales de  $\text{Ca}^{++}$ , tanto en la membrana celular como en el retículo sarcoplásmico. En cierto tipo de células, como los adipocitos, el potencial de membrana le confiere una cualidad de *irritabilidad*, mientras que en células especializadas en esto se le llama *excitabilidad*. El potencial de acción transmembrana no se produce con cualquier tipo de estímulo, ya que es necesario que este sea de la intensidad suficiente para alcanzar y cruzar el *umbral de excitación*, lo cual es una *propiedad emergente* y a la vez una *condición de frontera* del miocito (Ruelas y Mansilla, 2006). La diferencia de potencial es mayor en los cardiomiocitos de trabajo (entre  $-80$  y  $-90$  mV), mientras que es menor en las células del nodo sinusal (entre  $-50$  y  $-65$  mV).

El potencial de acción transmembrana del miocito consta de cinco fases (fig. 16). En la primera, llamada fase cero (*despolarización*), el  $\text{Na}^+$  entra rápidamente a la célula reduciendo la negatividad interna para posteriormente invertir la polaridad. En la fase 1 se observa la salida de  $\text{K}^+$  y la entrada de  $\text{Cl}^-$ , lo que comienza a reducir esa reciente positividad interna de la membrana. La fase 2 se caracteriza por la disminución abrupta del descenso en la polaridad, donde se instala una meseta, principalmente como consecuencia de la entrada de  $\text{Ca}^{++}$ . Durante la fase 3 se cierran los canales de  $\text{Na}^+$  y el  $\text{K}^+$  continúa saliendo de la célula, hasta llegar a cero e incluso alcanzar nuevamente una polaridad interna negativa (hiperpolarización). En la fase 4, la última, la célula pareciera estar eléctricamente estable, aunque existe un intenso recambio de iones de sodio, potasio, calcio y cloro para alcanzar nuevamente las concentraciones iniciales. En este momento la acción de la bomba de sodio potasio dependiente de ATP es crucial ( $\text{Na}^+\text{-K}^+$  ATPasa), mostrando también un comportamiento oscilatorio. Es importante mencionar que si bien un miocito puede ser excitado eléctricamente, existe un momento en el potencial de acción donde un nuevo potencial de acción no podrá ser desencadenado por ningún tipo de estímulo, lo que se conoce como *periodo refractario absoluto*. Por otro lado, existe también una etapa del potencial de acción en la que un estímulo muy intenso (supra-umbral) podría desencadenar un nuevo potencial, conocido como *periodo refractario relativo*. Termodinámicamente, el potencial de acción pareciera

ser un sistema con propiedades oscilatorias y conservativas del sistema, aunque también presenta estados disipativos.



**Figura 16:** Fases del potencial de acción transmembrana. Cortesía de Hermes Ilarraza.

Si bien todos los miocardiocitos pueden generar potenciales de acción en ausencia de un estímulo externo, es decir, tienen la capacidad de auto-excitarse, en el corazón existe un grupo de ellos que lo hacen con una frecuencia mayor y cumplen la función de un marcapaso natural para todo el corazón. Estas células conforman la estructura llamada *nodo sinoatrial* o de Keith y Flack, la que genera el ritmo *sinusal*. En las células del nodo sinusal, a diferencia del miocito de *trabajo*, se observa que en la fase 4 del potencial de reposo hay una pendiente ascendente que, de manera autónoma, alcanza el umbral de excitación, genera un potencial de acción y en consecuencia un latido cardíaco.

### Sistema miocárdico de conducción eléctrica

El sistema de conducción está formado por miocitos que se han diferenciado en células especializadas, cuya principal propiedad es la generación y conducción de estímulos eléctricos a lo largo del tejido. En los diferentes segmentos del corazón, el acoplamiento entre la excitación eléctrica y la contracción mecánica está organizada en una secuencia específica, de tal forma que el paso de la sangre de una cavidad a otra se vea favorecido. Así, la sangre que se encuentra en los atrios se ve impulsada a través de las válvulas atrioventriculares abiertas, después de lo cual se produce un pequeño retraso antes de que comience la contracción de los ventrículos, lo que permite su óptimo llenado. Posteriormente, la excitación-contracción ventricular se da en ambos ventrículos prácticamente al mismo tiempo, misma que comienza por la punta del corazón y termina en la base, donde se encuentran las válvulas semilunares y los vasos de salida. La contracción de todo el corazón



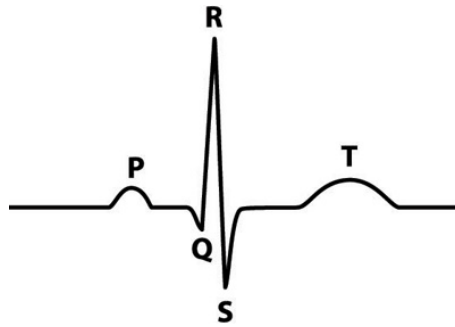
tiene una duración de alrededor de 300 ms. Este ciclo se repite alrededor de 100 mil veces al día durante la vida de cada persona.

La estructura donde se origina habitualmente el latido cardiaco es el *nodo sinusal* (Keith y Flack), localizado en el miocardio atrial entre la desembocadura de la vena cava superior y la orejuela derecha. Este nodo constituye el marcapasos natural del corazón y, desde aquí, el impulso alcanza todo el tejido auricular a través de los haces internodales (Wenckebach, Bachmann y Thorel) hasta llegar a la unión atrioventricular (Sánchez-Quintana y Yen Ho, 2003). Aquí el estímulo alcanza el centro del corazón y el *nodo aurículo-ventricular* (Aschoff-Tawara), donde la conducción se retrasa varios milisegundos y permite el vaciamiento de las aurículas. Una vez superado este punto, la velocidad de conducción se recupera a través del tronco del *haz de His*, mismo que se divide tempranamente en dos ramas (derecha e izquierda), las que se distribuyen a lo largo del tabique entre ambos ventrículos. Cada una de las ramas emite ramas más pequeñas a cada una de las bases de los músculos papilares y después se ramifica en una microscópica malla de tejido de conducción conocida como *red de Purkinje*, la que se distribuye por todo el subendocardio ventricular. Esta red tiene una disposición elíptica en ambas paredes ventriculares y se ramifican mientras penetran el miocardio. El impulso eléctrico llega prácticamente a todo el músculo ventricular en menos de 100 milisegundos (Trainini, et al., 2015).

Las bombas de iones localizadas en la membrana del miocito, las células del nodo sinusal y el resto de los cardiomiocitos, son todas estructuras biológicas que oscilan eléctrica y mecánicamente. De hecho, cada una de las células del miocardio se comporta como un oscilador y el corazón en su totalidad (sincitio), como un sistema de millones de osciladores acoplados. Ya veremos más adelante las propiedades lineales y no lineales que puede tener el ritmo cardiaco.

En el electrocardiograma convencional (ECG) se registra la actividad eléctrica del corazón en su totalidad, donde el potencial de acción de cada grupo de células puede observarse dependiendo de la calibración del equipo. Así, a una velocidad de registro de 25mm/s y una calibración del voltaje de  $1\text{mV} = 10\text{mm}$ , podemos observar a grandes rasgos la actividad de las siguientes estructuras (fig. 17): despolarización atrial (onda P), activación del nodo atrioventricular (segmento PR), activación ventricular (complejo QRS), fase 2 o de meseta de las células ventriculares (segmento ST) y la repolarización ventricular (onda T). Existen otros fenómenos que se ven enmascarados y que pueden ser observados utilizando otra calibración y equipo como catéteres intracardiacos.

El fenómeno de umbral es característico de los sistemas excitables, abiertos y no lineales. La propagación del estímulo en el miocardio, a través de los potenciales de acción, puede detenerse si encuentra una zona que no pueda ser excitada, como una cicatriz o un grupo de miocitos en periodo refractario absoluto. En ese momento el *frente de excitación* choca y los potenciales pueden anularse entre sí. Por otro lado, si este frente eléctrico alcanza alguna zona donde se hace más lenta su propagación, como sucede en el tejido isquémico, se observa un fenómeno de *conducción decremental* que culmina en la pérdida de la conducción. Existe un modelo



**Figura 17:** En este esquema de un electrocardiograma se muestran las ondas que suelen reconocerse en él y el fenómeno fisiológico que le corresponde: activación auricular (onda P), activación ventricular (complejo QRS), recuperación ventricular (onda T). Activación del nodo atrio-ventricular (segmento PQ).

intermedio, donde el frente de excitación rodea un obstáculo, pero con una velocidad de conducción desigual, donde la vía rápida puede alcanzar distalmente a la vía lenta que aún no se ha despolarizado, y da como consecuencia una conducción circular, conocida como una reentrada, mecanismo fisiopatológico de muchas de las *arritmias cardíacas* (Gaztañaga, Marchilinski y Betensky, 2012).

Un grupo de investigadores encabezados por Ary Goldberger, sostiene que la despolarización del corazón está mediada por una red de conducción eléctrica (sistema His-Purkinje) que tiene una estructura *fractal*, lo que confiere a esta onda eléctrica un amplio rango de frecuencias, que para su comprensión debe ser escalada a una distribución de ley de potencias. Así, podemos observar la coexistencia de una estructura anatómica fractal y una función no lineal en un sistema biológico estable (Goldberger, et al., 1985).

Las propiedades electrocardiográficas de los mamíferos presentan muchas transiciones de tipo complejo, tanto en la salud como en la enfermedad. Se ha postulado que el latido cardíaco puede presentar una dinámica compleja no lineal en sujetos sanos, incluyendo el comportamiento caótico. Poon & Merrill (1997) observaron que el comportamiento caótico del ritmo cardíaco se ve fuertemente reducido en pacientes con insuficiencia cardíaca, por lo que concluyen que puede convertirse en un certero marcador de alteraciones de la función cardiovascular, incluyendo la inminente probabilidad del paro cardíaco por fibrilación ventricular.

## Inervación del corazón

El corazón recibe y emite fibras del sistema nervioso autónomo, tanto simpático como parasimpático, que conforman el *plexo cardíaco*, el cual anatómicamente se relaciona con la carina traqueal, el arco aórtico y la bifurcación del tronco de la arteria pulmonar. La acción de los nervios simpáticos genera un aumento de la frecuencia cardíaca y de la fuerza de contracción, además de vasodilatación arte-

rial coronaria, mientras que la acción del nervio vago (parasimpático) produce un efecto contrario. Este plexo contiene, por un lado vías nerviosas aferentes que le permite al sistema nervioso central recibir información procedente de estructuras localizadas en los grandes vasos y del mismo corazón (*mecanorreceptores*); a la vez, son las vías eferentes quienes transmiten los impulsos provenientes de la médula espinal (Moore, 1993).

La regulación del sistema cardiovascular mediante el sistema nervioso autónomo puede estudiarse con métodos lineales en el dominio de la frecuencia (espectro de potencias) o por métodos no lineales como el mapeo de recurrencia y los índices que de él derivan, que parecen ser más específicos para caracterizar el flujo simpático y parasimpático (Hubert, et al., 1998).

#### LA FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

El corazón es un órgano inconfundible debido a su incesante trabajo, ya que a lo largo de la vida puede contraerse y relajarse alrededor de 3 mil millones de veces. Es indudable que tal proeza requiere de una gran capacidad de adaptación a las diferentes circunstancias que enfrenta un ser humano en más de 70 años de existencia. Debido a esto y otras características, el corazón es probablemente el órgano corporal con el mayor halo de misticismo. Es la percepción de los golpes que produce el corazón dentro del tórax lo que hace que el hombre se percate de su existencia: el latido (RAE, 2017b).

En la actualidad, debido en gran parte a esa asociación entre anatomía y función descrita por Vesalius, la enseñanza del sistema cardiovascular suele abordarse desde una perspectiva mecanicista, entendiendo al corazón como un par de bombas conectadas en serie a través de dos circuitos de vasos sanguíneos, dentro de los cuales viaja la sangre (*vide supra*).

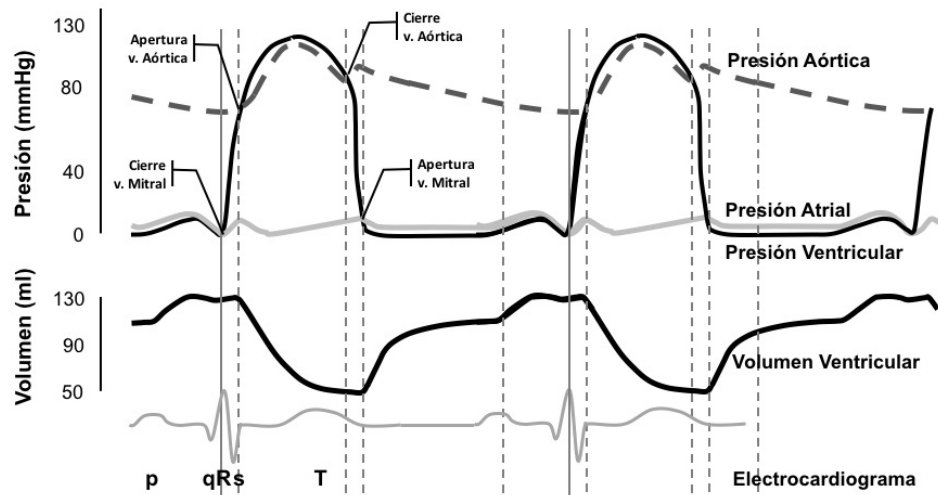
#### Homeostasis: estabilidad fuera del equilibrio

La *homeostasis* es el pilar central de la fisiología moderna, término establecido por W. B. Cannon en un intento de extender el concepto de *medio interno* descrito previamente por Claude Bernard, quien describió el ambiente donde las células podían vivir. La homeostasis es un proceso evolutivo que genera cambios incluso en la estructura del DNA, en respuesta a estímulos moderados como el clima, la actividad física, la dieta, el envejecimiento o la acción de agentes químicos o biológicos (Davies, 2016). En general, cada uno de los componentes de los órganos y tejidos del cuerpo colaboran en este estado homeostático (Hall, 2011).

#### El ciclo cardiaco

Hoy día, ese latido perpetuo es conocido como el *ciclo cardiaco*, paradigma central del funcionamiento cardiovascular; su característica cíclica ya había sido descrita de alguna manera por nuestros ancestros en el Valle de Anáhuac, cuando al corazón se le llamaba *yóllotl* (círculo).

En la década de 1940, Wiggers y Lewis representaron gráficamente el ciclo cardiaco como una sucesión de eventos en el dominio del tiempo, describiendo la relación existente entre diversas señales obtenidas del corazón (fig. 18): ruidos cardiacos, electrocardiograma, estado de cierre o apertura valvular, volumen intraventricular y las presiones intracavitarias (venas, arterias, ventrículos y atrios) (Wiggers, 1942).



**Figura 18:** Las principales variables del ciclo cardiaco fueron integradas en un esquema por Wiggers hace casi 80 años. En la línea del tiempo se observan los diversos fenómenos, desde el trazo electrocardiográfico, los volúmenes y las presiones intracavitarias, hasta los ruidos cardiacos. Este diagrama es una de las piedras angulares en el estudio de la cardiología. Cortesía de Hermes Illaraza.

De esta manera, en el momento en que el médico compara los datos obtenidos de la exploración física del paciente con los datos de este esquema, es capaz de diferenciar lo "normal" de lo "patológico", y en consecuencia describir los hallazgos propios de cada tipo de cardiopatía. En la escuela de medicina el médico aprende a auscultar el corazón mientras siente el pulso, así es más fácil de identificar los fenómenos acústicos conforme al ciclo cardiaco, sobre todo en pacientes con taquicardia donde la sístole y la diástole duran casi lo mismo. Uno de los puntos clave en la auscultación cardiaca es el comportamiento del segundo ruido, fenómeno que señala el cierre de las válvulas semilunares y que normalmente se desdobra en sus dos componentes (aórtico -2a- y pulmonar -2p-) durante la inspiración profunda, mientras que en la espiración se unen nuevamente. En estados patológicos puede encontrarse un *desdoblamiento invertido o paradójico* del segundo ruido, como en la estenosis aórtica grave, podemos encontrar un *desdoblamiento fijo* durante todo el ciclo respiratorio en pacientes con una comunicación interatrial. No hace falta puntualizar que en estos casos el signo aparece gracias al acoplamiento entre la ventilación y la circulación.

Aunque el ciclo cardiaco es un fenómeno oscilatorio, no necesariamente tiene un comportamiento periódico. El ciclo cardiaco, como todo oscilador, tiene un atractor natural que es el reposo. La ecuación de Van der Pol (ciclos límites) nos dice si el atractor se dirige desde dentro, desde fuera o es un oscilador normal. Si el oscilador es forzado, u oscilador de Poincaré, es útil para describir las arritmias cardíacas en diferentes dimensiones.

### Variabilidad de la frecuencia cardiaca

La frecuencia cardiaca (FC) es el número de veces que late un corazón por unidad de tiempo, tradicionalmente en un minuto, y también puede expresarse como el tiempo existente entre dos latidos o intervalo R-R; aunque podríamos pensar que este intervalo es siempre constante, no hay nada más alejado de la realidad. Los fisiólogos han observado que la frecuencia cardiaca presenta cierta variabilidad espontánea en sus latidos y clínicamente este comportamiento se ha asociado a diversos estados de salud o enfermedad (Wolf, et al., 1978). El *ritmo sinusal* en condiciones fisiológicas presenta una gran variabilidad latido a latido, sobre todo en los niños o en los atletas. El ejemplo clásico es la *variabilidad de la frecuencia cardiaca* (VFC) observada durante la respiración en sujetos sanos; en el momento en que un sujeto inspira, la FC aumenta; mientras que durante la espiración disminuye, fenómeno descrito como *arritmia sinusal respiratoria* (ASR), aunque no se trata realmente de un trastorno del ritmo. La ASR se asocia con un aumento del flujo sanguíneo pulmonar durante la inspiración, momento en que existe una mayor disponibilidad de oxígeno en los alveolos, fenómeno que condiciona una hematosis más eficiente, un mayor contenido de oxígeno y su mejor utilización a nivel periférico (Hayano & Yasuma, 2003; Ben-Tal, Shamailov & Paton, 2012).

En las especies mayores, como los elefantes y las jirafas, la frecuencia cardiaca es mucho menor (aprox. 30 por minuto) a la observada en animales como las musarañas, en el orden de los 1000 latidos por minuto. Esta característica es generalizada en el sistema cardiovascular y tiene implicaciones termodinámicas, ya que parece asociarse con un metabolismo más lento y una reducción en la pérdida del calor corporal. Sin embargo, la asociación entre el número de latidos y el tamaño del animal parece seguir la ley de potencias, ya que en ambos es semejante, alrededor de 800 millones de latidos, sin embargo, el tiempo en que los "utilizan" es diferente (Schmidt-Nielsen, 1984). La distribución fractal de los vasos sanguíneos podría explicar este comportamiento termodinámico del metabolismo con relación al tamaño del organismo (West, et al., 1999).

Antaño se pensaba que el comportamiento de la FC era periódico y fue hasta la aparición de instrumentos de registro a largo plazo (estudio Holter), que nos percatamos de comportamiento diferente, pudiendo llegar a lo caótico. Así, se ha observado que la VFC puede ir desde una presentación periódica, cuasi-periódica, caótica e incluso aleatoria (Goldberger, Moody & Costa, 2016). La VFC suele calcularse mediante estadística convencional, en una serie de tiempo donde se miden los intervalos R-R en una muestra, usualmente de 24 h (estudio Holter), y se calcula la

desviación estándar en ellos, lo que se conoce como SDNN, así como sus variantes. Se han reportado innumerables estudios sobre la VFC en sujetos con cardiopatía y otras enfermedades no relacionadas directamente al latido cardiaco. Se ha observado que los pacientes que presentan una menor VFC y, en consecuencia, una dinámica cardiovascular más rígida, suelen ser los más gravemente enfermos y con menor tasa de supervivencia. Demasiado orden es una señal de peligro (Goodwin, 2003).

La VFC y su sensibilidad a las propiedades iniciales se ven disminuidas cuando se bloquea el sistema nervioso parasimpático con atropina, mientras que el efecto contrario se observa al administrar bloqueadores beta-adrenérgicos. Se ha reportado que, a diferencia de la presión arterial, la administración de agonistas o bloqueadores del óxido nítrico no tienen efecto en el comportamiento caótico de la frecuencia cardiaca. Este comportamiento puede ir desde el orden hasta el ruido. Llama la atención que en un corazón *denervado* se observa un incremento en su complejidad fractal, lo que indica que es una propiedad intrínseca que se ve modulada por el sistema nervioso autónomo (Perkiomaki, et al., 2002).

El comportamiento caótico del ritmo cardiaco viene de la conjunción de dos bio-osciladores: el primero se encuentra dentro de cada cardiomiocito y le confiere su capacidad de auto-excitarse eléctricamente, mientras que el segundo obedece al estímulo eléctrico externo, principalmente originado en el nodo sinusal. Así, los miocitos pueden participar en un ritmo periódico impuesto por un marcapaso, pero también pueden volver a su ritmo intrínseco en respuesta a otros estímulos. Esta confluencia entre fluctuaciones internas y perturbaciones externas, que van de la periodicidad al caos y de regreso, caracterizan la variabilidad del ritmo cardiaco (Govindan, Narayanan & Gopinathan, 1998). De hecho, un corazón es un conjunto de miles de osciladores, uno dentro de cada célula, integrando en su *sincitio*, un verdadero oscilador múltiple. Tanto el sistema nervioso simpático como el parasimpático pueden constituir verdaderos atractores de la dinámica cardiovascular.

Además del análisis estadístico convencional, en los últimos años se ha intentado caracterizar el comportamiento de señales biológicas en el dominio del tiempo (ej. electrocardiograma), mediante el estudio de la dinámica no lineal en la búsqueda de herramientas clínicamente útiles como: la dimensión de correlación, el exponente de Lyapunov o la entropía. Govindan, Narayanan & Gopinathan (1998), después de evaluar la dinámica de la FC con la dimensión de correlación D2 y el exponente de Lyapunov, consideraron que no era lineal e incluso observaron un comportamiento caótico. En el análisis no lineal de la FC se ha observado que el ritmo cardiaco presenta fluctuaciones espontáneas que son principalmente moduladas por redes del SNA (sistema nervioso autónomo). Es interesante el hecho de que durante la actividad física se observa una importante reducción de la entropía de la frecuencia cardiaca, lo que muestra que el ejercicio es probablemente alguna clase de *atractor dinámico* (Asha & Joseph, 2005).

A nivel del sistema nervioso autónomo, se ha observado que tanto el estímulo alfa-adrenérgico como la denervación de los barorreceptores disminuyen el comportamiento caótico (Dabire, et al., 1998). Por otro lado, el bloqueo parasimpático

con atropina pareciera no tener efecto sobre el comportamiento complejo de la presión arterial, lo que sugiere que el comportamiento caótico está regulado por el sistema nervioso simpático. El control de la presión arterial depende de múltiples variables y sistemas, por lo que la influencia de más de uno de ellos puede influir en su comportamiento caótico.

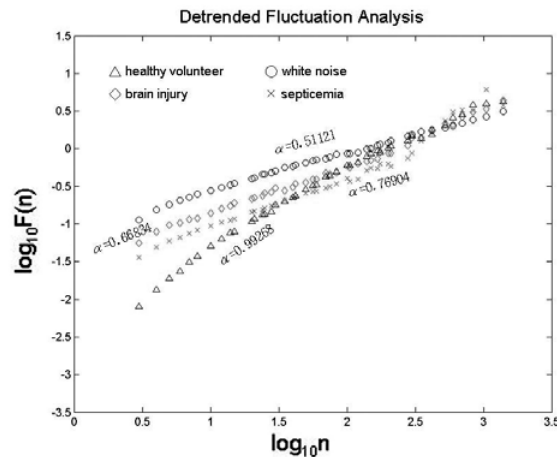
Aunque el término fractal se había reservado a la expresión geométrica, recientemente diversos grupos de investigadores utilizan también este término en el estudio de las señales. Se ha observado que el comportamiento de la frecuencia cardíaca puede adoptar la característica de un fractal, con una distribución independiente de la escala de tiempo y con la presencia de anticorrelaciones de alto rango (Peng, et al., 1993).

La fractalidad y la dinámica caótica de la VFC han sido estudiadas como un método de evaluar el riesgo cardiovascular. Asha & Joseph (2013) obtuvieron de PhysioNet una base de datos de la FC en pacientes con arritmias y la compararon con sujetos sanos, mediante el uso de herramientas de dinámica compleja como los mapas de Poincaré, el exponente de Lyapunov, la dimensión de correlación, el mapeo de recurrencia, la dimensión fractal y la medición de la entropía. Este grupo de investigadores observó que la mayoría de estas herramientas discriminaban adecuadamente los diversos tipos de arritmias y el ritmo sinusal, sobretodo los gráficos de la sección de Poincaré y los mapas de recurrencia (es muy interesante observar el comportamiento de dichos gráficos para los casos: a) ritmo sinusal, b) insuficiencia cardíaca y c) fibrilación atrial, que aparecen en las figs. 1 y 2 de Asha & Joseph, 2013). Finalmente, concluyeron que la VFC posee una dinámica no lineal o caótica, siendo más pronunciado este comportamiento en los corazones sin cardiopatía.

Investigadores han observado que un paciente que sufre un evento cardiovascular agudo como un infarto del miocardio tiene mayor riesgo de morir si la complejidad fractal de la frecuencia cardíaca está incrementada. Esto también se observa en pacientes con insuficiencia cardíaca, en quienes la dinámica de la frecuencia cardíaca puede caer en la periodicidad o el ruido, y ambos estados asociados con una elevada mortalidad. La asociación entre la pérdida del caos y la mortalidad puede deberse tanto a una disminución en la flexibilidad y adaptabilidad del sistema, como a una pérdida de la capacidad para resguardar y transmitir dentro de él, sobre todo asociado a estados de ruido (Tapanainen, et al., 2002).

Un tacograma de la FC durante 24 h indica que ésta fluctúa no solamente en respuesta a un estímulo ambiental, sino que también en estados aparentemente estacionarios; tiene múltiples interacciones con otros ritmos fisiológicos, como es el patrón respiratorio, y, asimismo, puede verse afectado por pequeñas perturbaciones como son las extrasístoles ventriculares o los bloqueos intracardiacos. Al estudiarse el comportamiento de la FC en el dominio del tiempo, se observa que carece de periodicidad, dinámica difícil de explicar con un análisis lineal; lo que requiere de un análisis no lineal. Inicialmente se pensó que el estudio de las fluctuaciones caóticas podrían asociarse con alteraciones del ritmo cardíaco como la fibrilación (Denton, et al., 1990). Tiempo después se propuso lo contrario, que las

fluctuaciones observadas durante el ritmo sinusal normal podrían tener un comportamiento caótico y que su pérdida podría ser un estado inminente de fibrilación ventricular (Goldberger, 1996).



**Figura 19:** Análisis de fluctuaciones sin tendencia. Aquí se pueden observar las diferencias de las fluctuaciones entre sujetos sanos en comparación con pacientes con daño cerebral, septicemia y el ruido blanco de control (Rong, et al., 2006).

dimensión fractal D2, es menor en pacientes con falla cardíaca en comparación con sujetos sanos (Lombardi, et al., 1996).

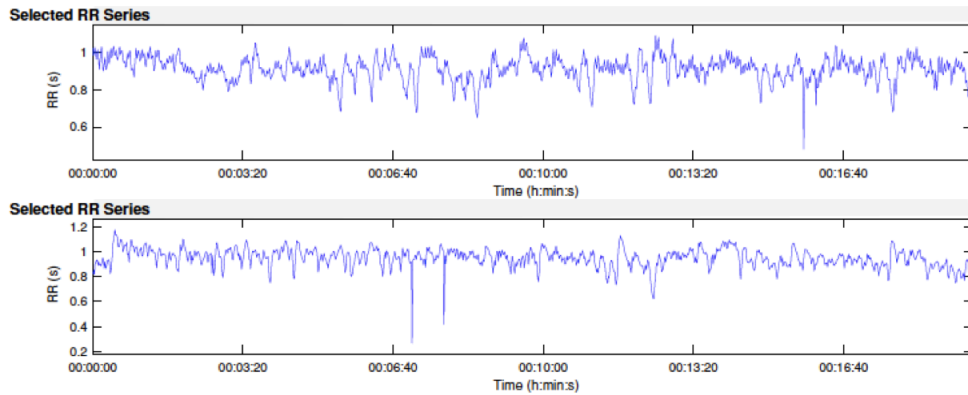
Otro ejemplo del análisis no lineal de la FC es el *análisis de fluctuaciones sin tendencia* (DFA). Rong-Guan, et al. (2006) mostraron la utilidad de este método para identificar diferentes dinámicas en las fluctuaciones observadas en la VFC, entre sujetos sanos y pacientes en el posoperatorio de neurocirugía o con septicemia (fig. 19). Por otro lado, un grupo de investigadores encabezado por M. Costa, desarrollaron una nueva medida de complejidad en un algoritmo para *entropía multi-escala*, basado en la cuantificación de las fluctuaciones de la frecuencia cardíaca en un intervalo de escalas de tiempo. Es interesante mencionar que en una de sus gráficas se incluyen todos los intervalos fisiológicos, contemplando a los pacientes que sobrevivieron al infarto del miocardio, aquellos que sufrieron muerte súbita cardíaca y aquellos que murieron por otra causa (Costa, et al., 2006, p.102).

Ahora, al cambiar el abordaje de la señal electrocardiográfica mediante la transformada de Fourier, y estudiamos el fenómeno desde el *dominio de la frecuencia* (DF) en lugar de hacerlo desde el *dominio del tiempo* (DT), podemos observar situaciones que se encontraban "escondidas" en el análisis convencional de la señal (Broughton & Bryan, 2009). En las figuras 20 y 21 observamos a un mismo sujeto que fue sometido a dos situaciones fisiológicas diferentes mientras se registraba la señal electrocardiográfica: en el primer caso se le pidió al individuo que respirara libremente, mientras que en el segundo se le solicitó que sincronizara su frecuencia

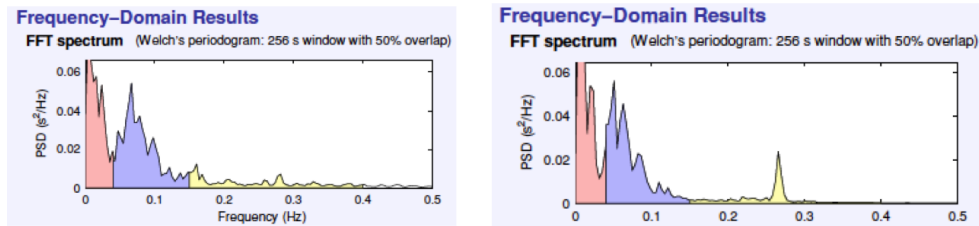
Al estudiar la dinámica de la FC durante largos periodos de tiempo, el espectro de potencias revela un comportamiento semejante a los fractales y sugiere que las fluctuaciones del intervalo R-R están relacionadas con variaciones ocurridas a cientos de latidos en el pasado, estrechamente asociados a mecanismos de regulación barorrefleja. Los sujetos con cardiopatía grave muestran una disminución marcada en el espectro de potencias y en la complejidad de la señal electrocardiográfica, lo que se asocia con una elevada mortalidad (Lombardi, 2000). También se ha observado que el índice de



respiratoria con la de un metrónomo a una frecuencia fija. En el análisis de la VFC, en el dominio del tiempo, prácticamente no se observan diferencias entre ambos registros, sin embargo al estudiar la VFC en el DF, se observa la aparición de un pico de potencia exactamente en el área de la frecuencia respiratoria asignada. Es decir, se observó el acoplamiento cardiopulmonar en la señal del ECG, situación que no se apreció en el primer análisis (Iarraza, et al., 2013).

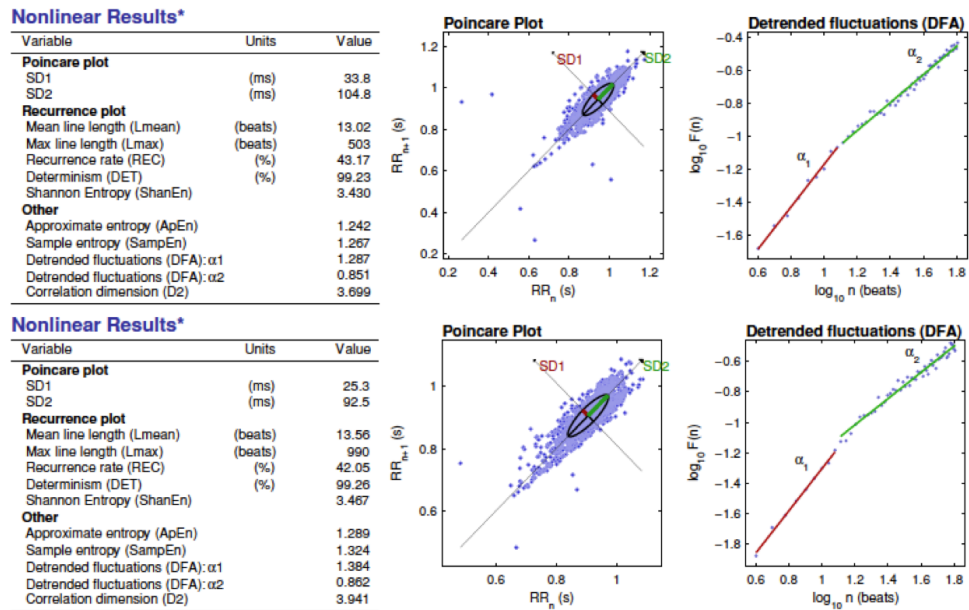


**Figura 20:** En esta gráfica se observa la VFC en el dominio del tiempo mientras el sujeto respiraba libremente (arriba), en comparación con un periodo de respiración sincrónica con un metrónomo a frecuencia fija (abajo). En el primer caso la variabilidad (SDNN) fue de 77.9, y de 67.9 en el segundo caso.



**Figura 21:** Aquí observamos el espectro de potencias cuando el sujeto respiraba libremente (izquierda), en comparación con un periodo de respiración sincrónica con un metrónomo a frecuencia fija (derecha). En el segundo caso se aprecia la presencia de un pico de potencia asociado con la frecuencia respiratoria fija (curva amarilla).

En estos mismos pacientes se estudió la VFC mediante un análisis no lineal, que demostró la presencia de claras diferencias en estos parámetros con relación al patrón respiratorio seguido por los individuos estudiados (fig. 22). Es de llamar la atención los parámetros del mapa de Poincaré, de los mapas de recurrencia y los valores de entropía. En la parte superior se presentan los datos del sujeto con respiración libre y en la parte inferior los de respiración fija.



**Figura 22:** Estas tablas y gráficas nos muestran algunos parámetros del análisis no lineal que podemos obtener de los mismos datos de las figuras 20 y 21. Es de llamar la atención los parámetros del mapa de Poincaré, de los mapas de recurrencia y los valores de entropía. En la parte superior se presentan los datos del sujeto con respiración libre y en la parte inferior los de respiración fija.

La complejidad fractal y el comportamiento caótico de la frecuencia cardiaca disminuyen con el proceso de envejecimiento; la pérdida de miocitos y la falta de adaptabilidad del corazón hace que su sistema se vuelva más rígido, con una mayor pérdida de información y que tienda a presentar una mayor proporción de fenómenos periódicos.

Hablando de la VFC podemos decir que, aún después de hacer un profundo análisis sobre su dinámica, es prácticamente imposible predecir el momento exacto en que se producirá el siguiente latido.

## Hemodinámica

El estudio del flujo sanguíneo es de vital importancia para entender enfermedades cardiovasculares como la aterosclerosis, trombosis, aneurismas y valvulopatías, entre otras; así como para el diseño de prótesis valvulares, vasculares y dispositivos de asistencia extracorpórea o hemodiálisis. La *hemodinámica* ha sido abordada desde la dinámica de fluidos de la física newtoniana como a cualquier otro líquido, sin embargo, su comportamiento dista mucho de ser simple.

La sangre es un líquido complejo, compuesto por un conjunto de elementos formes suspendidos en una solución llamada *plasma*, estructura que le otorga sus

propiedades físicas, muchas de ellas aún desconocidas. El plasma constituye el 55 % de la sangre y está formado principalmente por agua y electrolitos, aunque presenta otros elementos como son las proteínas (8 %); el restante 45 % está constituida por los glóbulos rojos o eritrocitos (95 %), los glóbulos blancos (0.13 %) y las plaquetas (4.9 %). El diámetro de un eritrocito es de alrededor de  $8.5 \mu\text{m}$ , tiene una membrana flexible y puede contorsionarse para pasar por capilares hasta de  $5 \mu\text{m}$  de diámetro. La viscosidad de la sangre depende de la naturaleza de sus componentes y de otras condiciones como la temperatura corporal. La densidad de la sangre es alrededor de  $1056 \text{ kg/m}^3$  y su coeficiente de viscosidad a menudo se considera con un valor de  $3.5 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$  (Grobelnik, 2008).

El flujo sanguíneo se estudia como un fluido newtoniano a nivel de los grandes vasos, pero debido a que en las arteriolas y capilares la tasa de cizallamiento es muy baja, debe ser tratada como un fluido no-newtoniano, en el cual las células se agregan, lo que incrementa su viscosidad. La sangre sigue un comportamiento no lineal, observado entre el estrés de cizallamiento y la tensión en la forma de la ecuación de Casson. Cambios importantes en este estrés pueden destruir los eritrocitos o activar las plaquetas, lo que puede conducir a anemia o a trombosis respectivamente. La viscosidad de la sangre parece estar disminuida en vasos muy pequeños y va aumentando hasta alcanzar un equilibrio en vasos de 0.5 mm o mayores (efecto Fahraeus-Lindqvist). Al fluir la sangre, los eritrocitos giran y se agrupan en el centro de los vasos grandes, dejando una capa libre de células cerca de la pared. En vasos de diámetro pequeño, la zona central y la periférica son de áreas muy similares, lo que hace que la viscosidad periférica sea mucho menor. Así, el flujo no se da como un continuo, sino como una serie de láminas concéntricas. Lei, et al., (2013) proponen un modelo de *dinámica de partículas disipativas* para el abordaje del flujo sanguíneo en pequeños vasos, basado en las características antes mencionadas.

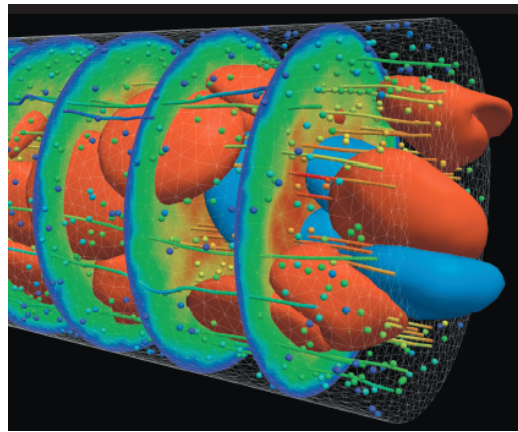
Tradicionalmente se ha abordado la hemodinámica con un modelo de flujo estable, particularmente debido a que así es más sencillo de comprender. Desde este enfoque, el flujo sanguíneo es el resultado de la interacción de diferentes variables, tanto de la sangre como de las estructuras del sistema cardiovascular. Existen varias ecuaciones que nos ayudan a comprender la hemodinámica, entre las cuales encontramos a: la ecuación de Poiseuille, la ecuación de Bernoulli, la ecuación de Casson y el número de Reynolds. Es importante destacar que el flujo sanguíneo no es uniforme dentro de todo el sistema cardiovascular, existiendo importantes diferencias con relación al tamaño, la forma y disposición de los vasos, así como a las características del fluido vital.

Sin embargo, el comportamiento hemodinámico no puede explicarse así de fácil, particularmente en la circulación precapilar. El modelo reduccionista tradicional no toma en cuenta que el flujo sanguíneo tiene un *comportamiento oscilatorio* y no linealmente estable; además, la fuerza de la sístole cardiaca es transmitida directamente a la pared de las arterias en forma de ondas que viajan y se reflejan en la discontinuidad del árbol arterial, incluso con mayor rapidez que el flujo sanguíneo. El modelo tradicional también obvia la complejidad de la interfase existente entre

el flujo sanguíneo y el movimiento pulsátil de la arteria. Existen diversos modelos matemáticos que intentan explicar estos fenómenos, como la teoría del *receptor de aire* (*windkessel*) y las ecuaciones de Womersley y de Bessel. Existen otros modelos que incluyen la reología eritrocitaria, es decir, la capacidad del eritrocito para deformarse y pasar por los capilares (Alarcón, Byrne & Maini, 2005). Sin embargo, el entendimiento de las leyes que gobiernan la hemodinámica es aún incipiente (Grobelnik, 2088).

El flujo sanguíneo está determinado de forma importante por la estructura fractal de diversas estructuras cardiovasculares, como los vasos, las cuerdas tendinosas de las válvulas atrio-ventriculares o la red de Purkinje. La distribución arborizada de los vasos sanguíneos hace mucho más eficiente su función de transporte del líquido vital. La estructura fractal también afecta lo que algunos denominan el *tiempo fisiológico* (Boxenbaum, 1982).

A la distribución fractal del flujo sanguíneo se agrega un comportamiento complejo del ritmo con el que fluye la sangre que, por un lado, se ve afectado por las oscilaciones cíclicas en el tono vasomotor y, por el otro, la dinámica impuesta por la bomba cardíaca y el sistema nervioso autónomo. El cambio rítmico en el diámetro de los vasos modifica consecuentemente la resistencia al flujo sanguíneo y se ha visto que tiene un comportamiento que va de lo cuasiperiódico a lo caótico. El comportamiento caótico del árbol vascular pareciera estar producido por la interacción de dos osciladores de calcio localizados en el citoplasma, uno asociado con su entrada (oscilador rápido dependiente de voltaje) y otro relacionado con la liberación del calcio (oscilador lento) (De Brouwer, Edwards & Griffith, 1998). Schmidt, Intaglietta & Borgstrom (1992) mostraron que la disminución de la tensión arterial desencadena un comportamiento caótico en los vasos sanguíneos y que la inhibición de un vasodilatador, como es el óxido nítrico, disminuye este tipo de dinámica (Gonzalez, et al., 2000). En estudios realizados en arterias de conejos se ha visto que la fuerza de contracción del corazón es transmitida a la pared de las arterias y viaja en forma de una onda sinusoidal, estado que favorece la hemodinámica, y se ha visto que la aparición de una dinámica caótica, con un atractor caótico muy parecido al obtenido por Lorenz, se asocia con un deterioro del flujo sanguíneo (Parthimos, Edwards & Griffith, 1996).



**Figura 23:** Este es el resultado del modelo matemático sobre la circulación de la sangre propuesto por George Karniadakis en el cual integra la dinámica de las grandes estructuras, como los eritrocitos, con las pequeñas moléculas. Fuente: G. Karniadakis, Brown University, del site: <https://www.flickr.com/photos/argonne/7178738968>

Uno de los avances tecnológicos en que se ha apoyado el estudio del comportamiento complejo es la computación. Hablando de la función ventricular, podemos encontrar diversos modelos matemáticos que simulan las condiciones de fenómenos como el potencial de acción, la activación eléctrica del corazón o la circulación sanguínea. Los modelos de simulación matemática sobre la hemodinámica son difíciles, sobre todo debido a que el comportamiento del flujo sanguíneo varía de acuerdo con el tamaño del vaso, sus propiedades elásticas y las características de la sangre. Si bien las imágenes de la resonancia magnética nuclear pueden dar una visión cercana de la estructura arterial, esto es factible solamente para vasos de gran calibre. En respuesta a esto, Karniadakis et al. diseñaron un modelo que aborda este problema desde una perspectiva multiescala, incluyendo tanto a las características macroscópicas del flujo como a la dinámica de diversas partículas (proteínas) y sus interacciones. Este es el modelo matemático de *dinámica molecular de granulación gruesa*, mediante el cual pretenden analizar incluso el comportamiento de partículas subatómicas con base en programas de cómputo complejo (fig. 23). Este modelo ha sido utilizado principalmente para el estudio del flujo sanguíneo en patologías como la anemia de células falciformes, el paludismo y los aneurismas cerebrales (Clabby, 2013).

Junto con los modelos matemáticos para estudiar la hemodinámica, existen otros proyectos que abordan la actividad eléctrica del corazón, del potencial de acción al electrocardiograma. Entre ellos, podemos destacar aquellos creados por el grupo del científico mexicano Flavio Fenton (2016), mismos que permiten al usuario cambiar tanto las condiciones de ese miocardio artificial como las concentraciones de sodio o potasio, para posteriormente observar el efecto a gran escala y a largo plazo que esto puede generar. Es una buena oportunidad para comprender el concepto de sensibilidad a condiciones iniciales.

### Auto-organización de la TA

La presión sanguínea es una de las *constantes biológicas* por excelencia en los mamíferos, ya que cualquier cambio brusco en ella puede condicionar efectos catastróficos. Existen diversas estructuras y diferentes condiciones en las que se puede medir la presión sanguínea, siendo la presión arterial la más comúnmente estudiada, especialmente la presión arterial media, también conocida como *presión de perfusión tisular*.

La presión sanguínea está sujeta a diversos mecanismos de regulación, tanto a nivel central como local, con el objeto de mantener la homeostasis. Sin embargo, algunos investigadores, que han realizado estudios mediante reto ortostático y análisis espectral, mostraron la presencia de transiciones de fase fuera del equilibrio, en las resistencias periféricas, la VFC y la frecuencia respiratoria; fenómeno que los autores interpretaron como auto-organización no lineal, más que un control homeostático (Fortrat, et al., 2016). La variabilidad de la tensión arterial también ha sido descrita como producto de una dinámica no lineal (Gonzalez, et al., 2000).

## Ciclos circadianos

La *cronobiología* ha descrito que el ser humano presenta comportamientos periódicos con ciclos de diferentes duraciones, que pueden ir de menos de 24 hrs (*ultradianos*) a más de 24 hrs (*intradianos*), siendo los más estudiados los llamados *ritmos circadianos*. Los ritmos biológicos pueden verse afectados por factores exógenos como los patrones de sueño-vigilia o el estrés emocional, o endógenos. Este último tipo de componente, al parecer, está dirigido por un oscilador interno que ajusta el ciclo en lapsos que pueden ser, por ejemplo de 1 o de 24 h (circadiano). Estos osciladores se encuentran comprendidos intrínsecamente en una suerte de marcapasos celulares y tienen cierta independencia. Existe un marcapaso circadiano maestro en el sistema nervioso central, a nivel del núcleo supraquiasmático, mismo que recibe información de entrada (input) por acción de estímulos luminosos.

El sistema cardiovascular muestra diversos patrones en relación al ritmo circadiano, los cuales pueden observarse tanto en el comportamiento de la FC, la tensión arterial y de la función endotelial, como en la tendencia a que un paciente sufra un infarto agudo del miocardio o muera súbitamente a ciertas horas del día, usualmente a media mañana. Existen diversos estados patológicos que pueden alterar estos ciclos, como la hipertrofia miocárdica o la insuficiencia cardíaca. El estudio de los ritmos circadianos a través de las ciencias de la complejidad, sin duda, ofrece una oportunidad para poder caracterizar y probablemente controlar estos fenómenos. El comportamiento de la presión arterial sistémica durante el día es predominantemente periódico, aunque puede mostrar formas más complejas (Sharma, 2009).

### DETERMINANTES DE LA SALUD Y FACTORES DE RIESGO CARDIOVASCULAR

Para deliberar sobre la forma en que trasciende la complejidad sobre las perspectivas de la salud, entrar al tema es una necesidad de hoy y de siempre. Se precipita al avanzar en la lucha por el beneficio común. El hecho es que, para conseguir ese bien, hay que comprenderlo dentro de la profundidad de esa *complejidad*. Ciertamente, incluye lo teórico y abstracto del conocimiento, pero también lo práctico y real de sus aplicaciones, en cualquiera de sus múltiples disciplinas. Esto, en medicina, es recurrente, y obedece al anhelo de mantener la vida en actitud preventiva.

Lo que motiva esta preocupación radica en la vocación de la medicina, por la salud y el bienestar, y destaca en estas tres áreas unitariamente, es el centro de actividades múltiples, para cuidarse de enfermedades, peligros y estar al pendiente de advertir riesgos y daños.

## Causalidad

Se ha visto que también reclaman prioridad los *condicionantes de la relación causal*, y exhortan a concederle la misma importancia, como parte del todo, ya que son elementos que participan simultáneamente en su contingencia. Estos se han visto vinculados íntimamente con el ámbito de la organización social, económica y política,

y no admiten descuido, pues su ausencia determina que nada se puede iniciar, ni mantener ni garantizar la calidad del servicio que se otorga, y vale en cualquier comunidad. Cualesquiera que sean las intervenciones de control, tienden a modificar las condiciones generales y a promover la ayuda mutua, procurando la paz, armonía y tranquilidad. En ello colaboran como facilitadores y condicionan el ambiente: recursos humanos, técnicos y económicos, que también son los medios para procurar salud y vida. Tan esquemático como esto, no resulta tan fácil plasmarlo; pero como alma de todo, hace que esos elementos y funciones confluyan en el potencial de la organización, a la manera de los sistemas. Eso es, precisamente, lo que por ahora conviene tener en mente, como la línea funcional del alto concepto de la complejidad.

El riesgo que se toma no será más que el de evidenciar incapacidad de cubrirlo todo y quedarse corto con lo necesario; pero domina la esperanza de que sea suficiente para agregar un avance, otro punto de vista que resulte útil. Describir, reseñar, comentar, narrar o relatar algo que es *inefable*, es, desde luego, muy cuesta arriba; pero hay que hacerlo tratándose de la complejidad, con el propósito de estimular, animar, motivar e impulsar el interés hacia algo que es de gran valor particular y general; pues no es advertido por la mayoría de las personas, y con ello la población y gran cantidad de investigadores pierden mucho de lo que podrían disfrutar con el equipo humano, convencido de actuar solidariamente en esta noble misión, pues, simplemente es humanitaria.

Medicina, salud, bienestar y prevención, el máximo deseo (*desiderátum*), transcurren juntos, en un solo cuerpo, una unidad natural que, para propósitos de la comunidad, bien se le puede ver como un blanco, el objetivo que motiva la convergencia de múltiples disciplinas que se fundan en el conocimiento y la investigación científica. El panorama se contempla en el horizonte de la salud, primero como una gran esperanza para ganarle terreno a la inseguridad y la desconfianza, para dejarse guiar por el conocimiento verdadero, a efecto de encontrar y ofrecer soluciones, pese a que todo mundo acepta de antemano que estos quehaceres no tienen meta, ni fin. En la persecución a la migrante meta, nunca se le alcanza; pero en esta persecución, al mismo tiempo, se atiende al medio y a la finalidad. En la práctica de la medicina, el seguimiento se realiza contando con la integración de lo cosechado en la asistencia, enseñanza e investigación, cuyo rendimiento nadie duda de recibirlo en la forma de calidad en cuidados y servicios asistenciales o preventivos.

En cuanto al criterio corriente de que la complejidad sea una idea abstracta, no práctica y, por ende, inútil, es preocupante y conviene enfatizar que es indispensable percibirla como la idea abstracta que es, para poder trasladarla a la realidad. Su naturaleza es esa que, además, exige asumir una rigurosa conducta, apoyada en el acto reflexivo y haciendo uso del conocimiento científico. De esa manera es posible evitar la oscilación pendular hacia los extremos, que van de la indolente inmovilidad, a la inconsecuente hiperactividad.

## Factores de riesgo

*La ambigüedad de las falacias y los factores de riesgo.* Otras situaciones similares son acarreadas con las trampas del lenguaje ordinario, participan en la confusión y no es infrecuente utilizarlas equivocadamente: el concepto de factores de riesgo (Bordes, 2011). Se le utiliza así porque va en ello implicada la noción de *causalidad*, se relaciona con el juicio justo, pretendiendo el apego a la verdad, a lo necesario y lo que debe ser, para lo cual se han creado reglas de aplicación en la *lógica clásica*. Cuando estas se cumplen, en el silogismo, es veraz; cuando no se cumple, en el sofisma, es falso. En la falacia y sus múltiples variantes no se asegura la verdad, pero tampoco se le contradice; es mentira y verdad al mismo tiempo, sin ser un absurdo. Es una verdad a medias, sin embargo, se ha tomado como la base para calcular, matemáticamente, la aproximación entre uno u otro extremo, un artificio útil para visualizar la probabilidad, como indicador de balanza de lo posible, de que pudiera conservar su cualidad de ser verdad, contra la otra de ser falsa. Se aprovecha el principio del tercero excluido, porque no se aplica al manejo de identidad de algo, ser o cosa, sino a la cualidad que se valora de esa cosa o ser; cuando se aplica como ser o no ser la causa, y se deriva a condiciones de riesgo, a sabiendas de que estas siempre participan en contingencia y no responden tajantemente al sí o al no, ser o no ser.

La idea fue diseñada hacia el sesgo de cuantificar la cualidad de veracidad, por medio de la probabilidad estadística. No se trata de aplicarlo de acuerdo al principio de identidad, que ha excluido precisamente al tercer principio lógico de lo posible, donde lo cierto es que nunca es única. Con estos aparentes enredos, no desenredados, lo frecuente es que se aplique erróneamente y, en alguna intervención masiva y costosa, donde no hay la oportunidad de advertir estas explicaciones, resulta en legítimas dudas y pierde el valor de credibilidad.

El hecho es que si no se comprende apropiadamente, el concepto de riesgo no mantiene su valor de credibilidad que necesita en recomendaciones generales. Luego sucede que, al usarlas, sin conocer a fondo su significado real, que proviene de la probabilidad, surgida en el manejo del azar y el caos, es un gran problema que ahora hay que reconocerlo dentro del tema de la complejidad. Lo peor es que se le usa como sinónimo de causa recurrentemente en la práctica. El principio de incertidumbre (desde la lógica formal) afecta las condiciones más singulares, localizadas, particulares e históricas, porque no son prueba de veracidad, ni falsedad. En el fondo de la verdad reina el principio de incertidumbre y determina que la verdad, simplemente, no se puede promulgar. El principio de incertidumbre está en el corazón de la lógica, no en el silogismo; sino en el ensamblaje de las ideas en el sistema. Esto, como aplicación del pensamiento reflexivo, es una necesidad urgente en la modernidad.

El tema, lejos de ser espontáneo, tiene raíces ancestrales en la lucha por la supervivencia. Desde la más arcaica humanidad, el hombre ha buscado el apoyo de la investigación, para explicar y aplicar a cuidados de vida y procurar salud-bienestar; no sólo persona por persona, sino para su entorno colectivo y del beneficio que retribuye. Esto, específicamente, es lo que siempre ha preocupado y



ocupa a la medicina, con algo más por agregar hoy: la necesidad de atender bien los conceptos de exposición al riesgo, al peligro, la violencia, la inseguridad y los conflictos sociopolíticos. En su evolución, y partiendo siempre del mismo principio, requiere hoy de coordinarse con las otras disciplinas de impacto, como son: la economía, la sociología y la política. Hay que considerar que, en todo ello, siempre habrá que tomar en cuenta las condiciones necesarias, aunque nunca lleguen a ser suficientes.

Arch-Tirado y Rosado-Muñoz (2009) consideran que el enfoque representa un notable avance en el conocimiento y transforma el modo de mirar al nuevo paradigma por venir, que implica al inevitable destino de la evolución del hombre. Hay que aceptar que las personas se comportan más de acuerdo a lo que creen o piensan que siguiendo los mandatos, sean reglas, normas o leyes, por lo que hay que cuidar que la comunicación no se transforme un dogma vacío o sin sentido. Es el caso de la aplicabilidad a la vida cotidiana, la expresión *factor de riesgo*, específicamente, trata de un concepto de uso frecuentemente y de gran valor; pero admitiendo su orientación etiológica, se ha usado como equivalente de causa, supuestamente para reconocer enfermedades crónicas y pacientes afectados a quienes se les pueda ofrecer tratamiento para su control, como sucede en las epidemias; he aquí su valor epidemiológico: consiste en estimar la proporción de afectados y cuantificar su posible beneficio con una intervención poblacional, a través de una recomendación o medida general; sin embargo, no niega la necesidad del particularizar el estudio clínico en cada paciente, con el debido reconocimiento, para que, en todo caso, se aplique alguna medida terapéutica y que resulte en buen control el curso de la epidemia. Este concepto se aplica de lo general a lo particular, de la epidemiología a la clínica y, como recomendación, puede resultar útil.

Pero surge la idea de proceder a la inversa, de lo particular a lo general, intentando convertir la experiencia particular en mandatos simples, y generalizarlos a partir de una experiencia exitosa singular, y se procede a implementarlo en toda la población. Por lo regular esto resulta en serias controversias y no es raro que termine en fracaso, como ha sucedido con las enfermedades crónicas de alta prevalencia y mortalidad, como en la hipertensión arterial, dislipidemia, enfermedades metabólicas, diabetes, obesidad y otros factores de riesgo de las no transmisibles, en las que no se logra un control, pese a que parecía simple.

Todo esto ocurre por la sencilla razón de que los *factores de riesgo* no son la única causa, sino elementos en contingencia; justo para ser tomados en cuenta, entre los otros factores; justo a donde también cuentan los determinantes sociales; en la Carta de Ottawa son llamados requisitos de salud, muy propios de cada colectividad. Adquieren gran importancia, especialmente en las condiciones de inequidad.

En consecuencia, es mejor tomar las recomendaciones no como un imperativo, sino como una forma de reorientar el uso de la razón y la actitud reflexiva.

Es un acierto lo que ha dicho el profesor Lifshitz Guinzberg:

[...] el paradigma prevaleciente no parece apropiado para explicar muchos fenómenos de la clínica, de la dinámica de las enfermedades, de los desenlaces terapéuticos, de la fisiopatología, de las interacciones durante la comorbilidad,

de la evolución de los pacientes. Conviene pues explorar otras alternativas y, sobre todo, intentar aplicar lo que se ha avanzado en la comprensión del mundo complejo... [Epígrafe del sitio web del [Diplomado en Ciencia Médica y Ciencia de la Complejidad](#)]

## LA PATOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Las enfermedades cardiovasculares (ECV) provocan más de 17 millones de muertes cada año a nivel mundial. En nuestro país fallecen cada año más de cien mil pacientes y se pierden alrededor de 3 millones de años por muerte prematura o discapacidad, lo que se traduce en una pérdida financiera de más de 61 billones de dólares cada año (Ibarra-Lomelí, et al., 2016).

La humanidad está experimentando, sobre todo en los países desarrollados, una transición epidemiológica, que se muestra como un incremento en el número de personas de mayor edad y una disminución de los jóvenes, lo que se conoce como *pérdida del bono poblacional*. Este cambio de la distribución etaria está asociada con diversos factores como la disminución en la tasa de natalidad y el incremento de la esperanza de vida gracias a la terapéutica médica, el control de los factores de riesgo cardiovascular y la mejoría en los determinantes de salud.

Las enfermedades del aparato circulatorio pueden ordenarse por etiología, de acuerdo con la Clasificación Internacional de Enfermedades (ICD-10), en la cual cada diagnóstico tiene un código único, y van de la clase I00 a la I99 (ICD, 2016). Además, existen otras formas de clasificación, con relación a diversas características de las enfermedades: genéticas, anatómicas, fisiopatológicas, riesgos, etc.

Desde la perspectiva de la complejidad, el médico reconoce el papel que desempeña lo *contradictorio* dentro de la realidad, es decir, la enfermedad es una *inestabilidad* dentro de un patrón estructurado que denominamos salud. Termodinámicamente es posible que la enfermedad, esa tendencia hacia la muerte, tenga como contrapeso esa propiedad de los sistemas abiertos fuera del equilibrio que alcanzan un estado estacionario: intercambian un mínimo de entropía con su entorno. La nueva manera de ver la enfermedad desde la complejidad debe considerar los fenómenos de emergencia, auto-organización, cooperación, especialización, inclusión, propiedades emergentes, fenómenos de frontera, fluctuaciones, fractalidad, perturbaciones y resonancia (De Pomposo, 2015).

## Cardiopatía isquémica

La aterosclerosis es un proceso multifactorial que involucra aspectos metabólicos, genéticos, inmunológicos, hemodinámicos e inclusive infecciosos. La formación de la placa de ateroma requiere de varios años de lenta evolución y suele seguir uno de dos caminos: una placa estable o una inestable.

Una placa estable se caracteriza por una lesión con una gruesa capa fibrosa y un reducido cor lipídico, una estructura que le permite aumentar su tamaño y poco a poco obstruir mecánicamente la circulación de la sangre. Por otro lado, la placa inestable presenta un centro líquido abundante en grasas y que suelen estar

inflamadas, lo que en ocasiones se complica con la ruptura de la placa, con la consecuente formación de un trombo y posteriormente un coágulo dentro la arteria, fenómeno que ocluye súbitamente la arteria e interrumpe el riego sanguíneo. Hoy en día, este proceso se conoce como infarto. Las condiciones que promueven la formación de una placa inestable y no una estable, o viceversa, no han sido dilucidadas, pero la incidencia de un infarto es producto del comportamiento complejo de la placa de ateroma, la hemodinámica y la dinámica de la trombosis y coagulación sanguínea. En el ser humano, todos los días se forman trombos intravasculares, sin embargo, un fino sistema de regulación lo disuelve mediante un mecanismo de trombolisis natural. Así, existe un gran número de eventos trombóticos de baja o nula repercusión, pero un sujeto puede presentar un infarto en algunos momentos de su vida. El comportamiento del infarto del miocardio o la apoplejía siguen la llamada ley de potencias, de manera muy similar a la presentación de los terremotos (Ilaraza-Lomelí, 2015).

Como vimos previamente, la distribución de las arterias presenta una gran variabilidad y lo mismo sucede con las placas de ateroma. Así, podemos encontrar pacientes con enfermedad de uno, dos, o más territorios arteriales. Tradicionalmente existen métodos, prácticamente reduccionistas, que nos indican con precisión la gravedad y extensión de la patología coronaria. Recientemente Dua, et al. (2012), han desarrollado una estrategia novedosa que permite clasificar la gravedad de la enfermedad coronaria mediante el análisis de la VFC. Además de la gravedad de la aterosclerosis coronaria, desde la década de los 80, se ha demostrado que aquellos pacientes con una VFC reducida se asocian con una mayor letalidad a mediano y largo plazo (Kleiger, et al., 1987). Al estudiar la VFC mediante el análisis espectral durante cortos periodos de tiempo (1 h), se observó que los infartos del miocardio no complicados presentaban predominantemente componentes de baja frecuencia y un componente muy disminuido en la zona de altas frecuencias; el comportamiento inverso se observó en pacientes con infartos complicados. Este comportamiento difiere importantemente con el tiempo de muestreo, ya que al registrar la VFC durante 24 h, se observa que el pico de potencia se presenta en las zonas de muy baja y ultrabaja frecuencia (Lombardi, 2000).

La VFC ha sido utilizada en el estudio del pronóstico en pacientes con infarto agudo del miocardio y/o con insuficiencia cardiaca. Tapanainen, et al. (2002) evaluaron casi 700 pacientes con infarto del miocardio, en quienes se estudió la VFC durante 24 h y mostraron que el análisis de fluctuaciones sin tendencia fue el predictor más poderoso para mortalidad a mediano y largo plazo.

Diversos autores han apuntado que la VFC se encuentra disminuida en pacientes con cardiopatía, manifestación de un desequilibrio del sistema nervioso autónomo sobre el ritmo sinusal, con un incremento en el tono simpático y una disminución en el tono vagal. Al estudiar esta disminución de la VFC mediante Holter, en el dominio del tiempo y con índices geométricos, se ha podido detectar aquella población con mayor riesgo de mortalidad post infarto del miocardio. El análisis espectral de la señal electrocardiográfica fue incorporada a finales de la década de los ochenta (Lombardi, 2000).

## Insuficiencia cardiaca

La insuficiencia cardiaca es la incapacidad del corazón para llevar a cabo sus funciones, principalmente la de bombeo, y constituye la vía terminal común de la mayor parte de las cardiopatías crónicas. Una de las características principales de los pacientes con insuficiencia cardiaca es el hecho de que presentan un gran número de mecanismos compensadores para poder sobrevivir; sin embargo, estos son deletéreos a largo plazo. El cardiólogo contemporáneo intenta identificar aquellos pacientes con insuficiencia cardiaca que tengan mayor riesgo de presentar un deterioro acelerado de su enfermedad o bien un episodio de muerte súbita cardiaca. Uno de los mecanismos más estudiados es la regulación del sistema nervioso autónomo, siendo la VFC su principal variable. La VFC está claramente disminuida en los pacientes con insuficiencia cardiaca. En la [fig. 1a](#) de Poon & Merrill (1997) se observa que los sujetos sin cardiopatía tienen una mayor variabilidad en comparación con los pacientes con falla cardiaca. Aunado a esto, se ha visto que los pacientes con insuficiencia cardiaca también tienen una menor tendencia al comportamiento caótico, fenómeno que se ha asociado a la presencia de fibrilación ventricular y muerte súbita.

## Fibrilación atrial y ventricular

La fibrilación del músculo cardiaco es producto de una activación eléctrica altamente desordenada, que condiciona una pérdida en la efectividad contráctil, y que, de suceder en el músculo ventricular, lleva rápidamente a la muerte del paciente. Por el contrario, la fibrilación auricular se asocia con una relativamente baja mortalidad, pero una moderada a alta morbilidad, principalmente debido a fenómenos tromboembólicos generados en las orejuelas. Aunque inicialmente se pensaba en la fibrilación como la arritmia completa, se ha visto desde hace décadas que la activación eléctrica en la fibrilación atrial (FA) está organizada en forma de frentes de onda que se propagan en patrones complejos, lo que muestra que no es una dinámica aleatoria (Moe, Rheinboldt & Abildskov, 1964).

En años recientes se ha estudiado ampliamente la estabilidad de la dinámica cardiaca, especialmente su comportamiento caótico y la probable asociación con la pérdida del ritmo cardiaco, que en ocasiones puede ser fatal, como es el caso de la fibrilación ventricular. Existen varios modelos matemáticos que han mostrado este comportamiento caótico en la secuencia de la activación eléctrica del corazón, específicamente mediante la aparición de espirales y rotores de activación ([fig. 24](#)). Se piensa que la fibrilación ventricular es una muestra del comportamiento caótico de la activación eléctrica del corazón. La transición de la dinámica cardiaca hacia el caos puede ser diversa, y comprende las siguientes causas: efecto de memoria, restitución no-monotónica, bloqueo de conducción y la variabilidad espacial en altas dimensiones (Hastings, et al., 2000).

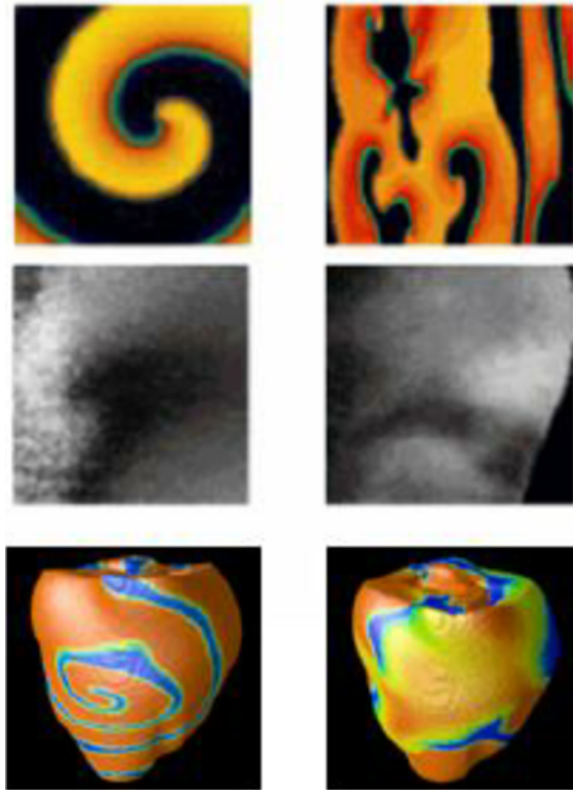
Auto-organización del latido cardiaco. La propagación del impulso eléctrico en el corazón puede ser comprendido mediante ecuaciones de reacción-difusión. Diversos autores han mostrado que estos procesos producen ondas que se propagan

en el miocardio en forma de espirales, las cuales conforman patrones conocidos que preceden a la instalación del comportamiento caótico, el cual puede aparecer cuando el corazón cambia de ritmo sinusal a una taquicardia y posteriormente degenera en una fibrilación. A diferencia del comportamiento caótico benéfico en la VFC, la fibrilación de los miocardiocitos dentro de un estado caótico se puede considerar como un *caos deletéreo*. En otras palabras, la presencia de caos en la generación del ritmo sinusal pareciera ser saludable, mientras que el caos en la propagación del latido cardiaco podría ser mortal (Turing, 1990 [1953]).

En ocasiones el ritmo cardiaco se sitúa en la frontera entre la periodicidad y el caos, situación que de comprenderse a fondo podría ayudar a mejorar el tratamiento de las arritmias cardíacas o en el diseño de nuevos tipos de marcapasos que induzcan el caos o la periodicidad, según necesitara el paciente, estrategias conocidas como *control* o *anti-control del caos* (vide infra) (Garfinkel, et al., 1992).

La alternancia espacial discordante, una respuesta a la estimulación rápida con un marcapaso, ha sido descrita como un precursor del comportamiento caótico. Echebarria y Karma (2007) han desarrollado una ecuación que se aproxima al comportamiento alterno de una fibra miocárdica unidimensional, observándose tanto el estado estable como bifurcaciones de Hopf. En su trabajo demostraron que existen soluciones caóticas para esta ecuación en una fibra miocárdica (Dai & Schaeffer, 2010).

El control de la dinámica espacio-temporal compleja que se asocia a la presencia de arritmias potencialmente mortales, como la fibrilación ventricular, es sumamente difícil; debido a la interacción no lineal de los frentes de propagación dentro de un sustrato anatómico sumamente heterogéneo. La única terapia actual para



**Figura 24:** En esta simulación se observa el patrón de activación eléctrica durante un episodio de taquicardia ventricular (izquierda) en comparación con uno de fibrilación ventricular (Bartocci, et al., 2011). Fuente de la imagen: [researchgate.net](https://www.researchgate.net)

la fibrilación ventricular es “resetear” la actividad anómala mediante un choque eléctrico. Un grupo de investigadores de la Universidad de Cornell y del Instituto Max Planck ha estudiado la relación entre la respuesta del tejido miocárdico a un campo eléctrico y la distribución espacial de la estructura vascular; ellos han observado que el frente de despolarización intramural obedece la ley de potencias. Estos hallazgos sobre la dinámica de los frentes de onda permiten dirigir un impulso de turbulencia eléctrica cerca del núcleo de los vórtices de actividad eléctrica que pueden generar la fibrilación ventricular, y con esto evitarla (Luther, et al., 2011; Alonso, Sagués & Mikhailov, 2003).

Garfinkel, et al. (1997), estudiaron la fibrilación atrial en cuatro modelos diferentes: FA en humanos, fibrilación ventricular en perros, fibrilación en miocardiocitos cultivados y un modelo *in silico*. Este grupo de investigadores sugieren que la fibrilación es una forma de caos espacio-temporal que surge de una transición cuasiperiódica. Ellos observaron que cuando un proceso oscilatorio es modulado, a su vez, por otros fenómenos oscilatorios, ocurre una desestabilización del sistema y aparece una dinámica caótica. Este fenómeno pudiera tener importantes implicaciones terapéuticas.

### Otras patologías

Si bien la aterosclerosis es considerada como una enfermedad no transmisible, existen otras patologías que tienen un origen infeccioso y pueden constituir en ocasiones verdaderas epidemias; entre ellas podemos contar a la fiebre reumática, la enfermedad de Chagas y la miopericarditis. Además del enfoque tradicional de la *historia natural de la enfermedad* para abordar una epidemia, existen nuevos modelos que se basan en el comportamiento complejo de la distribución de estas enfermedades. A principios del siglo pasado se diseñaron modelos matemáticos para explicar el comportamiento del paludismo y actualmente se estudia el uso de dispositivos portátiles para estudiar la movilidad de los seres humanos, un componente trascendental en la dinámica compleja en la difusión de los contagios (Mansilla, 2015).

### Cardiopatías congénitas

La mayor parte de las enfermedades del corazón en los niños son anomalías estructurales durante la formación del corazón (cardiopatías congénitas), hasta patologías hereditarias moleculares como las enfermedades de los canales iónicos, que se manifiestan como arritmias cardíacas. Las cardiopatías congénitas, conocidas como malformaciones del corazón, parecieran ser un claro ejemplo de un fenómeno dependiente de sus condiciones iniciales, ya que al cambiar un poco éstas, el resultado puede ser una anomalía muy importante en la estructura cardíaca.

En la vida intrauterina se da un sinnúmero de procesos que van desde la formación de conglomerados celulares hasta la destrucción del tejido (lisis) para generar orificios que den paso a la sangre hacia otros territorios. Estos procesos están

regulados por factores humorales locales y también hemodinámicos, donde la estructura y la función van estrechamente de la mano. Antaño, la mayor parte de los paciente fallecían a edades tempranas, sin embargo, hoy en día, debido a los avances en el diagnóstico y la terapéutica, estos niños usualmente alcanzan la edad adulta. En esta población prevalecen nuevas complicaciones como la presencia de aneurismas en los pacientes con coartación aórtica o de insuficiencia cardiaca en otras patologías congénitas.

Algo que caracteriza a las cardiopatías congénitas es que existen múltiples variantes para cada una de las patologías, las cuales se expresan como propiedades emergentes del mismo sustrato, pero complican mucho la misma clasificación de estas enfermedades. Aquí habrá que agregar que muchas de las cardiopatías congénitas se asocian a grandes síndromes genéticos como el de Down, entre otros.

#### EL DIAGNÓSTICO CARDIOVASCULAR

La correcta identificación de una enfermedad le permite al médico instaurar el tratamiento más efectivo. Hoy en día, el diagnóstico sigue constituyendo un reto clínico, ya que en muy pocas ocasiones se puede encontrar algún dato indudable (patognomónico) de una enfermedad. Así, el galeno echa mano de una serie de recursos que van desde el interrogatorio y la exploración física, hasta el uso de sofisticados métodos de función y/o estructura, que tienen cierto grado de certeza, propiedad que se conoce como *potencia o precisión diagnóstica*. De esta forma, el médico va realizando las pruebas *convenientes*, una después de la otra, constituyendo un complejo proceso de *probabilidad condicionada*, donde ese riesgo inicial de padecer una enfermedad aumenta o decrece en relación con el resultado de ellas, hasta que el facultativo está *suficientemente convencido* de que el paciente tiene o no la patología (teorema de Bayes).

Como puede verse, la realización de un diagnóstico médico, aparte de ser muy elaborado, tiene una naturaleza compleja. Primeramente, el profesional de la salud se enfrenta a una entretrejida red de variables biológicas, físicas y bioquímicas que interactúa, se auto-organiza y tiene propiedades emergentes; además, el organismo no tiene un comportamiento lineal ni puede explicarse satisfactoriamente de manera reduccionista. Finalmente, el actor secundario en esta puesta en escena, el galeno, se encuentra inmerso en el fenómeno y tiene que tomar las decisiones dentro de escenarios clínicos habientes de una gran variabilidad (Ilarraza, 2015).

Podemos concluir que el proceso diagnóstico ha utilizado a lo largo de los siglos diversos abordajes como el empirismo, el mecanicismo, la fisiopatología, la probabilística, el reduccionismo y, sin duda, las ciencias de la complejidad constituirán una herramienta más.

#### EL TRATAMIENTO DE LAS PATOLOGÍAS CARDIOVASCULARES

Análogamente con lo mencionado en párrafos anteriores, podemos ver que la terapéutica también encuentra en la enfermedad a un sistema complejo, abierto y

no lineal. El paradigma actual del uso general de fármacos se topa con el fracaso frecuente en el control de las enfermedades del corazón. El ejemplo clásico es la hipertensión arterial, una patología *fácil* de diagnosticar y de tratar; así, encontramos que aunque el 30% de la población padece hipertensión, solamente el 30% lo sabe, y de ellos, el 30% se encuentra con medicación y bajo control; en otras palabras, solamente el 9% .

Está claro que la mayoría de las cardiopatías, si no es que todas, son fenómenos complejos que siguen abordándose desde una perspectiva lineal y reduccionista, lo que lleva al médico y al paciente a enfrentar un sinnúmero de problemas diagnósticos y terapéuticos. Es evidente que el efecto de un medicamento variará en relación con su farmacodinamia, el estilo de vida del paciente, hábitos nocivos y virtuosos, el efecto de otros fármacos, la dieta, el ejercicio y, finalmente, con la idiosincrasia del paciente. Son todos estos aspectos los que el médico no deberá soslayar, pero que no puede completa y certeramente dimensionar con los métodos convencionales.

Otro ejemplo es la terapia eléctrica para el corazón. Como ya se mencionó, la actividad eléctrica del corazón inicia en el cardiomiocito con el potencial de acción transmembrana, el cual observamos registrado como el complejo QRS del electrocardiograma de superficie. Aunque la activación eléctrica del miocardio es un fenómeno difícil de describir, se han desarrollado modelos matemáticos para reproducirla, de los cuales se obtienen ondas semejantes al latido cardiaco mediante diversas ecuaciones.

Inmediatamente quisiéramos encontrar las ecuaciones correspondientes a los diferentes tipos de dinámica electrocardiográfica observada en cada tipo de cardiopatía, ya que al tenerlas casi habríamos resuelto el problema. Es aquí donde la característica no lineal de este fenómeno nos lo impide, ya que existen diversas variables que interactúan con comportamientos que dependen de diversas circunstancias como sus condiciones iniciales, fenómenos de frontera, auto-organización o propiedades emergentes.

La actividad cardiaca es modulada por diversas variables, intrínsecas y extrínsecas como: temperatura corporal, aspectos hormonales y la saturación de oxígeno en la hemoglobina, entre otras. Si tomamos como ejemplo a la temperatura y la introducimos en el modelo de ECG, observamos que, por un lado, su incremento eleva la frecuencia cardiaca, pero por el otro lado, la temperatura corporal se ve afectada a su vez por otros factores, y así sucesivamente. El intento de encontrar las variables que influyan en el trazo ECG y describir su comportamiento e interacciones se vuelve en una labor titánica.

*Teoría del reinicio y la dinámica de las iteraciones.* En cada uno de los ciclos de nuestra existencia como la respiración o el latido cardiaco, el sistema pasa por un momento inicial, recorre una serie de pasos y culmina nuevamente en el lugar donde comenzó o *evento marcador*. Si se provocan perturbaciones intensas y breves los sistemas pueden responder de diversas maneras, sin embargo, el ciclo cardiaco, como otros osciladores no lineales con un ciclo atractor estable, regresará a su dinámica rápidamente. Este fenómeno es especialmente interesante cuando estu-



diamos el comportamiento de un corazón que late rítmicamente y es estimulado por medio de un marcapaso (perturbación). En el acoplamiento entre el miocardio y el marcapaso, a medida que se acelera la frecuencia de descarga del marcapaso, se puede observar un estrechamiento en la duración del potencial de acción miocárdico (Ruelas y Mansilla, 2006).

Por otro lado, existe también la tentación no solamente de predecir el comportamiento del latido cardiaco, sino de manipularlo. En el mundo de la cardiología se han desarrollado diferentes clases de medicamentos (antiarrítmicos), así como una gran variedad de dispositivos de terapia eléctrica (marcapasos) para el tratamiento de diversas enfermedades del sistema de excitación-conducción eléctrica del miocardio.

Un ejemplo frecuente es la fibrilación atrial (FA), descrita como un ritmo auricular rápido, desordenado y desincronizado, sin capacidad para generar contracciones auriculares efectivas. En general, el tratamiento “eléctrico” de la FA busca, por un lado, disminuir la frecuencia cardiaca y, por el otro, trata de restaurar el ritmo sinusal (Iturralde, 2008).

Así, en los últimos años ha cambiado dramáticamente la forma de describir el comportamiento de la FA, desde verle como una “desorganización completa” hasta llegar al modelo actual. La explicación moderna de la FA se basa en el hecho de interpretar a la actividad eléctrica de las aurículas como un grupo de frentes de propagación con forma espiral que asemejan un *vórtice rotor* que ha mostrado tener un comportamiento no lineal (Pandit & Jalife, 2013). Al trazar las trayectorias de estos *rotores de FA*, observamos su comportamiento irregular que, en teoría, podría ser manipulado mediante ciertos métodos para modificar dichas trayectorias y así controlar la FA.<sup>1</sup>

Si bien hoy día no se ha podido obtener algún modelo que permita predecir con precisión la secuencia de los latidos del corazón, sí se han reproducido matemáticamente algunos de los diversos tipos de comportamiento de la frecuencia cardiaca, en general no lineal, lo que de suyo es un importante avance en la comprensión de la regulación cardiovascular.

### Acciones para evitar la muerte súbita de origen cardiaco

La muerte súbita de origen cardiaco es una catástrofe que suele afectar a pacientes con cardiopatía, aunque sujetos aparentemente sanos también la pueden presentar. En general, el evento final común en estos casos es el paro cardiaco secundario a alteraciones graves del ritmo, particularmente la taquicardia o la fibrilación ventricular, que pueden tratarse eficazmente con la aplicación de una descarga eléctrica conocida como desfibrilación. Así, hoy en día existe una estrategia a nivel mundial para que aquellos pacientes que presenten fibrilación ventricular y paro cardiaco puedan recibir esta terapia eléctrica que salve su vida. La pregunta es: ¿cuántos

<sup>1</sup> Es importante mencionar, que dentro del estudio de los sistemas caóticos, existen métodos de control, basados en la dinámica del sistema y que pueden traducirse como “hacia donde queremos que evolucione el sistema”.

desfibriladores comprar y dónde colocarlos? El costo de un desfibrilador asciende a unos 3 mil dólares americanos, requiere mantenimiento a mediano plazo y de personal mínimamente capacitado para operarlo. Estos dispositivos deben colocarse en lugares estratégicos y es muy tentador buscar lugares de grandes concentraciones humanas como estadios de fútbol, aeropuertos, etc. Si estudiamos esto con detalle podemos observar que un estadio de fútbol puede concentrar 80 mil sujetos, pero solamente durante un lapso limitado a un par de horas y una vez cada 15 días, mientras dure la temporada; por otro lado, prácticamente toda la población llega por la tarde a su casa donde pernocta.

De esta manera, queda claro que la distribución de la población también sigue la ley de potencias, lo que hace que la mayor parte de la población no se concentre en grandes escenarios, sino que se disperse en grandes áreas. Es evidente que la colocación *efectiva y eficiente* de los desfibriladores no debe hacerse mediante un proceso *lógico*, sino *complejo*.

#### EVALUACIÓN DEL RIESGO DE ENFERMAR DEL CORAZÓN

La medicina contemporánea se caracteriza por el uso constante y amplio de las llamadas calculadoras de riesgo, siendo la cardiología probablemente una de las especialidades que más las utiliza. Estas herramientas asumen que el comportamiento de la enfermedad es lineal y determinista, incluyendo sus complicaciones.

Así, los expertos se han dedicado desde hace varias décadas a la construcción de complicados modelos bioestadísticos de la enfermedad, fundamentalmente basados en modelos matemáticos de regresión, para la predicción de diversos desenlaces en la población. Al atender un paciente con cardiopatía, el médico utiliza diariamente diversas aplicaciones mediante las cuales se puede calcular el riesgo que tiene para desarrollar una trombosis, la incidencia de infarto o mortalidad, trombosis o bien la presencia de sangrados, entre muchos desenlaces más (puntuación de Framingham, Euroscore, ASCVD-Risk, CHA<sub>2</sub>DS<sub>2</sub>-VASc, etc.). Sin embargo, es muy fácil darse cuenta que la aplicabilidad real de estos instrumentos es limitada, debido a la pobre capacidad predictiva de la que gozan (Ilarraza, 2015).

Finalmente, Charlotte Werndl (2009) propone que para predecir cualquier tipo de evento, todos los eventos que han acontecido en el pasado son probabilísticamente irrelevantes.

#### LIMITACIONES DE LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

Si bien las ciencias de la complejidad ofrecen una nueva visión sobre el estudio de los diferentes fenómenos naturales, su existencia ha sido todavía muy corta y se encuentra apenas en *desarrollo embrionario*. El uso de matemáticas complejas tiene diversas dificultades, tanto a nivel teórico como pragmático, lo que hace de su entendimiento una tarea aún árida y complicada. El desarrollo de nuevas matemáticas que ayuden a explicar los fenómenos complejos contribuirá enormemente al desarrollo epistemológico en este campo. Las dificultades conceptuales y operati-

vas que tenemos hoy en día parecen ser muy semejantes a las que se enfrentaban los científicos hace cuatrocientos años, antes de la aparición del plano cartesiano o del cálculo infinitesimal. Por ahora, la caracterización de algunas propiedades de la complejidad, como pueden ser la fractalidad, la auto-organización, la sensibilidad a las condiciones iniciales, la emergencia, la resonancia y los fenómenos de frontera entre otras, seguirán siendo un terreno fértil para el desarrollo del intelecto humano.

El estudio de la dinámica cardiovascular mediante la complejidad es prácticamente nulo en las escuelas de medicina. En los actuales libros para la enseñanza del sistema cardiovascular podemos observar que se sigue utilizando un enfoque lineal y reduccionista, que utiliza un abordaje mecanicista del estudio de la dinámica del corazón y los vasos sanguíneos (Cheng, 2015).

## CONCLUSIÓN

El corazón ha sido considerado desde la Antigüedad como el eje de la vida. A lo largo de la historia ha habido muchas formas de entenderlo, algunas de ellas sin cabida alguna dentro de nuestro mundo moderno. He aquí la prueba de que los nuevos paradigmas surgen constantemente.

En el estudio del sistema cardiovascular, como en otros ámbitos del conocimiento humano, existen ciertas constantes, como la asociación perenne entre forma y función; la complementariedad entre análisis y síntesis; así como la dialéctica entre el determinismo y la incertidumbre.

El abordaje segmentario y reduccionista, que tantos frutos ha dado a la ciencia, requiere de un complemento, esa concepción total e integrada que nos muestre la entretejida red de interacciones estructurales que conectan al corazón con el resto del organismo y al organismo con el resto del universo.

Es cierto que las llamadas ciencias de la complejidad tienen poco tiempo de haber nacido y buscan comenzar a gatear, concentrándose aquí su principal debilidad. Sin embargo, la luz que ofrece, más allá de los métodos convencionales, parece prometedora.

*Somos como enanos a los hombros de gigantes. Podemos ver más, y más lejos que ellos, no porque la agudeza de nuestra vista ni por la altura de nuestro cuerpo, sino porque somos levantados por su gran altura.*

Bernardus Carnotensis (s. XII)

## BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, T., Byrne, H.M. & Maini, P.K., 2005. A design principle for vascular beds: the effects of complex blood rheology. *Microvasc Res*, 69(3), pp.156–72.
- Alonso, S., Sagués, F. & Mikhailov, A., 2003. Taming Winfree Turbulence of Scroll Waves in Excitable Media. *Science*, 299, pp.1722–25.

- Arch-Tirado, E. y Rosado-Muñoz, J., 2009. Ciencias de la complejidad y caos como herramientas en el análisis de la proliferación de vectores y zoonosis. *Cirugía y Cirujanos*, 77(4), pp.341–350.
- Asha, N.D. & Joseph, K.P., 2005. Estimating the complexity of heart rate fluctuations: an approach based on compression entropy. *Fluctuation and Noise Letters*, 5(4), pp.L557–L563.
- Asha, N.D. & Joseph, K.P., 2013. Nonlinear Indices of Heart Rate Variability for Differentiating Arrhythmias. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 13(4), pp.13500611–17
- Bartocci, E., Cherry, E.M., Glimm, J., Grosu, R., Smolka, S.A. & Fenton, F.H., 2011. Toward real-time simulation of cardiac dynamics. CMSB 2011 9th International Conference on Computational Methods in Systems Biology, Sept. 21-23, Paris, France. In: Proceedings of the 9th International Conference on Computational Methods in Systems Biology (CMSB '11). New York: ACM. pp.103–110. doi:10.1145/2037509.2037525
- Ben-Tal, A., Shamailov, S.S. & Paton, J.F., 2012. Evaluating the physiological significance of respiratory sinus arrhythmia: looking beyond ventilation-perfusion efficiency. *J Physiol*, 590(8), pp.1989–2008.
- Bordes Solanas, M., 2011. *Las trampas de Circe: falacias lógicas y argumentación informal*. Madrid: Cátedra.
- Boxenbaum, H., 1982. Interspecies scaling, allometry, physiological time, and the ground plan of pharmacokinetics. *J Pharmacokinetic Biopharm*, 10(2), pp.201–27.
- Braun, E., 1996. *Caos, fractales y cosas raras*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica. Disponible en: [biblioteca digital Ilce](#). [consultado: 14.octubre.2018].
- Broughton, S.A. & Bryan, K., 2009. *Discrete Fourier analysis and wavelets. Applications to signal and image processing*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc.
- Cannon, W. B., 1932. *The Wisdom of the Body*. New York: W.W. Norton & Company.
- Carrillo-Esper, R. y Sánchez-Zúñiga, M., 2006. Conceptos actuales sobre la contracción cardíaca. La banda cardíaca. *Revista Mexicana de Anestesiología*, 29(S1), pp.S288–S290.
- Carrizo, L., Espina-Prieto, M, y Klein, J., 2004. *Transdisciplinariedad y complejidad en el análisis social*. París: UNESCO.
- Cheng, H.M., 2015. *Physiology Question-Based Learning. Cardio, Respiratory and Renal Systems*. Springer.
- Clabby, C., 2013. Blood in Motion. Applied mathematician George Karniadakis models how diseases alter the body's circulation. *American Scientist*, 101(5), pp.386–389.
- Cosín-Aguilar, J. y Hernández-Martínez, A., 2013. La disposición de las fibras miocárdicas en una banda condiciona la morfología y la función del corazón. *Rev. Esp. Cardiol.*, 66(10), pp.768–770.
- Costa, M., Cygankiewicz, I., Zareba, W., Bayés de Luna, A., Goldberger, A.L. & Lobodzinski, S., 2006. Multiscale Complexity Analysis of Heart Rate Dynamics in Heart Failure: Preliminary Findings from the MUSIC Study. *Computers in Cardiology*, 33, pp.101–103.
- Cyberknop, L., Legnani, W., Pessana, F, y Armentao, R.L., 2013. Procesamiento no lineal de señales cardiovasculares: marco conceptual para la detección de patologías. *Proyecciones*, 11(2), pp.11–28.
- Davies, K.J.A., 2016. Adaptive homeostasis. *Molecular Aspects of Medicine*, 49, pp.1–7.
- Dabire, H., Mestivier, D., Jarnet, J., Safar, M.E. & Chau, N.P., 1998. Quantification of sympathetic and parasympathetic tones by nonlinear indexes in normotensive rats. *Am J Physiol*, 275, pp.H1290–7.

- Dai, S. & Schaeffer, D., 2010. Chaos for cardiac arrhythmias through a one-dimensional modulation equation for alternans. *Chaos*, 20(2), pp.023131–0231318.
- De Brouwer, S., Edwards, D.H. & Griffith, T.M., 1998. Simplification of the quasiperiodic route to chaos in agonist-induced vasomotion by iterative circle maps. *Am J Physiol*, 274, pp.H1315–26.
- De Pomposo, A., 2015. El concepto de enfermedad y la recuperación de la cientificidad en la medicina. En: Ruelas, E., Mansilla, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina. 2013-2014: Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: aplicaciones*. México: Academia Nacional de Medicina de México, Conacyt. pp.1–88.
- Denton, T.A., Diamond, G.A., Helfant, R.H., Khan, S. & Karagueuzian, H., 1990. Fascinating rhythm: a primer on chaos theory and its application to cardiology. *Am Heart J*, 120(6 pt 1), pp.1419–40.
- Descartes, R., [1641] 1977. *Meditaciones acerca de la filosofía primera, en las cuales se demuestra la existencia de Dios, así como la distinción real entre el alma y el cuerpo del hombre*. Traducción de V. Peña. Disponible en: [http://www.mercaba.org/Filosofia/Descartes/med\\_met\\_alfaguara.PDF](http://www.mercaba.org/Filosofia/Descartes/med_met_alfaguara.PDF) [consultado: 10.octubre.2018].
- Dua, S., Du, X., Sree, V. & Ahamed, T., 2012. Novel classification of coronary artery disease using heart rate variability analysis. *J. Mech. Med. Biol.*, 12(4), pp.12400171–1719.
- Echebarria, B. & Karma, A., 2007. Amplitude equation approach to spatiotemporal dynamics of cardiac alternans. *Phys. Rev. E*, 76(5): 051911. doi:10.1103/PhysRevE.76.051911.
- Fenton, F.H., 2016. *The Virtual Heart*. [online] Disponible en: <http://thevirtualheart.org> [consultado: 15.abril.2016].
- Fortrat, J., Levrard, T., Courcinous, S. & Victor, J., 2016. Self-Organization of Blood Pressure Regulation: Experimental Evidence. *Front. Physiol*, 7. doi:10.3389/fphys.2016.00112.
- Fresquet, J.L., 2011. La medicina en la Antigüedad clásica. [online] Disponible en: [Historia de la medicina](#). [consultado: 15.abril.2016].
- Gabrys, E., Rybaczuka, M. & Keddzab, A., 2005. Fractal models of circulatory system. Symmetrical and asymmetrical approach comparison. *Chaos, Solitons & Fractals*, 24(3), pp.707–715.
- Garfinkel, A., Spano, M.L., Ditto, W.L. & Weiss, J.N., 1992. Controlling cardiac chaos. *Science*, 257, pp.1230–5.
- Garfinkel, A., Chen, P., Walter, D., Karagueuzian, H., Kogan, B. & Evans, S., 1997. Quasi-periodicity and Chaos in Cardiac Fibrillation. *J. Clin. Invest.*, 99(2), pp.305–314.
- Gaztañaga, L., Marchilinski, F. y Betensky, B., 2012. Mecanismos de las arritmias cardiacas. *Rev Esp Cardiol*, 65(2), pp.174–185.
- Goldberger, A.L., Bhargava, V., West, B.J. & Mandell, A.J., 1985. On a mechanism of cardiac electrical stability. The fractal hypothesis. *Biophys J*, 48(3), pp.525–8.
- Goldberger, A.L., 1996. Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *Lancet*, 347, pp.1312–1314.
- Goldberger, A.L., Moody, G., Costa, M., 2016. *Variability vs. Complexity*. [online] Disponible en: <https://physionet.org/tutorials/cv/> [consultado: 10.noviembre.2018].
- Gonzalez, J.J., Cordero, J.J., Feria, M. & Pereda, E., 2000. Detection and sources of nonlinearity in the variability of cardiac R-R intervals and blood pressure in rats. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 279, pp.H3040–6.
- Goodwin, B., 2003. *Complejidad y caos*, (Redes-rtve, Capítulo 275, conducido por E. Punset). [video online] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=AJEsf0008AY> [consultado: 10.noviembre.2018].

- Govindan, R.B., Narayanan, K. & Gopinathan, M.S., 1998. On the evidence of deterministic chaos in ECG: surrogate and predictability analysis. *Chaos*, 8(2), pp.495–502.
- Greyson, C., 2010. Clifford. Ventrículo derecho y circulación pulmonar: conceptos básicos. *Rev. Esp. Cardiol.*, 63(1), pp.81–95.
- Grobelnik, B., 2008. *Blood Flow*. Postgraduate seminar. University in Ljubljana. Faculty of Mathematics and Physics. Disponible en: [Internet archive](#) [consultado: 26.octubre.2018].
- Guadalajara, J.F., 2003. *Cardiología*. Quinta edición. México, D.F.: Méndez Editores.
- Gutiérrez, C., 1992. Introducción a la teoría ergódica. *Pro Mathematica*, VI, nos.11-12.
- Gutierrez, P. y Hott, E., 2004. *Introducción al mundo fractal: Matemática*. 4o Medio Matemático. [online] Disponible en: <http://www.sectormatematica.cl/fractales/fractales.pdf>. [consultado: 10.mayo.2016].
- Hall, J., 2011. *Guyton y Hall Tratado de Fisiología Médica*. 12a. edición. Editorial Elsevier.
- Harvey, W., 1928. *Exercitatio Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus*. Translated from Latin by C.D. Leake. Springfield, Ill.: Charles C. Thomas Publisher. Disponible en: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.115852> [consultado: 10.octubre.2018].
- Hastings, H., Fenton, F., Evans, S., Hotomaroglu, O., Geetha, J., et al., 2000. Alternans and the Onset to ventricular fibrillation. *Physical Review E*, 62, pp.4043–4048.
- Hayano, J. & Yasuma, F., 2003. Hypothesis: respiratory sinus arrhythmia is an intrinsic resting function of cardiopulmonary system. *Cardiovascular Research*, 58(1), pp.1–9.
- Historia y Arqueología, 2015. *Los vasos canopos, la belleza de la muerte y el misterio del vaso*. [online] Disponible en: [Los vasos canopos - la belleza de la muerte](#). [consultado: 15.mayo.2016].
- Hubert, D., Mestivier, D., Jarnet, J., Safar, M. & Chau, N., 1998. Quantification of sympathetic and parasympathetic tones by nonlinear indexes in normotensive rats. *Am J Physiol*, 275(44), pp.H1290–H1297.
- ICD (International Classification of Diseases), 2016. International Stat. Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision (CIE 10). [online] Disponible en: <http://apps.who.int/classifications/icd10/browse/2016/en#/> [consultado: 10.noviembre.2018].
- Illaraza, H., Rodríguez, L., Salas, A., Illaraza, A., Rius, M., Barrera, C. y Chávez, R., 2013. Análisis del acoplamiento corazón-pulmón mediante el espectro de potencias. *Archivos de Cardiología de México*, 83(S3), p.19.
- Illaraza-Lomelí, H., 2015. La toma de decisiones en el proceso de salud-enfermedad. En: Ruelas, E., Mansilla, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina. 2013-2014: Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: aplicaciones*. México: Academia Nacional de Medicina de México, Conacyt. pp.173–195.
- Illaraza-Lomelí, H., et al., 2016. National Registry of Cardiac Rehabilitation Programs in Mexico II (RENAPREC II). *Arch Cardiol Mex.*, 87(4), pp.270–277.
- Iturralde T., P., 2008. *Arritmias cardíacas*. 3a. edición. México: McGraw Hill.
- Kleiger, R.E., Miller, J.P., Bigger, J.T. & Moss, A.R., 1987. Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol.*, 59(4), pp.256–262.
- Lei, H., Fedosov, D.A., Caswell, B. & Karniadakis, G.E., 2013. Blood flow in small tubes: quantifying the transition to the non-continuum regime. *J Fluid Mech*, 722, pp.214–239. doi: 10.1017/jfm.2013.91

- Lombardi, F., 2000. Chaos Theory, Heart Rate Variability, and Arrhythmic Mortality. *Circulation*, 101, pp.8–10.
- Lombardi, F., Sandrone, G., Mortara, A., Torzillo, D., La Rovere, M.T., Signorini, M.G. et al., 1996. Linear and nonlinear dynamics of heart rate variability after acute myocardial infarction with normal and reduced left ventricular ejection fraction. *Am J Cardiol.*, 77, pp.1283–1288.
- Luther, S., Fenton, F.H., Kornreich, B.G., Squires, A., Bittihn, P., Hornung, D. et al., 2011. Low-energy control of electrical turbulence in the heart. *Nature*, 475(7355), pp.235–9.
- Mancardi, D., Varetto, G., Bucci, E., Maniero, F. & Guiot, C., 2008. Fractal parameters and vascular networks: facts & artifacts. *Theor. Biol. Med. Model.*, 17(5), p.12.
- Mansilla, R., 2015. Nuevos paradigmas en la modelación de epidemias. En: Ruelas, E., Mansilla, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina. 2013-2014: Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: aplicaciones*. México: Academia Nacional de Medicina de México, Conacyt. pp.207–229.
- Martínez-Ezquerro, J.D. y Herrera, L.A., 2006. Angiogénesis: VEGF/VEGFRs como blancos terapéuticos en el tratamiento contra el cáncer. *Cancerología*, 1, pp.83–96.
- Masters, B.R., 2004. Fractal analysis of the vascular tree in the human retina. *Annu Rev Biomed Eng*, 6, pp.427–52.
- Moe, G.K., Rheinboldt, W.C. & Abildskov, J.A., 1964. A computer model of atrial fibrillation. *Am. Heart J.*, 67, pp.200–220.
- Morin, E., 1996. *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona: Gedisa.
- Moore, K.L., 1993. *Anatomía con orientación clínica*. Tercera edición. Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Nandiwada, D. & Dang-Vu, C., 2010. Transdisciplinary Health Care Education: Training Team Players. *Journal of Health Care for the Poor and Underserved*, 21, pp.26–34.
- Pandit, S.V. & Jalife, J., 2013. Rotors and the dynamics of cardiac fibrillation. *Circ. Res.*, 112(5), pp.849–62.
- Parthimos, D., Edwards, D.H. & Griffith, T.M., 1996. Comparison of chaotic and sinusoidal vasomotion in the regulation of microvascular flow. *Cardiovasc Res.*, 31(3), pp.388–99.
- Peng, C.K., Mietus, J., Hausdorff, J.M., Havlin, S., Stanley, H.E & Goldberger, A.L., 1993. Long-range anticorrelations and non-Gaussian behavior of the heartbeat. *Phys Rev Lett.*, 70(9), pp.1343–6.
- Perkiomaki, J.S., Zareba, W., Badilini, F. & Moss, A.J., 2002. Influence of atropine on fractal and complexity measures of heart rate variability. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 7, pp.326–31.
- Pino, L.M., 2004. La doctrina de los pulsos de Galeno en el siglo XVIII. *Estudios griegos e indoeuropeos*, 14, pp.267–284.
- Poon, C.S. & Merrill, C.K., 1997. Decrease of cardiac chaos in congestive heart failure. *Nature*, 389, pp.492–5.
- RAE (Real Academia Española), 2017a. Def. de complejo. *Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua*. [online] Disponible en: [dle.rae](http://dle.rae) [consultado: 4.octubre.2018].
- RAE (Real Academia Española), 2017b. Def. de latido. *Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua*. [online] Disponible en: [dle.rae](http://dle.rae) [consultado: 4.octubre.2018].
- Récamier, V., Izeddin, I., Bosanac, L., Dahan, M., Proux, F. & Darzacq, X., 2014. Single cell correlation fractal dimension of chromatin: a framework to interpret 3D single molecule super-resolution. *Nucleus*, 5(1), pp.75–84.

- Reyes Méndez, J.J., 1996. La teoría del caos y los fractales en la fisiología humana. Departamento de Atención a la Salud UAM-X. *Reencuentro*, 16, pp.44–52. Serie cuadernos. México, D.F.
- Rius-Suárez, M.D., 2015. Rehabilitación y complejidad. En: Ruelas, E., Mansilla, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina. 2013-2014: Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: aplicaciones*. México: Academia Nacional de Medicina de México, Conacyt. pp.197–205.
- Rodríguez, J., Prieto, S., Ortiz, L., Avilán, N., Álvarez, L., Correa, C. y Prieto, I., 2006. Comportamiento fractal del ventrículo izquierdo durante la dinámica cardíaca. *Rev. Colomb. Cardiol.*, 13(3), pp.165–170.
- Rodríguez, J., 2010. Entropía proporcional de los sistemas dinámicos cardíacos: Predicciones físicas y matemáticas de la dinámica cardíaca de aplicación clínica. *Rev. Colomb. Cardiol.*, 17(3), pp.115–129.
- Rong-Guan, Y., Jiann-Shing, S., Yin-Yi, H., Yu-Jung Wang, Shih-Chun, T., 2006. Detrended fluctuation analyses of short term heart rate variability in surgical intensive care units. *Biomed Eng Appl Basis Comm*, 18, pp.67–72. Disponible en: <https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.4015/S1016237206000130> [consultado: 10.octubre.2018].
- Rosado, J., 2006. Introducción. En: Ruelas, E., Mansilla, R. y Rosado, J., (coords.), *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica. Ensayos y modelos*. México: Secretaría de Salud, Instituto de Física-UNAM y CEIICH-UNAM. pp.1–9.
- Sabán Ruiz, J., 2012. *Personajes más relevantes de la patología cardiovascular*. Madrid: Editorial Diaz de Santos. Colección Monografías. Serie Medicina/Ciencias de la Salud.
- Sánchez-Quintana, D. y Yen Ho, S., 2003. Anatomía de los nodos cardíacos y del sistema de conducción específico auriculoventricular. *Rev Esp Cardiol*, 56(11), pp.1085–92.
- Schmidt-Nielsen, K., 1984. *Scaling: why is animal size so important?* New York: Cambridge University Press.
- Schmidt, J.A., Intaglietta, M. & Borgstrom, P., 1992. Periodic hemodynamics in skeletal muscle during local arterial pressure reduction. *J Appl Physiol*, 73(3), pp.1077–83.
- Sharma, V., 2009. Deterministic Chaos and Fractal Complexity in the Dynamics of Cardiovascular Behavior: Perspectives on a New Frontier. *The Open Cardiovascular Medicine Journal*, 3, pp.110–123.
- Takahashi, T., 2014. *Microcirculation in Fractal Branching Networks*. Tokio: Springer.
- Tapanainen, J.M., Thomsen, P.E., Køber, L., et al., 2002. Fractal analysis of heart rate variability and mortality after an acute myocardial infarction. *American Journal of Cardiology*, 90(4), pp.347–52.
- Torrent-Guasp, F., 1998. Estructura y función del corazón. *Rev. Esp. Cardiol.*, 51(2), pp.91–102.
- Torrent-Guasp, F., 2001. La mecánica agonista-antagonista de los segmentos descendente y ascendente de la banda miocárdica ventricular. *Rev. Esp. Cardiol.*, 54(9), pp.1091–1102.
- Trainini, J., Elencwajg, B., López-Cabanillas, N., Herreros, J., Lago, N. & Lowenstein, J., 2015. Propagación eléctrica en los mecanismos de torsión y succión en un corazón de tres tiempos. *Rev Argent Cardiol*, 83(5), pp.420–428.
- Turing, A.M., [1953] 1990. The chemical basis of morphogenesis. *Bull Math Biol*, 52: 153–197; discussion 117–152.
- Vesalius, A., 1543. *De humani corporis fabrica*. Basileae. [online] Versión digital en: [Universitätsbibliothek Basel](http://www.universitaetsbibliothek-basel.ch) [consultado: 4.octubre.2018].



- Villegas, M., Lifshitz, A. y Cocho, G., 2015. Enfermedades complejas, "un puente" entre paradigmas. En: Ruelas-Barajas, E. y Mansilla-Corona, R. (coords.) 2015. *Estado del arte de la medicina: las ciencias de la complejidad y la innovación médica*. México: Academia Nacional de Medicina-Conacyt, Editorial Intersistemas. pp.141-153.
- Werndl, C., 2009. What Are the New Implications of Chaos for Unpredictability? *Brit. J. Phil. Sci.*, 60, pp.195-220.
- West, G.B., Brown, J.H. & Enquist, B.J., 1999. The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science*, 284, pp.1677-9.
- Wiggers, C., 1942. Basic hemodynamic principles essential to interpretation of cardiovascular disorders. *Bull NY Acad Med*, 18(1), pp.3-17.
- Wolf, M.M., Varigos, G.A., Hunt, D. & Sloman, J.G., 1978. Sinus arrhythmia in acute myocardial infarction. *Med J Aust.*, 2(2), pp.52-53.
- Zamir, M., 2001. Fractal Dimensions and Multifractality in Vascular Branching. *Journal of Theoretical Biology*, 212(2), pp.183-190.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## LA COMPLEJIDAD TERMODINÁMICA DE LA MATERIA VIVA

Enrique Hernández-Lemus<sup>‡</sup>

J. Mario Siqueiros-García<sup>§</sup>

### INTRODUCCIÓN: ENTENDIENDO LA VIDA DESDE LA FÍSICA TÉRMICA

NADIE puede negar que la materia viva, con sus intrincados procesos entrelazados de maneras diversas e inesperadas, e imbuidos de una dinámica que al parecer siempre está cambiando y adaptándose, constituye de manera casi arquetípica lo que es un sistema complejo. Tampoco hay duda ninguna de que, a pesar de sus muchas peculiaridades, la vida es completamente consistente con las leyes de la física y la química y, de hecho, muchas de sus intrigantes propiedades son consecuencia directa de tales leyes. En particular, desde el punto de vista energético, una célula viva se puede entender como un sistema fuera del equilibrio térmico y que está aún evolucionando hacia su estado de máxima entropía.

Adicionalmente a estar fuera del equilibrio, la célula viva está continuamente intercambiando materia, energía e información con su entorno y posee además una característica que la hace diferente del resto de los ya de por sí complejos sistemas fuera de equilibrio termodinámico: *una célula es capaz de replicarse*. Para entender de qué manera ocurren estos fenómenos, de particular interés es el estudio de la manera en que tales sistemas llevan a cabo, precisamente, el intercambio de materia, energía e información con su entorno –objeto de estudio de la termodinámica fuera del equilibrio–, pues el conocimiento biológico contemporáneo indica que este intercambio subyace de forma fundamental a la manera en que la vida se mantiene y se reproduce.

Acaso la primera cosa que nos llama la atención de los seres vivos es su alto nivel de *organización*, tanto a nivel estructural como funcional. Esta organización es, de hecho, observable en escalas que van de lo molecular a lo ecológico. En las células vivas –las unidades funcionales por excelencia– es posible notar un alto grado de organización estructural que incluye la dinámica acoplada de miles de reacciones químicas, las complejas estructuras macromoleculares que la sustentan y los delicados y eficientes procesos de comunicación intra e intercelular. Todas

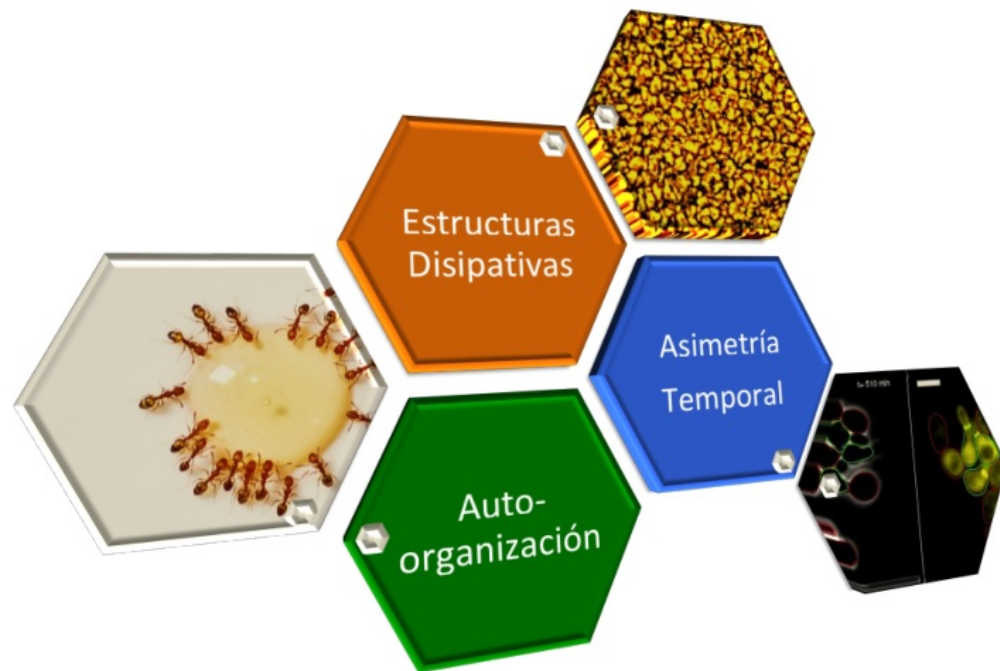
---

<sup>‡</sup> Genómica Computacional, Instituto Nacional de Medicina Genómica, México. / Centro de Ciencias de la Complejidad, UNAM, México. / Autor de correspondencia: ehernandez@inmegen.gob.mx

<sup>§</sup> Instituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y Sistemas, UNAM. / Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM, México.

estas estructuras requieren un constante flujo de energía del exterior, así como mecanismos *rectificadores* que contribuyan al adecuado manejo y distribución de tales in-flujos energéticos previniendo su degradación entrópica temprana.

Siendo sistemas abiertos, las células previenen (o más bien retrasan) la degradación entrópica de su reserva energética, mediante la combinación de arreglos estructurales complejos. dado que las células no pueden violar la segunda ley de la termodinámica, la manera en que pueden mantener niveles relativamente bajos de entropía se da al desarrollar altos niveles de organización estructural, incrementando así la entropía de sus alrededores, en lo que se ha dado por llamar *estructuras disipativas* (Prigogine & Nicolis, 1967; Prigogine & Lefever, 1968).



**Figura 1:** Irreversibilidad, estructuras disipativas y auto-organización: Conceptos básicos de la termodinámica irreversible relevantes en las ciencias de la vida. La irreversibilidad o asimetría temporal de los sistemas macroscópicos induce la llamada *flecha del tiempo*. La producción de entropía causada por los procesos irreversibles, en presencia de restricciones, puede dar lugar a la creación de *estructuras disipativas* que inducen la formación de patrones espacio-temporales responsables de las complejas morfologías en la materia viva. Las dinámicas de evolución de estos sistemas, bajo las restricciones inducidas por dichos patrones, pueden dar lugar a fenómenos de *auto-organización*.

Las inestabilidades que llevan a la formación de estructuras altamente ordenadas, a partir de fenómenos disipativos, fueron encontradas por el grupo de Ilya

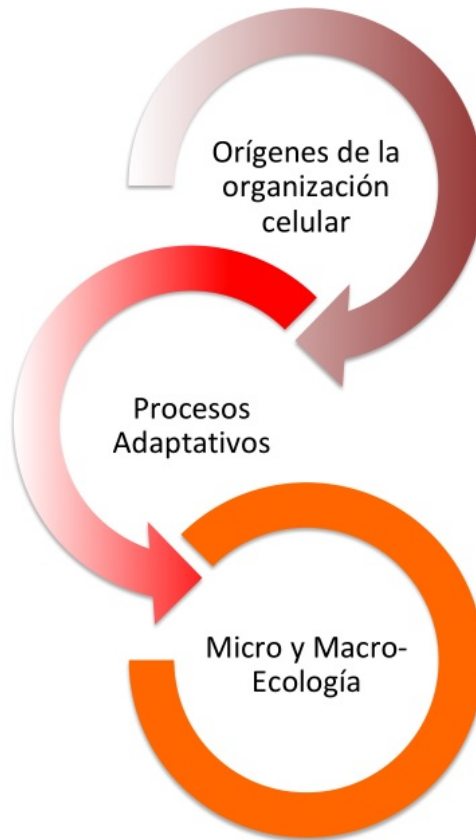
Prigogine en un trabajo pionero que le valió el Premio Nobel de Química de 1977 al propio Prigogine. En resumen, las células liberan en forma de calor parte de la energía que reciben del ambiente, incrementando la densidad de entropía de su entorno, posibilitando así mantenerse en estadios fuera de equilibrio a pesar de la formación de tales estructuras. De hecho, la aparente paradoja de que tales sistemas altamente disipativos pudieran al mismo tiempo formar estructuras complejas fue resuelta por el propio Prigogine y explicada a través del famoso principio de mínima producción de entropía (Glansdorff & Prigogine, 1964; Prigogine, 1965; Prigogine & Glansdorff, 1965).

En este capítulo examinaremos, pues, cómo la enorme complejidad de los sistemas biológicos puede ser descrita de una manera sistemática y completa (¡aunque no fácil!) por la termodinámica fuera del equilibrio. Introduciremos asimismo algunos elementos formales de la teoría termodinámica y proveeremos ejemplos de las bases termodinámicas de la vida. Por supuesto, en este breve espacio, las ideas serán mayormente introductorias, para incitar al lector a adentrarse al enorme *corpus* de literatura científica que hoy existe para intentar presentar la vasta complejidad de los sistemas vivos desde un marco teórico coherente.

#### LOS ORÍGENES CONCEPTUALES DE LA RELACIÓN VIDA-ENERGÍA

La termodinámica ha tenido un papel histórico importante en el recorrido científico de entender la vida y los procesos que le dan soporte. Aunque para los griegos la relación entre energía y vida era evidente, el estudio científico como lo entendemos ahora probablemente se remonta al trabajo de Ludwig Boltzmann a finales del siglo XIX (Schneider & Sagan, 2006). A lo largo del siglo XX existen igualmente avances sobresalientes en este sentido, como son los trabajos de Alfred Lotka, Erwin Schrödinger y James Lovelock (Kleidon, Malhi & Cox, 2010). Aun más, podemos afirmar que la relevancia de la termodinámica en biología, como un pilar fundamental, radica en que no se reduce a un único dominio fenomenológico. En esta sección haremos referencia a tres ámbitos biológicos en donde la termodinámica juega un papel central: 1) los procesos micro y macro ecológicos; 2) los mecanismos de organización celular para entender el origen de la vida, y 3) los procesos adaptativos y su relación con la evolución.

Cuando echamos una mirada en retrospectiva de la relación vida y termodinámica, encontramos que hay una serie de preocupaciones y preguntas que fueron y siguen siendo guía del proceso investigación. Tal vez la pregunta original y fundamental que detonó la investigación en esta línea fue: ¿por qué la vida aumenta en complejidad, en aparente contracción con la segunda ley de la termodinámica? Esa complejidad siempre ha sido motivo de asombro y fue tema de grandes discusiones a lo largo de los siglos XVII, XVIII y XIX. El impacto de la mecánica clásica en la *filosofía natural* fue fundamental para dar origen a un enfoque científico de la vida, así como para crear dos escuelas de pensamiento que, en cierto sentido, hemos heredado y hasta cierto punto seguimos reproduciendo. El mecanicismo y el vitalismo son estas escuelas en conflicto que intentaron dar cuenta del proble-



**Figura 2:** Tres ejes temáticos de la biotermodinámica: 1) micro y macro ecología, 2) orígenes de la organización celular, 3) procesos adaptativos.

ma del crecimiento o desarrollo del organismo y de la forma biológica. Estas dos escuelas son importantes para entender tanto los antecedentes conceptuales como las preguntas de investigación que se forjaron hacia finales del siglo XIX alrededor de la termodinámica.

El mecanicismo nació con referencia al trabajo de Newton y postulaba una forma de hacer investigación y proponer explicaciones que radicaban en una visión reduccionista de la vida. Para el mecanicismo, la vida podía ser perfectamente explicada a partir de la descomposición de sus elementos constitutivos. Este enfoque era reduccionista en la medida en que proponía que las características de la vida, principalmente su aparente direccionalidad de formas simples a formas complejas (del cigoto a la forma adulta), podía ser explicada por relaciones lineales entre los componentes del organismo. En respuesta al mecanicismo surgió el vitalismo que, desde un enfoque holista, argumentaba que lo vivo no puede ser reducido a sus

partes y que la cualidad de la vida era, en última instancia, el resultado de una fuerza vital: un *élan vital*.<sup>1</sup>

En estas tradiciones logramos identificar algunas de las raíces de la ciencia moderna. En un primer momento vemos reflejado el problema paralelo de emplear la mecánica newtoniana a las partes de un sistema para entender el comportamiento del todo, tal como sucede en los fenómenos de la termodinámica clásica: entre el comportamiento de las partículas de un gas y las propiedades globales como la temperatura y la presión (problema que posteriormente resolvió Boltzmann). Segundo, la discusión entre los enfoques reduccionistas de la genética y la biología molecular y los enfoques emergentistas de una biología de sistemas, heredera del organicismo y fundamentada en la perspectiva de sistemas complejos (Etxeberria & Umerez, 2006; Kaufmann, 1993). En suma, el problema de fondo ha sido poder establecer una relación causal, naturalista y materialista, de lo micro con lo macro.

La respuesta a esta conexión vino de Ludwig Boltzmann y el uso de la probabilidad en termodinámica. Fue el desarrollo de la mecánica estadística lo que condujo a Boltzmann a reflexionar sobre el extraño comportamiento de la vida. Para Boltzmann, quien conocía el trabajo de Darwin, le parecía contraintuitivo que mientras la segunda ley de la termodinámica predice que un sistema térmico tiende al equilibrio o al estado más probable, i.e. a un estado de “desorden”, la vida, por otro lado, aumenta su complejidad y adquiere estados de “orden” muy poco probables. Por ello, la intuición de Boltzmann (1886) fue que la “lucha” de los seres vivos era por la energía disponible.

En el siglo XX el trabajo de Boltzmann fue piedra angular para abordar la diversidad de fenómenos vinculados a lo vivo. Como lo hemos mencionado al inicio de esta sección, estos fenómenos tenían que ver con la organización de lo vivo, la evolución y los ecosistemas. Cronológicamente hablando, el primero en introducir la termodinámica como una herramienta conceptual para comprender la vida, y citando a Boltzmann, fue Alfred J. Lotka (1922a) con el principio de potencia máxima o *maximum power principle*.<sup>2</sup> Con este principio Lotka intentó conectar la noción de evolución darwinista con principios físicos. Estas ideas las desarrolló en dos artículos de 1922 donde concretamente decía que la selección natural favorece a aquellos organismos que tienen los medios más eficientes de captura de energía y que, en suma, eran más eficientes en capturar y transformar la energía de manera positiva para la preservación de la especie (Lotka, 1922a; 1922b).

Si bien esta idea es central, también es una condición para una propuesta aún más innovadora. Para Lotka la selección natural vinculada a la optimización de formas de acceder a energía disponible tenía un impacto directo en la organización de todo el sistema organismos-entorno (ahora diríamos ecosistema). Los organismos más exitosos en estos términos aumentan la masa orgánica que, a su vez,

<sup>1</sup> Kant consideraba que las propiedades de la vida no eran reducibles a los componentes del organismo y en la medida en que no fuera posible una explicación newtoniana mecanicista, la vida no podría ser explicada científicamente. De hecho, vaticinó que no habría “un Newton de la brizna de hierba” (Etxeberria & Umerez, 2006).

<sup>2</sup> Lotka cita *The mechanism of life*, de J. Johnstone, como un antecedente publicado en 1921 y con el cual es crítico.

incide en el flujo de energía por el sistema. La selección natural sería un principio organizador de todo el *sistema*, en la medida en que la interacción entre organismos eficientes en captura y transformación de energía en beneficio de su especie llevaría al sistema a un estado de flujo energético máximo:

To recapitulate: In every instance considered, natural selection will so operate as to increase the total mass of the organic system, to increase the rate of circulation of matter through the system, and to increase the total energy flux through the system, so long as there is presented an unutilized residue of matter and available energy.

This may be expressed by saying that *natural selection*<sup>3</sup> tends to make the energy flux through the system a maximum, so far compatible with the constraints to which the system is subject. (Lotka, 1922a, p.148)

Las ideas de Lotka tuvieron eco en el trabajo posterior de Howard T. Odum y Richard Pinkerton (1955). Si bien Lotka tenía una noción de que los procesos energéticos requerían una visión de todo el sistema ecológico, en realidad estaba pensando en el organismo. Odum y Pinkerton por su parte se centraron explícitamente en el nivel ecológico. Sobra decir que Odum en particular sigue teniendo un impacto de primer orden en ecología, particularmente en la ecología de sistemas. En este sentido, Odum se centró en pensar los ecosistemas desde el principio de potencia máxima el cual explicaba en los términos siguientes: “During self-organization, system designs develop and prevail that maximize power intake, energy transformation, and those uses that reinforce production and efficiency” (Odum, 1995). Esto significa que los ecosistemas o, para el caso, cualquier sistema natural, tiende a la máxima potencia y no a la máxima eficiencia. A una escala aún más macro, en 1965 Lovelock propone la idea de que la composición de la atmósfera está en un estado fuera de equilibrio termodinámico y que éste se debe en gran medida a la presencia de vida en el planeta (Lovelock, 1965). El trabajo de Lovelock llevó la relación termodinámica-vida a nivel planetario.

El principio de máxima potencia ha sido lo suficientemente relevante que Odum y otros científicos posteriores a él han propuesto que éste principio pudiera ser una cuarta ley de la termodinámica. Sin embargo, este no ha sido el único caso; el siglo XX estuvo lleno de ideas interesantes en tonos similares. Por mencionar algunos, el principio de mínima producción de entropía de Ilya Prigogine, el principio de producción máxima de entropía de Swenson seguido por Dewar y basados en el formalismo de Jaynes, etc. (Swenson, 1997; Dewar, 2003).

Un hito más en esta historia es el libro *What is Life?*, de Erwin Schrödinger, publicado en 1944 y resultado de una serie de charlas impartidas en 1943 en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublin, en el Trinity College, en Irlanda. El libro es conocido en gran medida porque en él Schrödinger sugiere la idea de cristales aperiódicos como una forma material de pensar la herencia, una idea previa y empática con la naturaleza de ADN, descubierto 9 años más tarde. La otra razón por la que el libro es relevante es porque el autor propone que los organismos no violan ninguna ley de la física pero que éstos están gobernados por una ley que

<sup>3</sup> Cursivas en el original.



“actualmente desconocemos”. Concretamente, Schrödinger se refiere a la aparente paradoja de que los organismos resisten a la degradación que dicta la segunda ley de la termodinámica. Su argumento va en el sentido de que en un sistema cerrado el sistema llegará a un punto de equilibrio térmico o máxima entropía, sin embargo, los sistemas abiertos (en un sentido termodinámico), pueden mantener de forma homeostática una *entropía negativa* y así conservar su organización.

La idea central de Schrödinger ha tenido gran impacto tanto en la investigación sobre el origen de la vida como en un sentido más filosófico sobre cómo definir lo vivo, puntos que sin duda se encuentran (Morowitz, 1968; Wicken, 1987). Diversos autores han argumentado que el origen de la vida, así como la complejización de la misma, no se puede explicar atendiendo exclusivamente a la teoría darwinista de selección natural. La vida en sus comienzos debió constituirse como redes auto-organizadas macromoleculares complejas capaces de mantenerse como sistemas abiertos y estructuras disipativas (Nicolis and Prigogine, 1977). La selección natural actuaría sobre esta clase de objetos primigenios; en otras palabras, la selección natural debería operar sobre una condición inicial (Ruiz-Mirazo, Peretó & Moreno, 2004; Ruiz-Mirazo and Moreno, 2015). El punto relevante es que *la selección natural no es un mecanismo creativo*, la creación debe tener otros posibles orígenes, algunos autores se han referido a los inicios de la vida en términos de ideas cercanas a la auto-organización y otros principios teleológicos.

En este curso de ideas, Jeremy England publicó un artículo en el que propone que la replicación, como propiedad básica de la vida, implica un aumento en la entropía. England argumenta que el valor mínimo de la razón de producción de calor depende de la razón de crecimiento, la entropía interna y la durabilidad del replicador (England, 2013). El trabajo de England es un ejemplo actual del papel de la termodinámica para entender el origen de la vida. Además, ofrece una formalización al argumento previamente discutido de que la evolución por selección natural debe tener un sustrato sobre el cual operar.

Una última área de aplicación de la termodinámica en la biología es, sin duda, el estudio de la evolución. Como hemos referido en distintos momentos de este texto, es inevitable que quien piense en biología y termodinámica no toque de manera explícita o implícita el tema de evolución. Y así lo hicieron Boltzmann, Lotka, Odum, Morowitz, Wicken y muchos otros más.

También es importante recordar que el papel que jugó el trabajo de Prigogine y Nicolis en la biología es innegable. Sin duda abrió una serie de posibilidades que previamente habían sido apenas vislumbradas. En la década de los ochenta e inicios de los noventa del siglo pasado, para muchos científicos el neodarwinismo<sup>4</sup> estaba en crisis. Esa crisis consistía en los límites que tiene la selección natural como el mecanismo adaptativo por excelencia. Muchos biólogos, físicos e incluso computólogos, con apoyo en la termodinámica de los sistemas fuera del equilibrio, las herramientas teóricas de la incipiente disciplina de los sistemas complejos, la teoría

---

<sup>4</sup> El neodarwinismo es el resultado de la articulación o síntesis de la genética clásica con la estadística. Esta síntesis tuvo lugar en las décadas de 1930, 1940 y 1950. Para profundizar en este tema se pueden revisar los trabajos clásicos de Mayr (1982) y Gould (2002).

de la información, teoría del caos, entre otras, comenzaron a argumentar que los procesos de auto-organización son fundamentales para entender las adaptaciones y la evolución en general (Wicken, 1987, 1989; Brooks & Wiley, 1986; Weber, Depew & Smith, 1988; Kaufmann, 1993; Weber & Depew, 1996). Para resumir, la idea en este caso es que la auto-organización propone y la selección natural dispone (Weber & Depew, 1996; Batten, Salthe & Boschetti, 2008).

De esta historia hay mucho que aprender. Es una historia de cómo se hace ciencia y de la fecundidad de las ideas. La termodinámica, como lo anunciamos desde el inicio de este texto, trata de los aspectos más fundamentales de la naturaleza y por ello de los más fascinantes. Su presencia en la biología está justificada porque toca las fibras más sensibles de la disciplina: la conexión entre las partes y el todo, y porque dicta la flecha del tiempo.

#### TERMODINÁMICA FUERA DEL EQUILIBRIO

Para comenzar estableceremos el marco teórico de la termodinámica fuera del equilibrio, de tal manera que éste sirva de sustento a la discusión posterior. Una de las bellezas de la teoría termodinámica es su generalidad y elegancia formal. Como consecuencia, el marco teórico que describiremos en esta sección es aplicable para el estudio de la complejidad termodinámica de los sistemas fuera del equilibrio, vivos o no. Sin embargo, como discutiremos posteriormente, es probablemente en la materia viva en la que la fuerza del formalismo termodinámico se muestra en todo su esplendor.

#### Irreversibilidad y simetría

El estudio de las propiedades fisicoquímicas de los sistemas vivos es, desde hace bastante tiempo, una de las actividades científicas en que más se ha trabajado para acercarnos al entendimiento de la realidad que nos circunda. Resulta interesante, pues, que la estructura constitutiva de tales sistemas biofísicos (esencialmente microscópica), tenga relación directa con la manera en que estos sistemas se comportan como tales; es decir, con sus propiedades macroscópicas u observables. La determinación de esta deseada relación entre estructura y propiedades es el objeto principal de estudio de las ciencias fisicoquímicas y puede llevarse al cabo a partir de enfoques diversos, desde los tratamientos cuasiquímicos de la materia y sus modelos clásicos, hasta los tratamientos mayormente enfocados hacia la biofísica básica ya sea mediante sus enfoques cuántico, probabilístico, estocástico u otros.

El estudio de la naturaleza viva nunca podría estar completo sin la consideración de la termofísica. En el estudio de los fenómenos fisicoquímicos es necesario tomar en cuenta su temperatura y entropía, en adición a los parámetros no térmicos. Además, la termofísica posee uno de los cuestionamientos más excitantes de la física teórica: ¿cómo es posible reconciliar la irreversibilidad de los procesos naturales con la mecánica reversible que gobierna a los constituyentes elementales (partículas microscópicas) de los sistemas térmicos?

Esta pregunta aún está abierta, al parecer los esfuerzos más fructíferos para responderla provienen de ramas relativamente recientes de la física teórica, tales como la mecánica estadística para sistemas fuera de equilibrio y la termodinámica de procesos irreversibles. A principios del presente siglo hubo algunos intentos para responder a tal cuestión en el contexto general de los sistemas físicos, provenientes de los matemáticos; logros muy importantes en este sentido fueron los trabajos de Poincaré, Kolmogorov, Noether, Goldstone y Weyl (ver por ejemplo Callen, 1985); pero sus conclusiones, aunque elegantes y rigurosas, resultaron ser poco fructíferas en dar una explicación físicamente satisfactoria al fenómeno de asimetría entre lo macro y lo micro.

## Fenomenología

El primer paso en la aplicación de un formalismo termodinámico a un sistema físico particular es la elección del conjunto básico de variables consideradas apropiadas para la descripción macroscópica de un estado del sistema. La elección de estas variables básicas es consecuencia de una gran intuición física por parte del investigador, asistida frecuentemente por el procedimiento (debido a Bogoliubov) de la *contracción* de la descripción basado en una jerarquía de órdenes de magnitud en los tiempos de relajación asociados a los diversos mecanismos de disipación de un proceso real. Además de esto es necesario, en general, introducir una hipótesis *ad hoc* de evolución disipativa externa vía fuentes conocidas como *preparación de la condición inicial del sistema* (Madureira, Vasconcellos & Luzzi, 1998a; Madureira, et al., 1998b).

La herramienta proporcionada por la termodinámica clásica ha resultado muy útil para la caracterización de los estados de equilibrio y sus aplicaciones son muy amplias. Sin embargo, debe reconocerse que nuestro principal interés recae en la caracterización de procesos más que de estados, particularmente en los valores de las rapidezces de los procesos físicos reales (recordemos que la termodinámica clásica puede aportar información sobre procesos físicos cuasi-estáticos que no se presentan en la naturaleza, i.e. son fuertes abstracciones; caracterizándolos mediante el efecto neto producido por el cambio de un estado inicial a uno final correspondientes con los del proceso físico real).

El equilibrio es un estado singular en la *variedad* de estados fuera de equilibrio a través de los cuales un sistema evoluciona en el tiempo y en el espacio, desde un estado compatible con las condiciones iniciales y de frontera. Un estudio completo debe incluir a todo estado, para lo cual se necesitan los métodos de la termodinámica de procesos irreversibles.

La termodinámica de los procesos irreversibles ha ido evolucionando en la medida en que se han ido descubriendo una serie de patrones generales de comportamiento entre sistemas físicos en apariencia muy disímiles. Uno de los primeros casos lo representa el teorema de Curie, que restringe el acoplamiento entre flujos y fuerzas termodinámicas representativas a aquellos procesos irreversibles de orden tensorial similar (De Groot & Mazur, 1984).

Este teorema nos dice que en dos procesos termodinámicos de naturaleza tensorial diferente no pueden presentarse acoplamientos; por ejemplo, los procesos de difusión isotrópica de materia, que representan fuerzas vectoriales no se acoplan, por ejemplo, con los procesos de disipación viscosa ya que éstos están caracterizados por el tensor de esfuerzos. Sin embargo, el flujo isotrópico de calor y el flujo isotrópico de materia o el flujo eléctrico sí se acoplan dando lugar a los llamados efectos cruzados, tales como termodifusión o electroforesis. De la misma forma, se han derivado fuertes teoremas mecánico-estadísticos que son la base de la teoría de respuesta lineal.

La termodinámica de los procesos irreversibles es una rama de la física teórica que, aunque relativamente reciente, ha logrado avances importantes en el entendimiento de la naturaleza. Se han ido descubriendo una serie de “simetrías ocultas de la naturaleza” o patrones más generales de comportamiento entre sistemas físicos en apariencia muy disímolos. La primera de estas simetrías fue señalada, como se ha dicho anteriormente, por Curie.

Otra simetría, tal vez más importante, fue descubierta por Lars Onsager en la década de los treinta a partir de las leyes mecánico-estadísticas de balanceo detallado, se le conoce como teorema de reciprocidad de Onsager y nos habla acerca de la simetría de la matriz de coeficientes de transporte.<sup>5</sup>

En un trabajo fundamental para la termodinámica de los procesos irreversibles, Lars Onsager demostró que los efectos cruzados son idénticos  $L_{ij} = L_{ji}$ . Por ejemplo, el efecto que una variación unitaria en el gradiente de temperatura genera en el flujo de masa es de igual magnitud al de un gradiente unitario de concentración genera en el flujo de calor; estas relaciones se conocen como relaciones de reciprocidad de Onsager, cuando la expresión para la producción de entropía puede ser puesta en una forma “canónica” (García-Colín, 1990).

## Procesos irreversibles y compensación

La termodinámica se ocupa de la estructura general de los llamados *sistemas de Schottky* que están definidos por un dominio moviéndose en el espacio e intercambiando calor, trabajo y materia con sus alrededores. Particularmente interesante es el tratamiento de un conjunto de sistemas de Schottky suficientemente pequeños, cada uno de los cuales distinguimos por su posición en el espacio y una coordenada temporal; estos subsistemas intercambian calor, trabajo y materia entre sí hasta formar un sistema que sea perceptible macroscópicamente. Al estudiar tales sistemas obtenemos lo que se llama una *formulación de campo de la termodinámica*. De acuerdo con algunos investigadores, el objetivo de tal descripción termodinámica del continuo es la determinación de los *campos asociados* (Muschik, Papenfuss & Ehrentraut, 2001).

<sup>5</sup> La matriz de transporte de Onsager representa a todos aquellos coeficientes que caracterizan a los procesos disipativos y a las fluctuaciones en el sistema, los elementos de la diagonal de esta matriz representan a los efectos termodinámicos “directos” (por ejemplo, flujo de masa relacionado con gradientes de concentración), mientras que los elementos no-diagonales representan a los “acoplamientos”, (por ejemplo el flujo de masa causado por gradientes de temperatura o de campo eléctrico).



**Figura 3:** Simetrías y asimetrías en la termodinámica fuera del equilibrio: 1) Asimetría temporal entre la reversibilidad de los procesos microscópicos y la irreversibilidad de los sistemas macroscópicos. 2) La simetría de Curie que establece que los acoplamientos termodinámicos fuera del equilibrio ocurren únicamente entre cantidades de la misma naturaleza tensorial. 3) Las relaciones de reciprocidad de Onsager, un hito en el desarrollo de la termodinámica, implican que los efectos termodinámicos causados en un campo por la perturbación en otro son simétricos ante el intercambio de tales campos.

Por ejemplo, en las teorías termodinámicas llamadas extendidas, son campos asociados no sólo los campos conservados (masa, energía, ímpetu) sino también el flujo de calor y el tensor de esfuerzos entre otros. Las ecuaciones de movimiento para los campos asociados son las ecuaciones de balance que son válidas para materiales arbitrarios. Éstas no forman un conjunto cerrado de ecuaciones diferenciales, por lo que a fin de lograr cerradura es necesario introducir *relaciones constitutivas* las cuales dependen del tipo de material bajo consideración.

Resulta, pues, necesario distinguir entre las ecuaciones generales de balance válidas para materiales arbitrarios y las ecuaciones de balance una vez que han sido suplementadas con las relaciones constitutivas necesarias que han perdido ya su carácter general, que suelen ser llamadas *balances en el espacio de estados*. Así,

el espacio de estados es el dominio de las ecuaciones constitutivas. Los balances pueden ser de tipo global o local. Las ecuaciones globales de balance representan la formulación matemática del hecho de que una cantidad extensiva en un cierto volumen puede cambiar por producción, por adición o por un flujo a través de la frontera del sistema (la adición a diferencia de la producción puede ser eliminada si se realiza una partición adecuada).

A partir de estas ecuaciones globales de balance es posible obtener expresiones locales derivadas mediante la aplicación del teorema de transporte de Reynolds. Estos balances locales son las ecuaciones diferenciales que determinan la evolución de los campos asociados.

Un sistema de Schottky  $G(t)$  interactúa con su entorno mediante intercambio de calor, trabajo y material a través de su frontera  $\partial G$ . La ecuación global de balance sobre  $G(t)$  de alguna cantidad extensiva arbitraria con densidad específica  $\psi$ , flujo  $\bar{J}^\psi$ , densidad de producción  $\pi^\psi$ , densidad de adición  $\sigma^\psi$  y densidad de superficie sobre la interfase  $F(t)$  de  $G(t)$   $\varphi^\psi$  está dada por:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{G(t)} \rho(\vec{x}, t) \psi(\vec{x}, t) dV &= - \oint_{\partial G(t)} \bar{J}^\psi(\vec{x}, t) \cdot d\vec{a} \\ &+ \int_{G(t)} (\pi^\psi(\vec{x}, t) + \sigma^\psi(\vec{x}, t)) dV \\ &+ \int_{F(t)} \varphi^\psi(\vec{x}, t) da \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $\rho(\vec{x}, t)$  es el campo de densidad de masa,  $d\vec{a} = \hat{n} da$ , siendo  $\hat{n}$  el vector normal unitario exterior a la superficie  $\partial G$  de  $G(t)$ ;  $\pi^\psi(\vec{x}, t)$  y  $\sigma^\psi(\vec{x}, t)$  son densidades de bulto. A fin de expresar de manera más conveniente los términos de flujo y fuentes resulta sumamente útil el llamado teorema de transporte de Reynolds que establece lo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{G(t)} \Phi(\vec{x}, t) dV &= - \int_{G(t)} \left( \frac{\partial}{\partial t} \Phi(\vec{x}, t) + \nabla \cdot [\vec{w}(\vec{x}, t) \Phi(\vec{x}, t)] \right) dV \\ &- \int_{F(t)} |[\Phi(\vec{x}, t) (\vec{u}(\vec{x}, t) - \vec{w}(\vec{x}, t))] \cdot d\vec{a} \end{aligned} \quad (2)$$

Para alguna densidad  $\Phi(\vec{x}, t)$ ,  $\vec{w}(\vec{x}, t)$  es el campo de velocidades sobre  $G(t)$  y  $\vec{u}(\vec{x}, t)$  es la velocidad de una interfase  $F(t)$  en  $G(t)$  a la cual las discontinuidades, producción o adición, pueden ocurrir. Fuera de  $F(t)$  todas las cantidades son diferenciables y todos los campos en  $F(t)$  y  $G(t)$  son acotados. El símbolo en corchetes raros  $[[z]]$  significa la diferencia de la propiedad  $z$  a un lado y otro de la interfase.

Si elegimos  $\Phi(\vec{x}, t) = \rho(\vec{x}, t) \psi(\vec{x}, t)$ :

$$\begin{aligned}
 & \int_{G(t)} \left( \frac{\partial}{\partial t} [\varrho(\vec{x}, t)\psi(\vec{x}, t)] + \nabla \cdot [\vec{w}(\vec{x}, t)\varrho(\vec{x}, t)\psi(\vec{x}, t)] \right) dV \\
 &= - \oint_{\partial G(t)} \bar{J}^\psi(\vec{x}, t) \cdot d\vec{a} + \int_{G(t)} (\pi^\psi(\vec{x}, t) + \sigma^\psi(\vec{x}, t)) dV \\
 &+ \int_{F(t)} (\varphi^\psi(\vec{x}, t) + |[\varrho(\vec{x}, t)\psi(\vec{x}, t)(\vec{u}(\vec{x}, t) - \vec{w}(\vec{x}, t))] \cdot \hat{n}|) da \quad (3)
 \end{aligned}$$

Dado que en esta ecuación todas las derivadas están evaluadas bajo integrales, gracias al teorema de transporte de Reynolds nos es posible escribir balances locales.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varrho\psi] + \nabla \cdot [\vec{w}\varrho\psi + \bar{J}^\psi] - \pi^\psi - \sigma^\psi = 0 \quad (4)$$

$$\varphi^\psi + |[\varrho\psi(\vec{u} - \vec{w}) - \bar{J}^\psi]| \cdot \hat{n} = 0 \quad (5)$$

Tanto el balance como la *condición de salto* o discontinuidad en la interfase son válidos para una región arbitraria  $G(t)$  y una interfase arbitraria  $F(t)$ .

#### LOS ESPACIOS DE ESTADOS Y LA CLASIFICACIÓN TERMODINÁMICA

A fin de describir diferentes materiales necesitamos ecuaciones constitutivas, o, desde una formulación más general, necesitamos conocer las transformaciones constitutivas para insertarlas en las ecuaciones de balance que resultarán entonces formar un sistema cerrado de balances en el espacio de estados. El dominio de estas transformaciones será entonces el espacio de estados del sistema. En general, los campos asociados no son suficientes para determinar el espacio de estados, ya que las ecuaciones constitutivas pueden también depender de las derivadas de los campos asociados. Este hecho es tomado particularmente en cuenta en las termodinámicas extendidas. Para obtener las derivadas de las cantidades constitutivas requerimos el conocimiento del dominio de las transformaciones constitutivas. Este dominio, como hemos dicho, es diferente del dominio de los campos asociados y depende de los materiales bajo consideración. Por lo tanto, la elección del espacio de estados determina una cierta *clase de materiales*.

Por otro lado, además de los campos asociados y sus derivadas, el espacio de estados puede incluir variables adicionales, frecuentemente llamadas *variables internas*  $\alpha(\vec{x}, t)$  para las cuales son necesarias ecuaciones adicionales de movimiento, llamadas ecuaciones de cambio (*rate equations*). Hay, sin embargo, dos puntos sobre los cuales es necesario llamar la atención: por un lado, está el hecho de que el espacio de estados incluye variables *independientes*. En un punto los valores de los campos y sus correspondientes gradientes son variables independientes. Esta independencia de los valores de los campos y sus gradientes es cierta sólo de manera local. Por ejemplo, los valores de dos diferentes densidades másicas  $\varrho_1$  y  $\varrho_2$  no pueden coincidir en todo punto si sus gradientes son diferentes.

Además, está el hecho de que las variables que recorren el espacio de estados no sólo dependen del material específico sino que, teorías termodinámicas diferentes utilizan espacios de estados especiales. Por lo tanto, la elección del espacio de estados permite la clasificación de diferentes descripciones termodinámicas. Así, para un espacio de estados dado, las funciones constitutivas pueden ser escritas de manera sistemática mediante la utilización de ciertos teoremas de representación (ver, por ejemplo, Wang, 1970).

Las propiedades materiales en  $(\vec{X}, t)$  no dependen solamente de las variables del espacio de estados del mismo *evento*  $(\vec{X}, t)$ . Tales propiedades son, en general, no locales en el tiempo y en la posición (Truesdell & Noll, 2004). La no-localidad en la posición puede ser tomada en cuenta (de manera aproximada) al incluir gradientes en el espacio de estados. La no-localidad en el tiempo depende de la elección del espacio de estados. Si el espacio de estados es suficientemente grande, entonces puede ser posible una descripción local en el tiempo. Si el espacio de estados elegido es muy pequeño, es necesario describir al material mediante una transformación constitutiva no-local en el tiempo, debido a que en este espacio el material muestra efectos *de retardo*. De acuerdo con la clasificación de Muschik, Papenfuss & Ehretraut (2001) tenemos lo siguiente:

*Definición:* Un espacio de estados es llamado *grande* si las propiedades materiales  $\mathcal{M}$  están definidas mediante mapas locales en el tiempo.

$$\mathcal{M} : z(t) \mapsto M(t), \forall t \quad (6)$$

Si las transformaciones constitutivas son no-locales en el tiempo, se hacen necesarias dos definiciones adicionales:

*Definición:* Para un tiempo fijo  $t$  y  $s \in \mathfrak{R}; s \geq 0$  llamamos a  $z^t(s)$  la *historia del proceso*  $z(\cdot)$  entre  $t - \tau$  y  $t$ :

$$z^t(s) = z(t - s); s \in [0, \tau] \quad (7)$$

*Definición:* Un espacio de estados es llamado *pequeño* si las propiedades materiales  $\mathcal{M}$  están definidas mediante mapas definidos sobre las historias de los procesos.

$$\mathcal{M} : z^t(\cdot) \mapsto M(t), \forall t \quad (8)$$

Consideremos ahora uno de los posibles casos, el de un mapa constitutivo definido en un espacio de estados pequeño, pero en el cual la dependencia del funcional constitutivo en la historia del proceso  $z(\cdot)$  es lineal. Podemos escribir:

$$M(t) = \int_0^\tau m(t - \vartheta) z(t - \vartheta) d\vartheta \quad (9)$$

Donde  $m$  es un kernel integral que describe los efectos de retraso del sistema, por ejemplo, memoria desvaneciente.



## Termodinámica irreversible lineal

La termodinámica irreversible lineal (TIL) es una teoría fuera de equilibrio que sigue esquemas muy similares a los anteriormente mencionados en su formulación de campo. Sin embargo, para obtener esta teoría es necesario hacer las siguientes suposiciones:

- El espacio de estados de la TIL es el subespacio de equilibrio. A esta suposición de que el subespacio de equilibrio es suficiente para describir propiedades fuera de equilibrio se le llama la *hipótesis de equilibrio local* (Roos, 1993). Los valores de estos campos difieren entre un elemento de volumen y otro, describiendo de esta manera una situación fuera de equilibrio. Los gradientes o derivadas temporales no están incluidos en el espacio de estados.
- Para sistemas monocomponentes se presupone que el transporte de entropía es causado sólo por transporte de calor, por lo cual la densidad de flujo de entropía está dada por:

$$\vec{\Phi} = \frac{1}{T} \vec{q} \quad (10)$$

- Aun en el caso fuera de equilibrio, la derivada temporal de la densidad de entropía satisface la relación de Gibbs de equilibrio (García-Colín, 1990):

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{p}{\rho^2 T} \frac{d\rho}{dt}; \quad \frac{d}{dt} := \frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot \quad (11)$$

- Dadas la ecuación de Gibbs y las ecuaciones de balance para la masa y la energía interna, es posible derivar una expresión para la producción de entropía, la cual tiene la forma de una suma de productos de fuerzas y flujos  $\vec{J}_i$  y  $\vec{X}_i$

$$\sigma = \sum_i \vec{J}_i \odot \vec{X}_i \geq 0 \quad (12)$$

- Se supone que los flujos y las fuerzas están relacionados por leyes constitutivas lineales (De Groot & Mazur, 1984):

$$\vec{J}_i = \sum_k L_{ik} \vec{X}_k \quad (13)$$

- En general, un flujo termodinámico está causado no sólo por la fuerza termodinámica correspondiente (del mismo índice) sino también por todas las otras fuerzas, debido a efectos de acoplamientos cruzados.

- Las relaciones recíprocas de Onsager-Casimir aplican, es decir:

$$L_{ik}(\vec{B}, \vec{\omega}, \dots) = \epsilon_i \epsilon_k L_{ki}(-\vec{B}, -\vec{\omega}, \dots) \quad (14)$$

Las cantidades  $(\vec{B}, \vec{\omega})$  deben transformarse de tal manera que la densidad de fuerza sea par ante una reflexión del movimiento ( $\vec{B}$  es la inducción magnética,  $\vec{\omega}$  la velocidad angular, etc.). Las  $\epsilon'_k$ s se determinan por las propiedades de transformación de las fuerzas termodinámicas ante una reflexión del movimiento:

$$X_k(\vec{B}, \vec{\omega}, \dots) = \epsilon_k X_k(-\vec{B}, -\vec{\omega}, \dots) \quad (15)$$

Las relaciones recíprocas de Onsager-Casimir pueden ser derivadas tanto a partir de argumentos estadísticos como fenomenológicos (Reif, 2009; Muschik, 1977). Debido a la aplicación de relaciones constitutivas lineales, la producción de entropía es una forma cuadrática en las fuerzas, por lo que la segunda ley de la termodinámica requiere que  $L_{ik}$  sea una matriz positiva definida.

Como ya se ha mencionado, la TIL se basa de manera muy especial en la llamada *hipótesis de equilibrio local*. Al respecto de esta hipótesis hay dos declaraciones que pueden venir a nuestra mente cuando pensamos en la definición de *equilibrio local*: *Todo el mundo sabe lo que significa equilibrio termodinámico local*; o también: *No se ha dado, hasta ahora, una definición realmente satisfactoria del equilibrio termodinámico local*. Aunque ambas posiciones pueden ser defendidas bajo ciertas condiciones, es necesario destacar ciertas sutilezas que frecuentemente son pasadas por alto al respecto.

En el caso general un sistema macroscópico (un conjunto de sistemas Schottky) es definible sólo si consideramos su estado termodinámico. Ahora bien, si iniciamos nuestra consideración partiendo de consideraciones *galileanas* de teoría de grupos al definir el concepto de medio continuo, tenemos expresiones de campo local que involucran a las variables del espacio termodinámico de estados, pues no es posible evadir la noción de energía interna (véase Roos, Sen & Steinitz, 1993).

De manera similar a como se han establecido las relaciones entre las variables de equilibrio, han surgido expresiones fuera del equilibrio tales como la ley de Fick y la ley de Fourier. Sin embargo, estas exitosas relaciones fenomenológicas, cercanas en espíritu a la teoría de respuesta lineal, presuponen tácitamente que el medio bajo consideración puede ser considerado como un sistema termodinámico en equilibrio *localmente*, esto es, se asume que las cantidades utilizadas para describir sistemas en equilibrio térmico existen en cada punto, es decir, son funciones continuas del espacio y del tiempo.

Es importante hacer notar que no todos los sistemas macroscópicos pueden ser considerados sistemas continuos, existen muchos casos en los que es necesario

tomar en cuenta la estructura de las partículas (o agregados de éstas) que constituyen al sistema. Esto nos lleva a plantearnos la siguiente cuestión: *¿Bajo qué circunstancias es posible extraer la visión de un medio continuo partiendo de la descripción de partículas (o subsistemas formados por agregados de éstas)?*, esto es: *¿Cómo podemos definir la noción de equilibrio termodinámico local desde el punto de vista de la mecánica estadística?*

Para la mecánica estadística clásica (de equilibrio) los estados de equilibrio están definidos por la condición KMS (Kubo-Martin-Schwinger) clásica o cuántica (Kubo, 1957; Martin & Schwinger, 1959).<sup>6</sup> Para sistemas finitos ésta implica los estados de Gibbs. Para sistemas infinitos la validez del axioma de equilibrio dado por la condición KMS se confirma por el éxito en reproducir los resultados de la termostática y por los teoremas de Haag, Kastler & Trych-Pohlmeyer (1974) y de Pusz & Woronowicz (1978) por ejemplo.

El carácter estacionario y la estabilidad dinámica son los requerimientos mínimos para que un estado sea llamado *de equilibrio*; además, para validarlo como tal, se hace necesario rephrasar para éste la segunda ley de la termodinámica en su enunciado de Kelvin del modo siguiente: *No existen procesos cíclicos que conviertan calor en trabajo mecánico si el estado del sistema obedece la condición KMS*. Por otro lado, la frontera que separa las regiones de validez e invalidez de la hipótesis de equilibrio local es frecuentemente difusa. Esto puede ser claramente ejemplificado con el fenómeno de turbulencia en hidrodinámica.

Las ecuaciones de Navier-Stokes de la hidrodinámica son una consecuencia directa de los postulados de la TIL. Estas ecuaciones, aun en el caso de un fluido isotérmico, tienen un término no lineal, el término inercial  $\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}$  (donde  $\vec{u}$  es la velocidad del fluido).<sup>7</sup> Muchos autores claman que este término por sí solo es suficiente para tomar en cuenta la turbulencia. En el caso de que esto fuese cierto, la turbulencia, que es un ejemplo típico de un sistema *lejos del equilibrio*, sería completamente consistente con la hipótesis de equilibrio local. Por lo que surgiría la pregunta adicional: *¿qué tan lejos del equilibrio es la hipótesis de equilibrio local una suposición correcta?*

La hipótesis de equilibrio local (HEL) ha sido entendida de muy diversas maneras, desde su significado inicial basado en los estudios intuitivos de Celsius y Fahrenheit (Eu & García-Colín, 1996), quienes conceptualizaron el significado de la temperatura al imaginar el bulbo de un termómetro como indicador de una lectura estable de la temperatura una vez habiéndose establecido un equilibrio térmico entre la sustancia en el bulbo y sus alrededores. Pasando por las ideas de los fundadores de la termodinámica lineal de procesos irreversibles (Onsager, por un lado, y Prigogine, Meixner, De Groot y Mazur, por otro) quienes intentaron dar a esta idea intuitiva una definición en términos matemáticos más precisos.

A este respecto, las ideas de Hilbert, Chapman y Enskog acerca de las soluciones *normales* de la ecuación de Boltzmann (Chapman and Cowling, 1970) en teoría

<sup>6</sup> En relación con la hipótesis de equilibrio local, ver Hefling, 1994; para un análisis en el contexto de la termodinámica irreversible extendida véase Hernández-Lemus y Estrada-Gil, 2008.

<sup>7</sup> Para una revisión de las limitaciones de la TIL véase García-Colín & Uribe, 1991.

cinética de los gases, se vieron influenciadas por la hipótesis de equilibrio local. Su papel específico en tales métodos de solución fue comprendido mucho después, ya que metodologías similares fueron incluso utilizadas para derivar ecuaciones macroscópicas a partir de las ecuaciones de Liouville clásicas o cuánticas para procesos fuera del equilibrio.

Debido a esta problemática, en las situaciones en las que la HEL no se cumple, se ha buscado extender la teoría de procesos irreversibles, ya sea al abandonar la relación lineal existente entre flujos y fuerzas termodinámicos o bien al abandonar la propia HEL, lo que por otro lado también cambia el sentido de la relación lineal flujos-fuerzas, pues los conceptos mismos de flujo y fuerza pierden su significado usual. En el primer caso, son dignos de destacar los logros de Prigogine (1949) quien buscó obtener las ecuaciones de la TIL a partir de la solución de Chapman y Enskog de la ecuación de Boltzmann. Cuando se lleva el cálculo hasta segundo orden en el parámetro de uniformidad (Grad, 1958), la entropía local desaparece, ya que la entropía ahora depende no sólo de las variables conservadas, sino también de los gradientes de las variables intensivas; y las relaciones constitutivas lineales (a veces llamadas expresiones de Burnett) de orden superior en los gradientes ya no están relacionadas de manera simple con los flujos. Este hecho fue reexaminado desde una perspectiva macroscópica por García-Colín, Robles-Domínguez & Fuentes-Martínez (1981), quienes mostraron que a pesar de que las ecuaciones de Burnett de la hidrodinámica, y otras ecuaciones similares de orden superior en los gradientes, son compatibles con la hipótesis de equilibrio local, las relaciones flujo-fuerza ya no son relaciones analíticas simples.

El otro enfoque, también de 1949, más frecuentemente utilizado, fue propuesto por Grad (1958; 1949; 1963) quien buscaba soluciones normales a la ecuación de Boltzmann. La idea era extraer soluciones de la ecuación de Boltzmann que pudieran describir estados posibles de un gas, aunque para esto se requirieran más cantidades que las 5 densidades localmente conservadas. Al utilizar el método de los momentos, Grad pudo resolver este problema y sugirió que los mejores candidatos para ser las variables de estado adicionales eran los flujos.

Debido a que Grad no pretendía generalizar la TIL, este trabajo pasó desapercibido en este contexto, hasta que en 1967 Müller, a la sazón alumno doctoral de Meixner, propuso la idea de extender la hipótesis de equilibrio local requiriendo la existencia de una función que jugara el papel de la entropía, pero que dependiera tanto de las variables localmente conservadas como de los flujos. Unos años antes Nettleton había propuesto elevar al status de variables independientes relevantes los flujos de calor y de difusión de masa, abandonando la hipótesis de equilibrio local.

### Termodinámicas extendidas

La teoría no lineal de los procesos irreversibles aún se encuentra en desarrollo. La teoría extendida de la termodinámica irreversible, en su enfoque *determinista*, se ha construido siguiendo un esquema conocido como formulación cuasi-

onsageriana de la termodinámica irreversible extendida, que no incluye en general a las fluctuaciones y cuya interpretación de la *entropía* de un macroestado *instantáneo* en un proceso disipativo es bastante oscura. Tal descripción omite los efectos (fluctuaciones) que surgen de acoplamientos entre los grados de libertad microscópicos, no incluidos en la descripción del macroestado. La introducción de tales fluctuaciones convierte a las variables macroscópicas relevantes en procesos aleatorios (Muschik, 1984).<sup>8</sup>

Los intentos por extender el dominio de aplicabilidad de la termodinámica irreversible lineal pueden subdividirse en varias clases, que incluyen a la llamada termodinámica racional (TR) y al grupo de teorías conocidas como termodinámica irreversible extendida (TIE).

#### *Termodinámica racional*

De manera similar a la termodinámica de procesos irreversibles, la termodinámica racional es una teoría fuera del equilibrio en una formulación de campo. Sin embargo, las presuposiciones adicionales son diferentes de las de la TIL.

- La termodinámica racional se basa en una serie de axiomas materiales que determinan qué ecuaciones constitutivas son aceptables. Éstas deben satisfacer los siguientes requisitos:
  - Cumplir con la segunda ley de la termodinámica y algunas de sus relaciones consecuentes, por ejemplo, deben cumplir la llamada *desigualdad de disipación* (ec. 16) de manera local en el tiempo.
  - Cumplir con propiedades específicas de transformación al cambiar el observador (*covarianza* en teorías relativistas y *objetividad* en teorías no-relativistas).
  - Cumplir con simetría material, descrita a través de los *grupos de isotropía*.
  - Los espacios de estados deben elegirse de tal manera que se garantice una velocidad finita de propagación de ondas (la *hiperbolicidad* en termodinámicas extendidas suele ser reforzada al construir un *sistema hiperbólico simétrico* de ecuaciones diferenciales parciales a partir de los balances y las relaciones constitutivas –ver, por ejemplo, Müller & Ruggeri, 1993).
- La entropía y la temperatura son conceptos primitivos, lo que significa que no es necesario especificar cómo definir o medir tales cantidades.
- La existencia de los campos de entropía específica  $s(\vec{x}, t)$ , densidad de flujo de entropía  $\Phi(\vec{x}, t)$  y producción de entropía  $\sigma(\vec{x}, t)$  como cantidades constitutivas se asume. Estos campos deben satisfacer la desigualdad de disipación local en el tiempo ( $\vec{r} \equiv \vec{0}$ ) es decir:

<sup>8</sup> También es destacable en este sentido Muschik (1998).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varrho s) + \nabla \cdot (\vec{v} \varrho s + \Phi) = \sigma \geq 0, \quad \forall \vec{x}, t \quad (16)$$

- El *principio de equipresencia* establece que todas las cantidades constitutivas dependen del mismo conjunto de variables.

En la TR, la temperatura y la entropía son introducidas como conceptos primitivos sin alguna interpretación física sólida. La noción de estado, que nos llevaría a expresar cualquier atributo de un sistema al tiempo  $t$  como una función de los *parámetros de estado* evaluados en el mismo tiempo  $t$ , es eliminada y reemplazada por la noción de historia o memoria (que no está relacionada directamente con la función de memoria de la teoría física de los procesos estocásticos); como consecuencia, las ecuaciones constitutivas toman la forma de funcionales del tiempo. Estos funcionales no pueden, por otro lado, tomar cualquier forma arbitraria posible, sino que estarán restringidos por la segunda ley de la termodinámica y los criterios de indiferencia material y homogeneidad tensorial. Esta teoría ha alcanzado bastante éxito entre los matemáticos y los mecánicos teóricos debido a su generalidad y rigor matemático; pero es mucho menos apreciada entre los físicos y químicos debido a su falta de justificación mediante argumentos físicos sólidos (Jou, Casas-Vázquez & Lebon, 1996).

#### *Variables internas*

Para propósitos prácticos, los funcionales constitutivos como  $\mathcal{M}$  no resultan muy convenientes, en vez de eso a uno le gustaría tratar con espacios grandes y *funciones constitutivas*. Esto puede lograrse al incorporar a las variables internas  $\alpha$  en el espacio de estados (Coleman & Owen, 1977; Cooper, 1967; Duistermaat, 1968). Estas variables son independientes entre sí fuera del equilibrio. En equilibrio éstas dependen de las variables de equilibrio de acuerdo con la ley cero (Muschik, 1993).

En las termodinámicas extendidas los flujos son incluidos en el espacio de estados. Es posible distinguir al menos dos enfoques en termodinámica irreversible extendida, cada uno de los cuales engloba varios formalismos diferentes. Los dos principales enfoques difieren en la manera en que se explota la información contenida en la igualdad de disipación. La termodinámica extendida, vista como un desarrollo posterior y consecuente de la termodinámica racional, da uso a la desigualdad de disipación por el llamado método de Liu (Müller & Ruggeri, 1993) y la termodinámica irreversible extendida (TIE) que utiliza la desigualdad de disipación de manera análoga a como se hace en TIL. En ambos casos, cantidades como el flujo de calor y el tensor de los esfuerzos (o bien, la traza y la parte simétrica sin traza de tal tensor) son incluidas en el espacio de estados. Para la termodinámica irreversible extendida la explotación de la desigualdad de disipación es análoga al tratamiento en TIL de tal modo que se presupone que una *ecuación de Gibbs generalizada* aplica y ésta incluye contribuciones adicionales de las variables extendidas.

Como en el caso de la TIL la expresión para la producción de entropía es una suma de productos de flujos y fuerzas. En el caso de elegirse relaciones constitutivas *lineales* entre los flujos y las fuerzas, se obtienen ecuaciones diferenciales hiperbólicas, tales como la *ecuación de conducción de calor de Cattaneo*, las cuales generan una velocidad de propagación finita para las perturbaciones (García-Colín & Olivares-Robles, 1995).<sup>9</sup>

El carácter independiente de los flujos como el tensor de esfuerzos y el flujo de calor ha sido demostrado de varias maneras y parte de la violación de la hipótesis de equilibrio local. Frecuentemente se cita el llamado experimento de Reynolds. Reynolds puso piedras en una bolsa de piel, luego llenó con agua hasta el tope y comenzó a torcer la bolsa induciendo corte. El nivel de agua descendió debido a que el empaquetamiento de las piedras se perturba mientras las capas de éstas se deslizan alejándose unas de otras. Como resultado las piedras están más alejadas en promedio creando espacios que llena el agua. Esto implica, desde luego, que la densidad total decrece al sujetar al sistema a un esfuerzo de corte a temperatura y presión constante. Así, la hipótesis de equilibrio local es violada puesto que la densidad ya no es sólo una función de la presión y la temperatura.

Sin embargo, en décadas pasadas se ha generado un desafortunado debate acerca del significado de la entropía y la temperatura fuera del equilibrio local (Jou & Casas-Vázquez, 1992; Casas-Vázquez & Jou, 1994; García-Colín, 1996; García-Colín, 1995). Recientemente ha sido demostrado (Eu & García-Colín, 1996) que el concepto de temperatura retiene el mismo significado físico en sistemas dentro y fuera de equilibrio. Tal demostración está basada en consideraciones generales de la termodinámica, argumentos fenomenológicos y de teoría cinética. De manera independiente se ha llegado a la misma conclusión a través del análisis del acto mismo de medición de la temperatura (y la presión) en el marco de la relación de Gibbs-Duhem fuera del equilibrio (Bhalekar, 1999).

En la termodinámica extendida (relacionada con la termodinámica racional) se utilizan ecuaciones adicionales de balance para los flujos. Desde el punto de vista completamente fenomenológico, la validez de tales ecuaciones de balance para cada uno de los flujos es un *Ansatz*. Tales ecuaciones de balance pueden, sin embargo, derivarse de la teoría cinética mediante la inclusión de flujos de orden superior en el espacio de estados (Müller & Ruggeri, 1993; Ikenberry, K. & Truesdell, 1956), tal derivación, por otro lado, parte de la ecuación de Boltzmann que sólo es válida para gases diluidos.

Considerando que hay campos asociados adicionales, surge la necesidad de ecuaciones constitutivas adicionales. Frecuentemente se asume que, para los flujos y producciones de orden superior, las ecuaciones constitutivas lineales en las variables extendidas son suficientes. El espacio de estados de la termodinámica extendida incluye flujos, pero no gradientes o derivadas temporales de las variables. Es posible probar que utilizando relaciones constitutivas en este espacio de estados, las ecuaciones de balance forman un sistema hiperbólico de ecuaciones

<sup>9</sup> Para una descripción del transporte hiperbólico en termodinámicas extendidas ver Hernández-Lemus & Orgaz (2002).

diferenciales parciales (Weiss, 1990). Tales sistemas de ecuaciones permiten velocidades finitas para las perturbaciones.

Recientemente se ha discutido acerca del hecho de que más allá de las cantidades cuyas ecuaciones de balance se han mencionado, algunas veces se necesitan más variables para su descripción única. Algunos ejemplos de esto son las llamadas *variables internas*, parámetros de orden y de *daño*, triadas de Coserrat, directores, tensores de alineación y otros (Muschik, Papenfuss & Ehrentraut, 2001). Hay, en principio, dos posibilidades para incluir estas cantidades en una descripción teórica de campo continuo. Es posible introducir campos adicionales y sus ecuaciones de balance en el espacio-tiempo, o bien las variables adicionales pueden *extender* el espacio-tiempo al llamado *espacio mesoscópico* en el que ahora se definen los balances de masa, momento, etc.

La primera posibilidad para describir materiales complejos al introducir campos adicionales tiene ya una larga historia en las teorías físicas del continuo. La segunda posibilidad al introducir el espacio mesoscópico se originó probablemente en la descripción teórica de los cristales líquidos al tomar la función de distribución de las orientaciones de las moléculas en consideración. Tal hipótesis mesoscópica se ha llevado a la práctica de muy diversas maneras, aunque todas ellas tienen en común la introducción de alguna clase de *función de distribución* o medida de probabilidad en el espacio-tiempo (Hernández-Lemus & Estrada-Gil, 2008).

Estas consideraciones han llevado a varias personas, entre las que están Nettleton, Müller, Eu, García-Colín, Lebon y Casas-Vázquez, a proponer una manera alternativa; que de alguna manera actúa como *intermediaria* entre la termodinámica irreversible lineal y la termodinámica racional. Este enfoque es actualmente llamado termodinámica irreversible extendida y provee una descripción mesoscópica y causal de los procesos fuera del equilibrio.

Las bases de la termodinámica irreversible extendida pueden ser rastreadas hasta el conocido artículo *On the dynamical theory of gases*, de Maxwell, en el cual un término de relajación fue introducido en la ecuación constitutiva de los gases ideales. La presencia de este término también es encontrada en el tratamiento de Grad (1958; 1949) de la teoría cinética de los gases (bastante más sofisticado y elaborado), así como por Cattaneo (1948) y Vernotte (1958) en transferencia de calor más allá del régimen lineal de Fourier. Ya en un contexto más contemporáneo (y más relacionado con la termodinámica irreversible extendida como teoría general) sobresalen los trabajos de Nettleton y Müller en los sesenta.

El trabajo de grupos como el de Lebon, Jou y Casas-Vázquez, pero principalmente los de Eu y García-Colín, ha revelado que la entropía es definible aun para procesos irreversibles y, en el caso de los últimos, sus investigaciones han revelado que la entropía no es *definible unívocamente* para procesos irreversibles y que existe una cantidad –que Eu llama *diferencial de compensación* (Chen & Eu, 1993; Eu, 1995c)– que sí es una diferencial exacta, si se cumplen las condiciones de integrabilidad. Esta diferencial juega el papel de la diferencial de la entropía definida para un segmento reversible del ciclo considerado por Clausius, y, además, la diferencial de entropía se vuelve idéntica con la diferencial de compensación en



los procesos reversibles donde la contribución disipativa se anula. Este resultado teórico remueve la objeción que algunos termodinamicistas expresan, respecto a la validez del concepto de entropía en los procesos alejados del equilibrio y lo hace con sólo extender los conceptos esbozados por Clausius en su definición original de entropía.

Solamente bajo circunstancias sumamente especiales existe una forma diferencial pfaffiana para la densidad de entropía fuera del equilibrio, reminiscente de la relación de Gibbs en equilibrio, pero las ecuaciones constitutivas que acompañan a tal diferencial de entropía son la ecuación de Maxwell para el esfuerzo, las ecuaciones de Cattaneo-Vernotte para el flujo de calor y así por el estilo, que, incidentalmente, son las precursoras de las bien conocidas relaciones lineales entre flujos y fuerzas de la termodinámica irreversible lineal, puesto que estas últimas pueden ser obtenidas de las primeras bajo la suposición de que los flujos generalmente relajan en una escala de tiempo más rápida que las variables conservadas; por lo tanto, la relación de Gibbs extendida no puede ser una diferencial exacta en tal escala de tiempo, pero en escalas de tiempo más largas reduce a la relación de Gibbs de equilibrio local, que es una diferencial exacta. En circunstancias más generales aparece una forma diferencial pfaffiana para la diferencial de compensación que se reduce a la relación de Gibbs de equilibrio local, una forma diferencial pfaffiana para la densidad de entropía. Esta función de compensación junto con su análoga de equilibrio proveen toda la información termodinámica para el sistema de interés.

Una parte importante del poder del formalismo de la termodinámica de equilibrio, como teoría, reside en su habilidad para interrelacionar varias cantidades macroscópicas y sus derivadas con variables intensivas tales como la densidad, temperatura y así por el estilo. Esta habilidad se deriva de la integrabilidad de la entropía o de otras diferenciales relacionadas (Chen & Eu, 1993). El hecho de que la diferencial de entropía para procesos irreversibles no pueda ser una forma diferencial pfaffiana la priva incluso de la más remota posibilidad de ser una diferencial exacta. Esta limitación, originalmente formulada en términos de una diferencial de entropía, hace a la termodinámica irreversible extendida tan sólo una estructura hueca de formalismo matemático. Esta situación es solucionada si la diferencial de compensación es usada bajo la suposición de integrabilidad, puesto que la forma diferencial de compensación es una pfaffiana que es, en principio, integrable, si las condiciones de integrabilidad se satisfacen.

Así, las técnicas que hemos aprendido de la termodinámica de equilibrio son *extendidas* a situaciones de no-equilibrio al usar la diferencial de compensación bajo la suposición de integrabilidad (Chen & Eu, 1993; Eu, 1995c). Es adecuado remarcar el hecho de que una trayectoria cerrada de integración debe incluir un segmento reversible en el subespacio de equilibrio del espacio de Gibbs de no-equilibrio, dado que el sistema no puede ser espontáneamente restaurado al estado original sólo por procesos irreversibles. Existe otra nota importante que hacer acerca del formalismo de la termodinámica irreversible extendida, debido a su estructura de campo (intrínsecamente ligada a su origen macroscópico y posiblemente

a la hipótesis de equilibrio local) es que en su formulación local es prácticamente sinónima con la hidrodinámica generalizada, la cual, de hecho, está contenida en este formalismo.

*El formalismo de la función de compensación*

De entre las diversas propuestas para la construcción de una teoría termodinámica formal para los procesos que se manifiestan lejos de la condición de equilibrio, actualmente consideramos a la desarrollada por B.C. Eu (1992; 1995c) como aparentemente más adecuada: primero, porque los métodos que ésta plantea parecen concordar más con los métodos de la termodinámica clásica (de equilibrio) sin una necesidad tan grande de argumentos extra-termodinámicos, para la construcción final del cuerpo de la teoría; en segundo lugar, porque este formalismo comparte la estructura matemática elegante y sencilla (y por qué no decirlo, bella) que la formulación de Caratheodory (1909) da a la termodinámica clásica.

Al hacer esto Eu clarifica el significado de términos tales como *lejos del equilibrio* ya que al cuantificar el alejamiento que un sistema tiene de tales estados, es posible establecer regímenes en los cuales las ecuaciones constitutivas lineales ya no son adecuadas para la descripción del fenómeno. Eu se da a la tarea de elaborar su formalismo bajo la hipótesis de que la termodinámica irreversible y la teoría cinética de la materia no son ya entidades separadas, especialmente en el caso de procesos irreversibles no lineales que ocurren en sistemas no locales, ya que estos obedecen a la dinámica subyacente al *problema de muchos cuerpos* que está involucrado en los niveles atómico y molecular de descripción, con escalas de tiempo ya no tan alejadas de la escala de tiempo que describe procesos irreversibles no lineales (Eu, 1994; 1995b; 1995a; 1986).

Para lograr esto se toma el punto de vista de que: “[...] *Las ecuaciones cinéticas irreversibles, tales como la famosa ecuación de Boltzmann, son ecuaciones fundamentales que soportan a las ecuaciones de la dinámica microscópica que describe el movimiento de las partículas, tales como las ecuaciones de Newton o de Schrödinger, que serán tomadas como postulado para la descripción mesoscópica del comportamiento de un sistema macroscópico*” (Eu, 1995a), y a partir de ello generar métodos de solución para éstos con la visión de desarrollar una teoría de los procesos irreversibles consistente con las leyes de la termodinámica.

Ahora bien, existe un punto más que debemos evaluar en camino a considerar a esta teoría como una extensión adecuada de la termodinámica para sistemas lejos del equilibrio local, este punto es: ¿son aplicables los métodos de la termodinámica irreversible extendida según el formalismo de la calotropía de B.C. Eu a problemas concretos?, ¿realmente reproduce este formalismo los resultados experimentales?

El tema central de este trabajo es el desarrollo, dentro de la termodinámica de los procesos irreversibles, de formalismos que puedan tomar en cuenta regímenes supra-lineales de comportamiento y discernir entre su caracterización mediante la expansión del espacio de variables (considerando además de las variables llamadas localmente conservadas, como los campos de densidad de masa, energía in-

terna y momento, que usualmente se consideran independientes; variables adicionales relacionadas principalmente con los gradientes espacio-temporales de éstas) o modificando las ecuaciones constitutivas (que forman el conjunto de ecuaciones de “cerradura” para las ecuaciones de conservación de los campos de densidad, energía, etc. y que juegan un papel análogo al de las ecuaciones de estado en termodinámica de equilibrio) a fin de incluir no linealidades y efectos de orden superior, específicamente aplicados en la caracterización de fenómenos críticos fuera del equilibrio local.

*Los orígenes: el trabajo de Clausius*

Dentro de los intentos por “extender” el intervalo de validez de la termodinámica irreversible lineal se han elaborado diversas teorías (agrupadas todas ellas bajo el nombre genérico de termodinámica irreversible extendida (TIE) tales como: termodinámica racional, de variables internas, enfoque ondulatorio, variacional, de redes, extendida, etc.; actualmente consideramos que el enfoque más fructífero está basado en una generalización del teorema de Carnot a estados fuera de equilibrio (Eu, 1995c).

Éste se justifica con base en un análisis de la desigualdad de Clausius y de la noción del calor no compensado que, al tomarse en cuenta, genera una cantidad conocida como función diferencial de compensación cuya integral cíclica sobre el proceso se anula a pesar de ser un proceso de carácter irreversible.

$$\exists d\Psi \rightarrow \oint d\Psi = 0$$

Esta función coincide con la entropía de Clausius en la medida en que los procesos se vuelven reversibles, esto es:

$$\lim_{\text{reversible}} \Psi = S_{\text{Clausius}}$$

O bien:

$$\oint_{\text{rev}} \frac{dQ}{T} = \oint_{\text{rev}} d\Psi = 0 \quad (17)$$

De la definición de calor no compensado para procesos irreversibles:

$$N = - \oint \frac{dQ}{T} \geq 0 \rightarrow \oint \frac{dQ}{T} + \oint dN = 0 \quad (18)$$

Por lo que podemos definir:

$$d\Psi = \frac{dQ}{T} + dN \rightarrow \forall_{\text{proceso}} \oint d\Psi = 0 \quad (19)$$

Con lo cual podemos escribir de manera similar la primera y la segunda leyes de la termodinámica, a saber:

$$\text{Primera Ley} \quad \oint dU = 0$$

$$\text{Segunda Ley} \quad \oint d\Psi = 0$$

Esta función presenta además una forma diferencial pfaffiana, derivable de un balance para la entropía de no-equilibrio (lo que nos asegura su integrabilidad independiente de la trayectoria, lo cual la convierte en una función de estado) (Chen & Eu, 1993):

$$\oint d\Psi = \int_0^\tau \frac{d\Psi}{dt} dt = 0 \quad (20)$$

Pero como es una variable no conservada, su derivada temporal viene dada por una ecuación de continuidad, por lo que, en forma local:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \int_V \left( \frac{\partial(\rho\Psi)}{\partial t} + \nabla \cdot (u\rho\Psi) \right) dV \quad (21)$$

Además:

$$T^{-1} \frac{dQ}{dT} = - \int \nabla \cdot \left( \frac{Q_c}{T} \right) \cdot dr \quad (22)$$

$$\frac{dN}{dt} = \int_V \rho \Xi_c dr \quad (23)$$

De donde obtenemos la expresión local para la densidad de calortropía:

$$\rho \frac{d\Psi}{dt} = \nabla \cdot \left( \frac{Q_c}{T} + \rho \Xi_c \right) \quad (24)$$

Que, como muestra Eu, se puede escribir como una 1-forma<sup>10</sup> pfaffiana.

#### Forma local de la función de compensación

Una expresión local *de campo* para la función de compensación será pues mucho más útil:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \int_V \left[ \frac{\partial \rho \Psi^\dagger}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} \rho \Psi^\dagger) \right] dV \quad (25)$$

Escribimos también las contribuciones compensada y no-compensada como cantidades locales, como sigue:

$$T^{-1} \frac{dQ}{dt} = T^{-1} \int_{\mathcal{B}} d\mathcal{B} \cdot (-1)Q^C = - \int_V \nabla \cdot \left( \frac{Q^C}{T} \right) dV \quad (26)$$

<sup>10</sup> De la teoría de formas diferenciales sabemos que una 1-forma es una expresión del tipo:  $dy(x_i) = w_i dx_i$  donde las  $x_i$ 's son independientes por lo que la 1-forma genera una diferencial exacta, (que es, por tanto, integrable) muy similar a una relación de Gibbs, véase por ejemplo, Von Westenholz, 1981.

$$\frac{dN}{dt} = \int_V \rho \sigma_{ne}^\dagger dV \quad (27)$$

El significado físico de  $\sigma_{ne}^\dagger$  es la tasa local de producción de calor no compensado y no debe ser confundida con la así llamada *producción de entropía*, salvo en los casos en que apliquen la hipótesis de equilibrio local, pues la entropía sólo está bien definida en los segmentos reversibles de este ciclo (Meixner, 1970). El término  $Q^C$  es la cantidad de calor *compensado* por procesos reversibles internos en el sistema.

La expresión de campo para la *función de compensación* se lee:

$$\rho \frac{d\Psi^\dagger}{dt} = -\nabla \cdot \left( \frac{Q^C}{T} \right) + \rho \sigma_{ne}^\dagger \quad (28)$$

Definimos las siguientes *densidades* o cantidades locales. Sea  $\mathcal{E}$  la densidad de energía,  $\mathcal{P}$  el tensor de esfuerzos por unidad de volumen,  $\vec{Q}$  el flujo de calor, y  $\vec{J}_a$  el flujo de masa del componente  $a$ . Para el tensor de esfuerzos podemos escribir:

$$\mathcal{P} = \sum_{a=1}^r \mathcal{P}_a = \sum_{a=1}^r (\Pi_a + \Delta_a \delta + p_a \delta) \quad (29)$$

$\Pi_a$  es el tensor de esfuerzo cortante para el componente  $a$ :

$$\Pi_a = \frac{(\mathcal{P}_a + \mathcal{P}_a^t)}{2} - \frac{1}{3} \delta \text{Tr}(\mathcal{P}_a) \quad (30)$$

$\Delta_a$  es el esfuerzo normal de exceso para el componente  $a$ :

$$\Delta_a = \frac{1}{3} \delta \text{Tr}(\mathcal{P}_a) - p_a \quad (31)$$

$p_a$  es la presión parcial del componente  $a$  y  $\delta$  es el tensor unitario en 2 dimensiones.

Si escribimos todo de manera local:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \nabla \cdot \vec{u} \rightarrow \frac{d\rho}{dt} = -\nabla \cdot (\rho \vec{u}) \quad (32)$$

$$\rho \frac{dC_a}{dt} = -\nabla \cdot \vec{J}_a \quad (33)$$

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \nabla \cdot \mathcal{P} + \rho \mathcal{F}_{ext} \quad (34)$$

$$\rho \frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\nabla \cdot \vec{Q} - \mathcal{P} : \nabla \vec{u} + \sum_a \vec{J}_a \cdot \mathcal{F}_{ext,a} \quad (35)$$

$v = \rho^{-1}$  es el volumen específico,  $C_a = \frac{\rho_a}{\rho}$  es la fracción masa del componente  $a$ ,  $\mathcal{F}_{ext}$  y  $\mathcal{F}_{ext,a}$  son respectivamente la fuerza externa total por unidad de volumen y la fuerza parcial externa por unidad de volumen para el componente  $a$ .

Habiendo escrito esto notamos que la *forma local de la segunda ley de la termodinámica*,<sup>11</sup> es decir,  $\rho\sigma_{ne}^\dagger \geq 0$  impone condiciones en la evolución de las densidades locales.

A fin de hacer explícitas estas condiciones, definimos el flujo de calor y la producción de calor no compensado como sigue:

$$\vec{J}^C = \frac{\vec{Q}^C}{T} = \sum_a \frac{\vec{Q}_a^C}{T} \quad (36)$$

$$\vec{J}^C = \sum_a \frac{\vec{Q}_a - \mu_a^\dagger \vec{J}_a + \dots}{T} \quad (37)$$

$$\sigma_{ne} = \rho\sigma_{ne}^\dagger \quad (38)$$

$$\sigma_{ne} = -T^{-1} \sum_a (\mathcal{P}_a - p_a \delta) : \nabla \vec{u} + \vec{Q}_a^C \cdot \nabla \ln T + \vec{J}_a \cdot (\nabla \mu_a^\dagger - \mathcal{F}_{ext,a}) + \dots \geq 0 \quad (39)$$

Y, por tanto, la evolución temporal de la *función de compensación* está dada por:

$$\frac{d\Psi^\dagger}{dt} = T^{-1} \left[ \frac{d\mathcal{E}}{dt} + p \frac{dv}{dt} - \sum_a \mu_a^\dagger \frac{dC_a}{dt} - \sum_a \mathcal{X}_a : \frac{d\mathcal{P}_a}{dt} \right] \quad (40)$$

Si escribimos esta ecuación diferencial en el lenguaje de las formas diferenciales:

$$d_t \Psi^\dagger = T^{-1} [d_t \mathcal{E} + p d_t v - \sum_a \mu_a^\dagger d_t C_a - \sum_a \mathcal{X}_a : d_t \mathcal{P}_a] \quad (41)$$

Como podemos ver  $T^{-1}$  es un factor integrante de la 1-forma diferencial relacionada con  $\Psi^\dagger$  (Chen & Eu, 1993).

#### *Forma de Gibbs generalizada ( $T d\Psi$ )*

El formalismo de la calotropía posee un espacio de variables muy similar al conjunto gibbsiano característico de la termodinámica clásica, por lo cual es razonable esperar que algunas de las características geométricas-topológicas del G-espacio sean heredadas por el espacio termodinámico extendido (Eu, 1995a; 1995b).

<sup>11</sup> Resulta muy importante hacer notar que, en general no se puede probar en el contexto del formalismo de Eu (o, en general, de las termodinámicas irreversibles extendidas) tal expresión, sin embargo, es común que esta condición se presente como requerida, por ejemplo, en Eu, 1995c. Una discusión muy interesante se puede hallar en Del Río & López de Haro (1990).

Cabe mencionar que la entropía fuera de equilibrio (que se utiliza en la mayor parte de las extensiones a la termodinámica) no es, en general, una diferencial exacta, lo que llevó a J. Meixner (1970; 1973) a postular su conjetura sobre la imposibilidad de construir unívocamente expresiones para la entropía fuera del equilibrio. La función de compensación surge entonces como una extensión natural de la entropía termodinámica, al ser la primera una función de estado (a diferencia de las entropías) fuera de equilibrio. Así, para los sistemas fuera de equilibrio es posible, al menos en principio, calcular las funciones explícitas para la calortropía y el calor no-compensado, lo que proporcionaría una “medida de alejamiento del equilibrio”, algo que usualmente queda muy vagamente definido en otros enfoques teóricos.

#### LA COMPLEJIDAD ENERGÉTICA Y ENTRÓPICA DE LA VIDA

### Complejidad y regulación de los flujos celulares

Hemos hablado ya de las complejas estructuras presentes en las células vivas. Pensemos ahora en la manera en que tal complejidad afecta los procesos que sostienen la vida (Hernández-Lemus, 2011). En las células eucariotas, por ejemplo, existe un gran número de estructuras supramoleculares que van desde los ensamblajes proteicos y las macromoléculas como los ácidos nucleicos hasta los organelos. En estas estructuras ocurren una serie de interacciones fisicoquímicas que dan lugar a las reacciones químicas que sostienen los procesos metabólicos (Alberts, et al., 2002).

La síntesis de ácidos nucleicos en el núcleo celular, la hidrólisis en los lisosomas, el ciclo de Krebs, la fosforilación oxidativa, y los switches metabólicos que controlan el ciclo celular, la mitosis e incluso la muerte celular programada, ocurren bajo condiciones controladas de manera auto-organizada y sumamente precisa a través de procesos de activación cinética (Johnson, Eyring & Stover, 1974; véase también Kurzynski, 2006, y Demirel & Sandler, 2002).

Para que los intrincados procesos cinéticos involucrados en el metabolismo pueden llevarse al cabo, es necesario que estos se encuentren sincronizados con los procesos de transporte que aseguren que los constituyentes necesarios para los procesos bioquímicos subyacentes se encuentren precisamente en el lugar y concentración debidos al tiempo apropiado. La mayor parte de estos procesos de transporte se llevan al cabo a través de las membranas que separan los diferentes habitáculos o compartimentos intracelulares. Estos procesos de transporte se sincronizan precisamente porque ocurren guiados por gradientes energéticos y de concentración determinados por el estado termodinámico de la célula.

El transporte a través de los canales proteicos en las membranas celulares ocurre, pues, guiado por mecanismos de rectificación termodinámica. Un ejemplo muy sobresaliente de este fenómeno es el transporte diferencial de agua como mecanismo de termostato.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Para entender este complejo fenómeno de *transporte guiado por entropía* véanse las referencias siguientes: De Groot & Grubmüller (2001), Agre, et al. (2002) y De Groot & Grubmüller (2005).

Cabe preguntarse de qué manera se sincronizan tales fenómenos que ocurren en escalas tan dispares: la respuesta subyace en una serie de mecanismos regulatorios de las funciones celulares: la regulación de la transcripción genética (Lemus; 2009; Hernández-Lemus, 2010; Hernández-Lemus & Correa-Rodríguez, 2011; Hernández-Lemus, Tovar & Mejía, 2014) que establece las dinámicas que controlan la expresión de los genes, es decir, la síntesis de moléculas de RNA a partir de templates de DNA y a partir de éstos la producción de proteínas y transcritos génicos funcionales en las concentraciones y tiempos apropiados.

Adicional a la regulación genética –y altamente interrelacionada con ésta– está la regulación de la señalización celular (Hernández-Lemus, 2012) que dicta de qué manera las señales fisicoquímicas viajan, distribuyéndose en los diferentes compartimentos celulares organizando la respuesta sistémica concertada (Ovádi & Saks, 2004; Saks, et al., 1998), así pues, las propiedades emergentes como la sincronización en la respuesta celular y la auto-organización surgen como consecuencia directa de los procesos termodinámicos que ocurren en un entorno fuera de equilibrio como los anteriormente descritos y que dan lugar a fenómenos como la creación de estructuras disipativas, a través de mecanismos que involucran la estabilidad y metaestabilidad de estados fuera de equilibrio –frecuentemente estados estacionarios– favorecidos por entornos de mínima producción de entropía.<sup>13</sup>

### Señalización biológica y procesos de transporte

Otra aparente paradoja en el control termodinámico de las funciones biológicas es el hecho de que, frecuentemente, la supervivencia misma de los organismos depende de la respuesta eficiente a señales externas sumamente débiles. Cabe preguntarse de qué manera los seres vivos son capaces de amplificar y transmitir fielmente señales fisicoquímicas débiles en entornos sumamente ruidosos (Eisenberg & Hill, 1985). Por ejemplo, los receptores celulares son capaces de reaccionar a hormonas, citosinas y antígenos a muy bajas concentraciones, lo cual se logra por la concatenación de vías bioquímicas de transducción de energía libre (Westerhoff, et al., 1989; Westerhoff, et al., 1984). Entre los ejemplos paradigmáticos de este fenómeno están la respuesta inmune, las inhibiciones del choque térmico y los rearrreglos cardiovasculares en respuesta a ambientes que cambian muy rápido, así como la respuesta de pánico cuando una presa reconoce a su depredador (Manoli, 2007).

En tales entornos es muy frecuente encontrar una jerarquía de escalas temporales gobernando la dinámica de los procesos disipativos de manera que los procesos metabólicos se acoplen espacio-temporalmente (Reich & Sel'kov, 1975; Keizer, 1987; 2012).<sup>14</sup> Los acoplamientos espacio temporales inducen una jerarquía de tiempos de relajación que facilita la existencia de las estructuras disipativas (Westerhoff, et al., 1990). Algunos autores afirman que tales estructuras se hallan detrás de la fascinante robustez funcional de los sistemas biológicos (Kitano, 2004).

<sup>13</sup> Mucha más información detallada al respecto puede hallarse en Beard, et al. (2004), Bordel & Nielsen (2010), Fleming, et al. (2010) e Igamberdiev & Kleczkowski (2009).

<sup>14</sup> Para un cálculo detallado en células procariotas, ver Westerhoff, et al., (1982).



Otro elemento clave que involucra las dinámicas de los flujos energéticos, y especialmente de materia en los sistemas biomoleculares, es la presencia de acoplamientos entre los procesos cinéticos y de activación con fenómenos difusivos en las complejas geometrías inter e intra-celulares (Baláz, Sturdík & Augustín, 1987), así como los que involucran inestabilidades momentáneas y transiciones entre regímenes dinámicos (Babloyantz & Nicolis, 1972; Katchalsky & Kedem, 1962).

Ahora bien, adicionalmente a los fenómenos de transporte puramente difusivo dentro y fuera de las células existen mecanismos de *transporte facilitado* que utilizan a las llamadas máquinas moleculares (Astumian & Derényi, 1998).

Pensemos en las reacciones de fosforilación simple que activan a una enorme variedad de proteínas en la mayoría de los procesos celulares. En la fosforilación simple la hidrólisis de ATP se acopla a otros muchos procesos biológicos a través de bombas moleculares (Seelert, et al., 2000). Estas máquinas llevan al cabo el transporte a través de la membrana celular, muchas veces en condiciones antagónicas a los gradientes de potencial químico. Para lograrlo es necesario, por supuesto, que realicen trabajo mecánico para contrarrestar los ambientes altamente entrópicos propios de las estructuras disipativas y la multiplicidad de reacciones químicas que se llevan al cabo en el seno celular.

En el caso de la hidrólisis de ATP, estas máquinas obtienen su energía –al menos una parte de ella– del decaimiento de fluctuaciones térmicas fuera del equilibrio (Astumian & Derényi, 1998). La irreversibilidad de la reacción de hidrólisis hace que este proceso sea unidireccional y se constituya como un *rectificador* de la energía libre disipada: en breve, el decaimiento de las fluctuaciones disipa energía desordenada (calor) que es aprovechada para activar la reacción química de hidrólisis que, al proceder de manera mayormente unidireccional (la constante cinética directa es mucho más fuerte que la reversa), convierte la energía a una forma más ordenada, en un entorno fuera de equilibrio. Esta energía química es usada para el proceso de fosforilación y al consumirse produce trabajo mecánico útil.

Veamos un caso particular importante con más detalle, se sabe que la regulación de la actividad enzimática se lleva a cabo mediante al menos seis diferentes mecanismos (Favale, et al., 2010), que incluyen la activación de precursores proteolíticos, la modificación covalente de estos precursores, el anclaje a la membrana celular, la inhibición competitiva, la inhibición por retroalimentación y el control alostérico. Cada uno de estos mecanismos representa un reto en su descripción termodinámica fuera del equilibrio (Thompson, 1968).

Generalmente, tras el proceso de síntesis ribosomal, la mayoría de las enzimas se encuentran en un estado proteico precursor. Tras presentarse una serie de reacciones químicas acopladas se generan modificaciones moleculares en estos precursores, por ejemplo, los cortes con quimi tripsina que es la enzima encargada de hidrolizar ciertas uniones peptídicas específicas en estas proteínas, digamos, soltando los seguros para el establecimiento de una estructura biológicamente funcional (Ma, et al., 2008).

Pero la ruptura catalítica requiere de cantidades muy bien especificadas de quimiotripsina –para no romper de más los enlaces peptídicos– que a su vez tienen que ser generadas. La síntesis de quimiotripsina se lleva a cabo a partir de un templatado inactivo llamado quimiotripsinógeno en las llamadas *células principales* (*chief cells*), interesantemente, debido a una diferencia en las constantes termodinámicas de afinidad, las reacciones de tripsinización ocurren de manera extremadamente lenta en las células principales, de tal suerte que estas células no son atacadas por la quimiotripsina residual que se podría generar al madurar el quimiotripsinógeno que ellas producen. Es esta diferencia de tasas de reacción (debida a las diferentes energías de activación y tiempos de relajación), la que protege a las células principales de las reacciones de lisis (Berg, Tymoczko & Stryer, 2002).

Ahora bien, una vez que el quimiotripsinógeno o la quimiotripsina misma se han producido, éstos deben transportarse de manera rápida y eficiente a los diferentes compartimentos celulares en los que su presencia es requerida. En términos de transporte facilitado, uno de los mecanismos clave –que, de hecho, depende en sí mismo de energía proveniente de la hidrólisis de ATP– se lleva a cabo mediante máquinas moleculares denominadas comúnmente *caminantes de kinesina* (Magnasco, 1994). La kinesina es una proteína que camina a lo largo de los microtúbulos en las células llevando carga de una parte de la célula a otra y obtiene su energía, como ya hemos dicho, de la hidrólisis de ATP (De-Miguel, et al., 2012).

Para darnos una idea de la enorme complejidad implicada en los flujos energéticos fuera de equilibrio que regulan los procesos de señalización, consideremos una vía de señalización simple, un modelo mínimo que consta de tan sólo tres procesos de señalización: la activación que un ligando proteico hace de un receptor de membrana, la activación que el receptor hace de una molécula efectora y la reacción en que esta molécula efectora desata una respuesta en la célula.

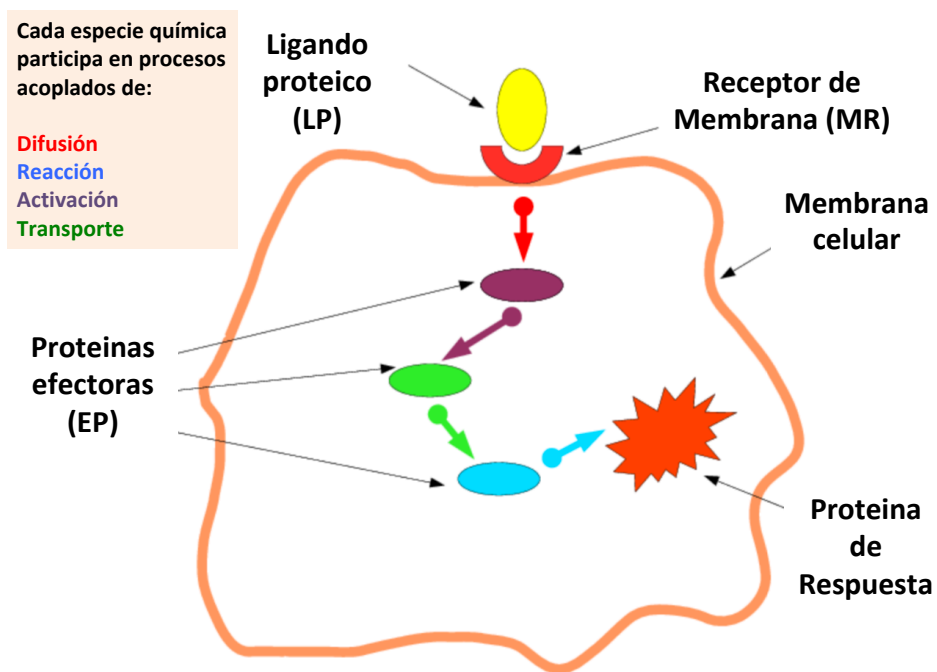
Las pseudo-reacciones que describen este proceso son las siguientes (ver fig. 4):



Ahora bien, si derivamos la forma explícita de la energía libre Gibbs fuera de equilibrio (Hernández-Lemus, 2012) consistente con la ec. 41 obtenemos:

$$\begin{aligned} d_t G = & \mu_{LP} d_t C_{LP} + \mu_{MR} d_t C_{MR} + \mu_{EP} d_t C_{EP} + \mu_{RP} d_t C_{RP} \\ & + \mathcal{A}_{MR^*} d_t \xi_{MR^*} + \mathcal{A}_{EP^*} d_t \xi_{EP^*} + \mathcal{A}_{RP^*} d_t \xi_{RP^*} \\ & + \Theta_{MR^*} \exp(2\mu_{MR}/K_B T) \left[ 1 - \exp\left(\frac{\mathcal{A}_{MR^*}}{K_B T}\right) \right]^2 d_t \mu_{MR} \\ & - \Theta_{MR^*} \exp(2\mu_{MR}/K_B T) \left[ \exp\left(\frac{\mathcal{A}_{MR^*}}{K_B T}\right) - \exp\left(\frac{2\mathcal{A}_{MR^*}}{K_B T}\right) \right] d_t \mathcal{A}_{MR^*} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +\Theta_{EP^*} \exp(2\mu_{EP}/K_B T) \left[ 1 - \exp\left(\frac{A_{EP^*}}{K_B T}\right) \right]^2 d_t \mu_{EP} \\
 & -\Theta_{EP^*} \exp(2\mu_{EP}/K_B T) \left[ \exp\left(\frac{A_{EP^*}}{K_B T}\right) - \exp\left(\frac{2A_{EP^*}}{K_B T}\right) \right] d_t \mathcal{A}_{EP^*} \\
 & +\Theta_{RP^*} \exp(2\mu_{RP}/K_B T) \left[ 1 - \exp\left(\frac{A_{RP^*}}{K_B T}\right) \right]^2 d_t \mu_{RP} \\
 & -\Theta_{RP^*} \exp(2\mu_{RP}/K_B T) \left[ \exp\left(\frac{A_{RP^*}}{K_B T}\right) - \exp\left(\frac{2A_{RP^*}}{K_B T}\right) \right] d_t \mathcal{A}_{RP^*} \quad (45)
 \end{aligned}$$



**Figura 4:** Un modelo mínimo de señalización celular. Podemos apreciar los principales procesos termodinámicos involucrados en una vía de señalización. Las macromoléculas involucradas: 1) se difunden debido a los gradientes de concentración intracelular, 2) participan en procesos de transporte activo mediado por motores moleculares, 3) participan en reacciones y pseudo-reacciones químicas, cambios conformacionales, fosforilaciones e interacciones fisicoquímicas de orígenes diversos, la mayoría de estos activados mediante mecanismos de transducción de energía libre (figura adaptada de Hernández-Lemus, 2012).

En la expresión 45, las  $\mu_i$  son los potenciales químicos fuera de equilibrio para las diferentes especies, las  $C_i$  son sus concentraciones locales, las  $\mathcal{A}_i$  son sus afini-

dades químicas, las  $\xi_i$  son los grados de avance de las pseudo-reacciones y las  $\Theta_i$ s son los coeficientes generalizados de transporte.

Es posible apreciar que aún en el caso más simple de proceso de señalización, la evolución de la energía libre obedece una ecuación diferencial en 13 variables con coeficientes no lineales y dependientes del tiempo. Esta ecuación nos permite apreciar la enorme complejidad que presentan aun los más sencillos (comparativamente) fenómenos biológicos, pues define un sistema dinámico con una vasta riqueza de comportamientos en los cuales podrían presentarse propiedades como la auto-organización, las transiciones orden-desorden y la formación de estructuras disipativas.

## CONCLUSIONES

A lo largo de este capítulo consideramos una aproximación fundamental al papel que la termodinámica fuera del equilibrio juega en los fenómenos complejos que dan lugar al singular comportamiento de la materia viva. Hicimos esto introduciendo la terminología y marco conceptual que los grandes pensadores de la relación entre la física térmica y la vida crearon, comenzando hace poco más de ciento cincuenta años. Desde Clausius, y particularmente desde Boltzmann y Gibbs, pasando por Ehrenfest, Onsager, Prigogine y Nicolis; Resibois y Haken, desde la física, pero también por Lotka, Odum, Monod y Kauffman hasta Westerhoff y los creadores de la llamada *segunda síntesis* en biología.

Analizamos también el marco formal de la termodinámica fuera del equilibrio, tanto en su aproximación lineal –más simple, conceptualmente, pero usualmente insuficiente para dar cuenta de la intrincada fenomenología que los seres vivos presentan– como en las llamadas termodinámicas extendidas. Se presentó asimismo una discusión amplia, pero por necesidad superficial –a manera de catálogo, si se quiere–, acerca de los muchos fenómenos biológicos que sólo ha sido posible comprender tras analizarlos a la luz del formalismo termodinámico.

Finalmente, y para dar cuenta de cuán compleja es la fenomenología y cuán rica es la termodinámica biológica, estudiamos con cierto nivel de detalle, a modo de ejemplo, un modelo mínimo de una vía de señalización celular que sin embargo da lugar a una descripción multivariada y no-lineal, capaz de mostrar las características paradigmáticas de la compleja evolución térmica de la materia viva: no-linealidades, restricciones que pueden dar lugar a patrones espacio-temporales y estructuras disipativas y aun fenómenos colectivos que podrían implicar un cierto grado de auto-organización. Los autores esperamos que esta introducción panorámica a la termodinámica fuera del equilibrio de la materia viva despierte en los lectores la inquietud por ahondar más en esta fascinante rama de la ciencia, prolija tanto en un campo abierto para el desarrollo teórico y conceptual, como en expectativas de aplicación en la medicina, la ecología y el estudio de la sostenibilidad y en otras biociencias y disciplinas relacionadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agre, P., King, L.S., Yasui, M., Guggino, W.B., Ottersen, O.P., Fujiyoshi, Y., Engel, A., & Nielsen, S., 2002. Aquaporin water channels—from atomic structure to clinical medicine. *The Journal of Physiology*, 542(1), pp.3–16.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M. & Roberts, K., 2002. *Molecular Biology of the Cell*. New York: Garland Science.
- Astumian, R.D. & Derényi, I., 1998. Fluctuation driven transport and models of molecular motors and pumps. *European Biophysics Journal*, 27(5), pp.474–489.
- Babloyantz, A. & Nicolis, G., 1972. Chemical instabilities and multiple steady state transitions in Monod-Jacob type models. *Journal of Theoretical Biology*, 34(1), pp.185–192.
- Baláz, Š., Sturdík, E. & Augustín, J., 1987. Kinetics of non-equilibrium metabolism-coupled passive transport in biosystems. *Gen. Physiol. Biophys.*, 6, pp.65–77.
- Batten, D., Salthe, S. & Boschetti, F., 2008. Visions of evolution: Self-organization proposes what natural selection disposes. *Biological Theory*, 3(1), pp.1–19.
- Beard, D. A., Babson, E., Curtis, E., and Qian, H., 2004. Thermodynamic constraints for biochemical networks. *Journal of Theoretical Biology*, 228(3), pp.327–333.
- Berg, J.M., Tymoczko, J. & Stryer, L., 2002. *Biochemistry*. New York: WH Freeman & Co.
- Bhalekar, A.A., 1999. Extended irreversible thermodynamics and the quality of temperature and pressure. *Pramana—Journal of Physics*, 53(2), pp.331–339.
- Boltzmann, L., 1886. Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. *Almanach der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 36, pp.225–259.
- Bordel, S. & Nielsen, J., 2010. Identification of flux control in metabolic networks using non-equilibrium thermodynamics. *Metabolic Engineering*, 12(4), pp.369–377.
- Brooks, D. & Wiley, E., 1986. *Evolution As Entropy. Toward a Unified Theory of Biology*. University of Chicago Press.
- Callen, H.B., 1985. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. Wiley.
- Carathéodory, C., 1909. Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik. *Mathematische Annalen*, 67(3), pp.355–386.
- Casas-Vázquez, J. & Jou, D., 1994. Nonequilibrium temperature versus local-equilibrium temperature. *Physical Review E*, 49(2), p.1040.
- Cattaneo, C., 1948. Sulla conduzione del calore. *Atti Semin. Mat. Fis. Univ. Modena*, 3, pp.83–101.
- Chapman, S. and Cowling, T., 1970. *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*. 3rd. Edition. Cambridge University Press.
- Chen, M. & Eu, B.C., 1993. On the integrability of differential forms related to nonequilibrium entropy and irreversible thermodynamics. *J. Math. Phys.*, 34(7), pp.3012–3029.
- Coleman, B.D. & Owen, D.R., 1977. On the thermodynamics of semi-systems with restrictions on the accessibility of states. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 66(2), pp.173–181.
- Cooper, J.L., 1967. The foundations of thermodynamics. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 17(1), pp.172–193.
- De Groot, B.L. & Grubmüller, H., 2001. Water permeation across biological membranes: mechanism and dynamics of aquaporin-1 and GlpF. *Science*, 294(5550), pp.2353–57.
- De Groot, B.L. & Grubmüller, H., 2005. The dynamics and energetics of water permeation and proton exclusion in aquaporins. *Curr. Opin. Struct. Biol.*, 15(2), pp.176–183.

- De Groot, S.R. & Mazur, P., 1984. *Non-equilibrium Thermodynamics*. New York: Dover.
- Del Río, J. & López de Haro, M., 1990. On the criteria for deriving approximations of different orders in extended irreversible thermodynamics. *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, 15(1), pp.59–72.
- De-Miguel, F.F., Santamaría-Holek, I., Noguez, P., Bustos, C., Hernández-Lemus, E., and Rubí, J.M., 2012. Biophysics of active vesicle transport, an intermediate step that couples excitation and exocytosis of serotonin in the neuronal soma. *PLoS One*, 7(10), e45454.
- Demirel, Y. & Sandler, S.I., 2002. Thermodynamics and bioenergetics. *Biophysical Chemistry*, 97(2-3), pp.87–111.
- Dewar, R., 2003. Information theory explanation of the fluctuation theorem, maximum entropy production, and the self-organized criticality in non-equilibrium stationary states. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 36(3), pp.631–641.
- Duistermaat, J.J., 1968. Energy and entropy as real morphisms for addition and order. *Synthese*, 18(4), pp.327–393.
- Eisenberg, E. & Hill, T.L., 1985. Muscle contraction and free energy transduction in biological systems. *Science*, 227(4690), pp.999–1006.
- England, J., 2013. Statistical physics of self-replication. *Journal of Chemical Physics*, 139(12).
- Etxeberria, A. & Umerez, J., 2006. Organismo y organización en la biología teórica: ¿vuelta al organicismo? *Ludus Vitalis*, 14(26), pp.3–38.
- Eu, B.C., 1986. On the modified moment method and irreversible thermodynamics. *J. Chem. Phys.* 85, (3), pp.1592–602.
- Eu, B.C., 1992. *Kinetic theory and irreversible thermodynamics*. New York: J. Wiley.
- Eu, B.C., 1994. Nonequilibrium ensemble method and irreversible thermodynamics. In: Costas, M., Rodríguez, R. and Benavides, A.L. (eds.), *Lectures on thermodynamics and statistical mechanics: XXIII Winter Meeting on Statistical Physics, Cuernavaca (México), 9–12 January 1994*. Singapore: World Scientific Publishing. pp.205–234.
- Eu, B.C., 1995a. Boltzmann entropy, relative entropy, and related quantities in thermodynamic space. *The Journal of Chemical Physics*, 102(18), pp.7169–79.
- Eu, B.C., 1995b. The Boltzmann equation and nonequilibrium ensemble method. *The Journal of Chemical Physics*, 103(24), pp.10652–62.
- Eu, B.C., 1995c. Form of uncompensated heat giving rise to a pfaffian differential form in thermodynamic space. *Physical Review E*, 51(1), pp.768–771.
- Eu, B.C., 1998. *Nonequilibrium statistical mechanics: ensemble method*. Fundamental Theories of Physics, vol.93. Springer Science & Business Media.
- Eu, B.C. & García-Colín, L., 1996. Irreversible processes and temperature. *Physical Review E*, 54(3), p.2501.
- Favale, N.O., Fernández-Tome, M.C., Pescio, L.G., and Sterin-Speziale, N.B., 2010. The rate-limiting enzyme in phosphatidylcholine synthesis is associated with nuclear speckles under stress conditions. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids*, 1801(11), pp.1184–94.
- Fleming, R.M., Thiele, I., Provan, G., and Nasheuer, H., 2010. Integrated stoichiometric thermodynamic and kinetic modelling of steady state metabolism. *Journal of Theoretical Biology*, 264(3), pp.683–692.
- García-Colín, L., 1990. *Termodinámica de procesos irreversibles*. México: UAM-I
- García-Colín, L., 1995. Extended irreversible thermodynamics: an unfinished task. *Mol. Phys.*, 86, pp.697–706.

- García-Colín, L., 1996. Some thoughts about the non-equilibrium temperature. *Molecular Physics*, 88(2), pp.399–406.
- García-Colín, L. & Olivares-Robles, M.A., 1995. Hyperbolic type transport equations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 220(1-2), pp.165–172.
- García-Colín, L., Robles-Dominguez, J., & Martinez, G.F., 1981. Beyond the Navier-Stokes regime in hydrodynamics. *Physics Letters A*, 84(4), pp.169–171.
- García-Colín, L. & Uribe, F., 1991. Extended irreversible thermodynamics beyond the linear regime. a critical overview. *J. Non-Equilib. Thermodyn*, 16(2), pp.89–128.
- Glandsdorff, P. and Prigogine, I., 1964. On a general evolution criterion in macroscopic physics. *Physica*, 30(2), pp.351–374.
- Gould, S., 2002. *The structure of evolutionary theory*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Grad, H., 1949. On the kinetic theory of rarefied gases. *Commun. Pure Appl. Math.*, 2(4), pp.331–407.
- Grad, H., 1958. Principles of the kinetic theory of gases. In: Flügge, S. (ed.), *Thermodynamik der Gase/Thermodynamics of Gases*. Berlin: Springer-Verlag. pp.205–294.
- Haag, R., Kastler, D. & Trych-Pohlmeyer, E.B, 1974. Stability and equilibrium states. *Communications in Mathematical Physics*, 38(3), pp.173–193.
- Hernández-Lemus, E., 2010. Non-equilibrium thermodynamics of transcriptional bursts. In: Macias, A. & Dagdug, L., (eds.), *New Trends In Statistical Physics. Festschrift in Honor of Leopoldo García-Colín's 80th Birthday*. Singapore: World Scientific. pp.163–182.
- Hernández-Lemus, E., 2011. Biological physics in México. *Journal of Biological Physics*, 37(2), pp.167–184.
- Hernández-Lemus, E., 2012. Nonequilibrium thermodynamics of cell signaling. *Journal of Thermodynamics*. <https://doi.org/10.1155/2012/432143>
- Hernández-Lemus, E. & Correa-Rodríguez, M.D., 2011. Non-equilibrium hyperbolic transport in transcriptional regulation. *PLoS One*, 6(7), e21558.
- Hernández-Lemus, E. & Estrada-Gil, J.K., 2008. Stochastic measures and modular evolution in non-equilibrium thermodynamics. *Electronic Journal of Theoretical Physics*, 5(17), pp.163–184.
- Hernández-Lemus, E. & Orgaz, E., 2002. Hysteresis in nonequilibrium steady-states: the role of dissipative couplings. *Revista Mexicana de Física*, 48, Sup.1, pp.38–45.
- Hernández-Lemus, E., Tovar, H., & Mejía, C., 2014. Non-equilibrium thermodynamics analysis of transcriptional regulation kinetics. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 39(4), pp.205–218.
- Heßling, H., 1994. *On the local equilibrium condition*. Disponible en: [arxiv.org](https://arxiv.org)
- Igamberdiev, A.U. & Kleczkowski, L.A., 2009. Metabolic systems maintain stable nonequilibrium via thermodynamic buffering. *Bioessays*, 31(10), pp.1091–1099.
- Ikenberry & Truesdell, C., 1956. On the pressures and the flux of energy in a gas according to Maxwell's kinetic theory I. *Journal of Rational Mechanics and Analysis*, 5(1), pp.1–54.
- Johnson, F.H., Eyring, H., & Stover, B.J., 1974. *The theory of rate processes in biology and medicine*. New York: Wiley.
- Jou, D. & Casas-Vázquez, J., 1992. Possible experiment to check the reality of a nonequilibrium temperature. *Physical Review A*, 45(12), p.8371.
- Jou, D., Casas-Vázquez, J. & Lebon, G., 1996. Extended irreversible thermodynamics. In: *Extended Irreversible Thermodynamics*. 2nd. ed. Berlin: Springer. pp.41–74.

- Katchalsky, A. & Kedem, O., 1962. Thermodynamics of flow processes in biological systems. *Biophysical Journal*, 2(2 Pt 2), pp.53–78.
- Kaufmann, S., 1993. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press.
- Keizer, J., 1987. Diffusion effects on rapid bimolecular chemical reactions. *Chemical Reviews*, 87(1), pp.167–180.
- Keizer, J., 2012. *Statistical thermodynamics of nonequilibrium processes*. Springer Science & Business Media.
- Kitano, H., 2004. Biological robustness. *Nature Reviews Genetics*, 5(11), p.826.
- Kleidon, A., Malhi, Y., & Cox, P., 2010. Maximum entropy production in environmental and ecological systems. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 365, pp.1449–1455. doi:10.1098/rstb.2010.0018.
- Kubo, R., 1957. Statistical-mechanical theory of irreversible processes. I. General theory and simple applications to magnetic and conduction problems. *Journal of the Physical Society of Japan*, 12(6), pp.570–586.
- Kurzynski, M., 2006. *The thermodynamic machinery of life*. Berlin: Springer.
- Lemus, E.H., 2009. Non-equilibrium thermodynamics of gene expression and transcriptional regulation. *Journal of Non-equilibrium Thermodynamics*, 34(4), pp.371–394.
- Lotka, A.J., 1922a. Contributions to the energetics of evolution. *PNAS*, 8, pp.147–151.
- Lotka, A.J., 1922b. Natural selection as a physical principle. *PNAS*, 8, pp.151–154.
- Lovelock, J., 1965. A physical basis for life detection experiments. *Nature*, 207, pp.668–570.
- Ma, Y., Chen, X., Sun, M., Wan, R., Zhu, C., Li, Y., and Zhao, Y., 2008. DNA cleavage function of seryl-histidine dipeptide and its application. *Amino Acids*, 35(2), pp.251–256.
- Madureira, J.R., Vasconcellos, Á.R., & Luzzi, R., 1998a. On a generalized Gibbs-Boltzmann ensemble formalism for dissipative systems. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 257(1-4), pp.424–428.
- Madureira, J.R., Vasconcellos, Á.R., Luzzi, R., and Lauck, L., 1998b. Markovian kinetic equations in a nonequilibrium statistical ensemble formalism. *Physical Review E*, 57(3), pp.3637–3640.
- Magnasco, M.O., 1994. Molecular combustion motors. *Physical Review Letters*, 72(16), p.2656.
- Manoli, I., Alesci, S., Blackman, M.R., Su, Y.A., Rennert, O.M., and Chrousos, G.P., 2007. Mitochondria as key components of the stress response. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, 18(5), pp.190–198.
- Martin, P.C. & Schwinger, J., 1959. Theory of many-particle systems I. *Physical Review*, 115(6), pp.1342.
- Mayr, E., 1982. *The Growth of Biological Thought. Diversity, Evolution and Inheritance*. Belknap Press.
- Meixner, J., 1970. On the foundation of thermodynamics of processes. In: Stuart, E.B., Gal-Or, B., & Brainard, A.J. (eds.), *A Critical Review of Thermodynamics: The Proceedings of an International Symposium, Held at the University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pa., April 7-8, 1969*. Baltimore: Mono Book Co. pp.37–47
- Meixner, J.E., 1973. The entropy problem in thermodynamics of processes. *Rheol. Acta*, 12(3), pp.465–467.
- Morowitz, H., 1968. *Energy Flow in Biology*. Academic Press.
- Müller, I. & Ruggeri, T., 1993. *Extended thermodynamics*. New York: Springer-Verlag.
- Muschik, W., 1977. A phenomenological foundation of non-linear onsager-casimir reciprocity relations. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 2(2), pp.109–124.



- Muschik, W., 1984. Fundamental remarks on evaluating dissipation inequalities. In: Casas-Vazquez, J., Jou, D., Lebon, G. (eds.), *Recent Developments in Nonequilibrium Thermodynamics*. Berlin: Springer. pp.388–397.
- Muschik, W., 1993. Fundamentals of non-equilibrium thermodynamics. In: *Non-equilibrium Thermodynamics with Application to Solids: Dedicated to the Memory of Professor Theodor Lehmann*. Wien: Springer. pp.1–63.
- Muschik, W., 1998. Irreversibility and Second Law. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 23(1), pp.87–98.
- Muschik, W., Papenfuss, C. & Ehrentraut, H., 2001. A sketch of continuum thermodynamics. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 96(1-2), pp.255–290.
- Nicolis, G. and Prigogine, I., 1977. *Self-Organization in Non-equilibrium Systems*. New York: Wiley.
- Odum, H. and Pinkerton, R., 1955. Time's speed regulator: The optimum efficiency for maximum output in physical and biological systems. *Am. Sci.*, 43(2), pp.331–343.
- Odum, H.T., 1995. Self-organization and maximum empower. In: Hall, C.A.S., (ed.), *Maximum Power: The Ideas and Applications of H.T. Odum*. Colorado University Press. pp.311–364.
- Ovádi, J. & Saks, V., 2004. On the origin of intracellular compartmentation and organized metabolic systems. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 256(1-2), pp.5–12.
- Prigogine, I., 1949. Le domaine de validité de la thermodynamique des phénomènes irréversibles. *Physica*, 15(1-2), pp.272–284.
- Prigogine, I., 1965. Steady states and entropy production. *Physica*, 31(5), pp.719–724.
- Prigogine, I. & Glansdorff, P., 1965. Variational properties and fluctuation theory. *Physica*, 31(8), pp.1242–1256.
- Prigogine, I. & Lefever, R., 1968. Symmetry breaking instabilities in dissipative systems. II. *The Journal of Chemical Physics*, 48(4), pp.1695–1700.
- Prigogine, I. & Nicolis, G., 1967. On symmetry-breaking instabilities in dissipative systems. *The Journal of Chemical Physics*, 46(9), pp.3542–3550.
- Pusz, W. & Woronowicz, S., 1978. Passive states and KMS states for general quantum systems. *Communications in Mathematical Physics*, 58(3), pp.273–290.
- Reich, J.G. & Sel'kov, E., 1975. Time hierarchy, equilibrium and non-equilibrium in metabolic systems. *Biosystems*, 7(1), pp.39–50.
- Reif, F., 2009. *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*. Waveland Press.
- Roos, H., 1993. On the problem of defining local thermodynamic equilibrium / Defining local thermodynamic equilibrium. In: Sen, R.N. & Gersten, A. (eds.), 1994, *Mathematical Physics Towards the 21st Century* (Based on the Beer-Sheva Workshop, 14–19 March, 1993). Beer Sheva: Ben-Gurion University of the Negev. pp.99–108. Disponible en: <http://ricerca.mat.uniroma3.it/ipparco/pagine/deposito/2018/Sen-Gersten.pdf>
- Roos, H., Sen, R.N. & Steinitz, R., 1993. Galilei invariance, continuous media and local thermodynamic equilibrium. In: Del Olmo, M.A., Santander, M., y Mateos, J. (eds.), *Anales de Física, Monografías*, Num.1-Vol. 2. Proceedings in the XIX International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics (Salamanca, Spain, June 29 - July 4, 1992). Madrid: RSEF.
- Ruiz-Mirazo, K. and Moreno, A., 2015. Reflexiones sobre el origen de la vida: algo más que un problema 'evolutivo'. *Métode. Science Studies Journal*, 87. doi:10.7203/metode.6.4997.

- Ruiz-Mirazo, K., Peretó, J. & Moreno, A., 2004. A universal definition of life: Autonomy and open-ended evolution. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 34(3), pp.323–346.
- Saks, V., Dos Santos, P., Gellerich, F.N., and Diolez, P., 1998. Quantitative studies of enzyme-substrate compartmentation, functional coupling and metabolic channelling in muscle cells. In: Saks V.A., Ventura-Clapier R., Leverve X., Rossi A., Rigoulet M. (eds.), *Bioenergetics of the Cell: Quantitative Aspects*. Boston, MA: Springer. pp.291–307.
- Schneider, E. & Sagan, D., 2006. *Into the Cool: Energy Flow, Thermodynamics, and Life*. Chicago University Press.
- Seelert, H., Poetsch, A., Dencher, N.A., Engel, A., Stahlberg, H., & Müller, D.J., 2000. Structural biology: proton-powered turbine of a plant motor. *Nature*, 405, pp.418–419.
- Swenson, R., 1997. Autocatakinesis, evolution and the law of maximum entropy production: a principle foundation towards the study of human ecology. *Adv. Hum. Ecol.*, 6, pp.1–46.
- Thompson, C.J., 1968. Models for hemoglobin and allosteric enzymes. *Biopolymers*, 6(8), pp.1101–1118.
- Truesdell, C. & Noll, W., 2004. *The Non-Linear Field Theories of Mechanics*. Berlin: Springer.
- Vernotte, P., 1958. Les paradoxes de la théorie continue de l'équation de la chaleur. *Compte Rendus*, 246, pp.3154–3155.
- Von Westenholtz, C., 1981. *Differential forms in Mathematical Physics*. Amsterdam: North-Holland/Elsevier.
- Wang, C.-C., 1970. A new representation theorem for isotropic functions: An answer to Professor G.F. Smith's criticism of my papers on representations for isotropic functions. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 36(3), pp.166–197.
- Weber, B. & Depew, D., 1996. *Darwinism Evolving: Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection*. Bradford Press.
- Weber, B., Depew, D. & Smith, J., (eds.), 1988. *Entropy, Information, and Evolution. New Perspectives on Physical and Biological Evolution*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Weiss, W., 1990. *Zur Hierarchie der Erweiterten Thermodynamik*. PhD. Technische Universität Berlin.
- Westerhoff, H.V., Aon, M.A., van Dam, K., Cortassa, S., Kahn, D., and van Workum, M., 1990. Dynamical and hierarchical coupling. *Biochimica et Biophysica Acta-Bioenergetics*, 1018(2-3), pp.142–146.
- Westerhoff, H.V., Juretić, D., Hendler, R.W. & Zasloff, M., 1989. Magainins and the disruption of membrane-linked free-energy transduction. *PNAS*, 86(17), pp.6597–6601.
- Westerhoff, H.V., Lolkema, J.S., Otto, R., & Hellingwerf, K.J., 1982. Thermodynamics of growth. Non-equilibrium thermodynamics of bacterial growth. The phenomenological and the mosaic approach. *Biochimica et Biophysica Acta*, 683(3-4), pp.181–220.
- Westerhoff, H.V., Melandri, B.A., Venturoli, G., Azzzone, G.F., & Kell, D.B., 1984. A minimal hypothesis for membrane-linked free-energy transduction: the role of independent, small coupling units. *Biochimica et Biophysica Acta-Reviews on Bioenergetics*, 768(3-4), pp.257–292.
- Wicken, J., 1987. *Evolution, thermodynamics and information. Extending the darwinian program*. New York: Oxford University Press.
- Wicken, J., 1989. Evolution and thermodynamics: The new paradigm. *Systems Research*, 6(3), pp.181–186.

## DONDE HAY VIDA, HAY MENTE: EN APOYO A UNA TESIS FUERTE DE LA CONTINUIDAD VIDA-MENTE

Michael D. Kirchhoff<sup>‡</sup> & Tom Froese<sup>§</sup>

RESUMEN. \* El presente texto considera cuestiones en torno a la continuidad y la discontinuidad entre la vida y la mente. Inicia examinando dichas cuestiones desde la perspectiva del principio de energía libre (PEL). El PEL se ha vuelto considerablemente influyente tanto en la neurociencia como en la ciencia cognitiva. Postula que los organismos actúan para conservarse a sí mismos en sus estados biológicos y cognitivos esperados, y que lo logran al minimizar su energía libre, dado que el promedio de energía libre a largo plazo es entropía. El texto, por lo tanto, argumenta que no existe una sola interpretación del PEL para pensar la relación entre la vida y la mente. Algunas formulaciones del PEL dan cuenta de lo que llamamos una perspectiva de independencia entre la vida y la mente. Una perspectiva de independencia es la perspectiva cognitivista del PEL, misma que depende del procesamiento de información con contenido semántico, y, por ende, restringe el rango de sistemas capaces de exhibir mentalidad. Otras perspectivas de independencia ejemplifican lo que llamamos la demasiado generosa perspectiva no-cognitivista del PEL, que parecen ir en dirección opuesta: sugieren que la mentalidad se encuentra casi en cualquier lugar. El texto continúa argumentando que el PEL no-cognitivista y sus implicaciones para pensar la relación entre la vida y la mente puede ser útilmente delimitado por las recientes aproximaciones enactivas a la ciencia cognitiva. Concluimos que la versión más contundente de la relación vida-mente las considera fuertemente continuas, y esta continuidad se basa en conceptos particulares de vida (autopoiesis y adaptabilidad) y mente (básica y no-semántica).

*Palabras clave:* continuidad vida-mente; principio de energía libre; enactivismo radical; enactivismo autopoietico.

---

<sup>‡</sup> Departamento de Filosofía, Facultad de Derecho, Humanidades y Artes, Universidad de Wollongong, Australia / kirchhof@uow.edu.au

<sup>§</sup> Departamento de Ciencias de la Computación, Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México. / t.froese@gmail.com

\* El presente capítulo es una traducción a cargo de Laura Rodríguez Benavidez (Facultad de Filosofía y Letras, UNAM) del texto original: Kirchhoff, M. D. and Froese, T. (2017). Where there is life there is mind: In support of a strong life-mind continuity thesis. *Entropy*, 19(4): 169. doi:10.3390/e19040169.

## 1. INTRODUCCIÓN

¿CÓMO es que la vida y la mente se caracterizan respectivamente, y cómo se conciben las relaciones entre ellas?

En este texto, iniciamos examinando esta pregunta desde la perspectiva del principio de energía libre (PEL). Se suele argumentar que el PEL estipula una base radical para el funcionamiento del cerebro; ofrece una teoría unificada de la percepción, la cognición y la acción (y demás capacidades psicológicas), y sugiere un marco a partir del cual entender la relación entre la vida y la mente (Clark, 2013; Friston, 2010; Hohwy, 2015). Postula que los organismos actúan para conservarse a sí mismos en sus estados biológicos y cognitivos esperados, y que lo logran al minimizar su energía libre, dado que el promedio de energía libre a largo plazo es entropía (Friston & Stephan, 2007; Friston, Thornton & Clark, 2012) (por “estado” entendemos un estado en el espacio de estados de un sistema. Uno de los estados en los que un sistema espera encontrarse a sí mismo es el de “estar vivo”; por lo tanto, un sistema buscará reducir la probabilidad de encontrarse en un estado no-anticipado respecto a su modelo generativo. En otras palabras, al minimizar la energía libre, en promedio y a lo largo del tiempo, el sistema auto-organizará los parámetros de sus estados internos para ocupar un número limitado de estados en promedio y a lo largo del tiempo [Hohwy, 2013, p.180]). Luego entonces, minimizar la energía libre equivale a reducir el desorden, en el sentido de incertidumbre.

Después argumentaremos que no existe una única versión del PEL para pensar la relación entre la vida y la mente (O, mínimamente, no existe un acuerdo de cómo interpretar mejor las propiedades de la energía libre variacional para pensar la vida, la mente y la relación entre ellas). Estas diferentes perspectivas en torno a la relación vida-mente pueden apreciarse al considerar la respuesta que uno daría a la siguiente pregunta: “¿Los fenómenos mentales se restringen a los sistemas vivos?”

Algunas formulaciones de la energía libre responden negativamente a la pregunta. Llamamos a esta imagen de la relación vida-mente la *perspectiva de independencia entre la vida y la mente*. En el contexto del PEL, se presenta en, al menos, dos formulaciones, cada una con sus propias implicaciones para pensar la vida, la mente y la relación entre ambas:

- El principio de energía libre cognitivista (Hohwy, 2013; 2014; 2017).
- El principio de energía libre no-cognitivista y demasiado generoso (Friston, 2009; 2013).

El principio de energía libre cognitivista (el PEL cognitivista) trata de contingente a la relación entre vida y mente. En ocasiones, se refiere a él como la hipótesis del cerebro auto-evidenciadora (Hohwy, 2014) o, simplemente, la mente predictiva (Hohwy, 2013). Una perspectiva de independencia de este tipo puede aún sostener que algunos sistemas cognitivos son sistemas vivos, pero sostendrá a la vez que esta relación es puramente contingente, por ejemplo al asociar las mentes con

procesos computacionales, con propiedades semánticas (i.e. llenas de contenido), o al considerar la posibilidad de que las mentes pueden realizarse por completo, independientemente de la vida, con el tipo apropiado de sistema artificial de apoyo. Dichas mentes pueden decirse estando epistémicamente excluidas del mundo, constituidas por poderosos modelos generativos, que no pueden estar “necesariamente casados con órganos biológicos” (Hohwy, 2017, p.7).

El principio de energía libre no cognitivista (PEL no-cognitivista) toma un punto de partida muy distinto al del PEL cognitivista. Los orígenes del PEL se encuentran en la termodinámica, donde se han utilizado teoremas de no-equilibrio en la energía libre para explicar dinámicas auto-organizadoras en sistemas capaces de permanecer lejos del equilibrio termodinámico (Friston & Stephan, 2007). En este sentido, los orígenes del PEL no tienen, intrínsecamente, nada que ver con la vida y la mente, a pesar de que hoy en día éste se aplique de manera directa al explicar sistemas vivos y cognitivos (Friston, 2010; Friston, 2009; 2011; 2013). El PEL demasiado generoso, no-cognitivista es la postura que establece que todos los sistemas que conservan sus variables dentro de un rango limitado de valores pueden entenderse como poseedores de una forma de mentalidad o proto-mentalidad, dado que el PEL abarca cualquier sistema capaz de conservar su integridad estructural de cara a un ambiente fluctuante como dedicado a predecir sus propios estados futuros; lo cual significa que el retener integridad descansa en los procesos cuya función es maximizar la evidencia del modelo, es decir, que estos procesos exhiben dinámicas auto-evidenciadoras. Sin embargo, esta generosa perspectiva de auto-evidencia podría parecer dirigir a alguna forma de pansiquismo.

Otras formulaciones de la energía libre responden afirmativamente a la pregunta de si la mente se restringe a la vida. Dichas formulaciones son parte de una imagen más general de la relación vida-mente a la que nos referimos como la *perspectiva de dependencia entre la vida y la mente*. Existen diferentes versiones de ésta en la literatura y lo común en todas ellas es que todas se adscriben a una postura mucho menos generosa pero aun así no-cognitivista del PEL. Etiquetamos, a continuación, las posibles versiones:

- PEL no-cognitivista + posturas tardías evolutivas de la mente (p. ej., Clark, 2017)
- PEL no-cognitivista + posturas fuertes de la continuidad vida-mente (Bruineberg, Kiverstein & Rietveld, 2018; Kirchhoff, 2018; y el presente texto).

Las posturas tardías evolutivas de la mente enfatizan discontinuidades entre seres meramente vivos y aquellos que también son cognitivos, de manera tal que las propiedades de la mente pueden pensarse como complejizaciones de las propiedades de la vida (ver Godfrey-Smith [2016] para mayor discusión de estas posturas, aunque en un contexto ligeramente distinto). Por ejemplo, la mentalidad, pero no la vida, requiere de la existencia de una maquinaria neural generativa sofisticada que no aparece en formas simples de vida como los organismos unicelulares (Clark, 2017). Por lo tanto, bajo esta perspectiva, es posible estar vivo sin (necesariamente) ser cognitivo (a pesar de su defensa por una teoría representacional

de la mente, orientada a la acción, situamos a Clark [2017] en el bando del PEL no-cognitivista por su propugnación a la complementariedad del PEL y sus esquemas de procesamiento predictivo con trabajo en los paradigmas encorporeizados (*embodied*), extendidos (*extended*) y enactivos a la ciencia cognitiva. Hablaremos más sobre la postura de Clark a su debido tiempo).

En este texto defenderemos al PEL no-cognitivista y a una postura fuerte de la continuidad vida-mente, basados en los desarrollos recientes de la ciencia cognitiva encorporeizada (*embodied*) y enactiva. Son las premisas clásicas del cognitivismo, especialmente el internalismo y el representacionalismo, las que aplican directamente los paradigmas enactivos a la problemática del PEL (Clark, 2013; Froese & Ikegami, 2013). No estamos solos en el desarrollo de formulaciones anti-cognitivistas del PEL desde la perspectiva del enactivismo. Los trabajos de Bruineberg, Kiverstein & Rietveld (2018) y Kirchhoff (2018; 2015) prepararon el escenario. A continuación, una lista de los puntos en los que estamos de acuerdo con Bruineberg, Kiverstein & Rietveld (2018): (a) la concepción helmholtziana de la percepción como una inferencia inconsciente es inherente a las formulaciones cognitivistas del PEL; (b) hay buenas razones para creer que la concepción helmholtziana de la inferencia perceptual es incompatible con la inferencia bayesiana aproximativa bajo una formulación no cognitivista del PEL, y (c) una vez observado desde los lentes del enactivismo, el PEL puede abordar el tema de cómo la vida y la mente comparten el mismo conjunto de propiedades organizacionales básicas. La principal diferencia entre Bruineberg, Kiverstein & Rietveld (2018) y este trabajo es que mientras Bruineberg, Kiverstein & Rietveld (2018; y ver también Bruineberg & Rietveld, 2014) buscan establecer que la función de los modelos generativos es mantener un sistema cerebro-cuerpo-nicho robusto (ver Kirchhoff [2015] para una aproximación metafísica), nosotros directamente apuntamos hacia una tesis fuerte de la continuidad vida-mente, al seguir desarrollando los argumentos recientes de Kirchhoff (2018).

Argumentaremos que el PEL no-cognitivista y sus implicaciones al pensar la relación entre vida y mente, pueden ser útilmente constreñidas y aumentadas por ideas clave en paradigmas enactivos recientemente radicales y autopoieticos de la ciencia cognitiva (Kirchhoff, 2018; 2014; 2015; Di Paolo, 2009; Froese & Di Paolo, 2011; Hutto & Myin, 2013). Nuestro argumento tiene dos pasos. El primero aborda la naturaleza de las *mentes básicas* como seleccionadas por evolución hacia una direccionalidad intencional sin contenido semántico (Hutto & Myin, 2013). El segundo paso basa el concepto de mentes básicas en el de vida básica, abordado en términos de autopoiesis y adaptividad (Di Paolo, 2009; Froese & Di Paolo, 2011). Consecuentemente, llegamos a la visión fuerte de la continuidad vida-mente, mientras que al mismo tiempo, nos mantenemos lo suficientemente alejados del tipo de generalización de lo mental asociada con las interpretaciones demasiado generosas del PEL en torno al lugar de la mente en el mundo natural (para otras articulaciones relacionadas pero distintas de la tesis fuerte de la continuidad vida-mente, ver Stewart [1992; 1996], Bitbol & Luisi [2004], Froese & Di Paolo [2009], especialmente Thompson [2007]).

## 2. EL PRINCIPIO DE ENERGÍA LIBRE (PEL)

Lo que se llama principio de energía libre (PEL) es un imperativo para la auto-organización en sistemas dinámicos abiertos, que especifica que para que los sistemas vivos mantengan su integridad estructural y funcional, deben minimizar la “energía libre” en el contexto de inferencia activa: deben cambiar la relación que tienen con su nicho a fin de preservar su integridad (Friston & Stephan, 2007; Friston, 2013; Kirchhoff, 2018). El PEL es, por tanto, la afirmación de que todos los sistemas biológicos deben resistir activamente la tendencia natural al desorden (Bruineberg, Kiverstein & Rietveld, 2018; Allen & Friston, 2018).

La energía libre se define clásicamente en términos de principios termodinámicos, pero aquí sólo nos concierne la energía libre como energía libre variacional que se sigue de la teoría de la probabilidad y de las estadísticas bayesianas, dado que ésta es la concepción de energía libre que concierne al PEL. De acuerdo a la teoría de la información, la energía libre es una cota superior de sorpresa (*surprisal*), donde la sorpresa se define como la diferencia entre las predicciones de un organismo (o sus anticipaciones) sobre sus entradas sensoriales y lo que recibe, en realidad, como entrada sensorial. Luego entonces, la sorpresa es una medida de improbabilidad que no debe confundirse con la noción psicológica de sorpresa (aunque en ocasiones ambas converjan). Los organismos que logran permanecer lejos de los límites de una fase terminal (y, por lo tanto, consiguen mantenerse con vida), señala el PEL, “lo hacen al minimizar la tendencia a entrar en este tipo particular de estados de sorpresa (esto es, no anticipados)” (Friston, Thornton & Clark, 2012, p.1).

La relación entre la energía libre variacional y la entropía debería entenderse de la siguiente manera. La energía libre es una cota superior de sorpresa, y el promedio a largo plazo de sorpresa es la entropía. Para ver esto más claramente, considérese que un estado puede decirse poseer alta sorpresa si se considera poco probable de ocurrir relativo a un modelo generativo. La idea principal es que los organismos se convierten en modelos (aproximados) de sus nichos locales, ya que estos sistemas, en promedio y a lo largo del tiempo, destilan regularidades estadísticas de sus nichos y, por ende, tienden a encorporeizar estas regularidades en la forma de su cuerpo físico y en sus dinámicas globales internas (Friston, 2013; 2011). Si se considerara un estado en alta y constante sorpresa, éste sería un estado con entropía alta (con una alta improbabilidad estadística). De manera alterna, si un sistema es capaz de predecir las causas recibidas externa e internamente de su entrada sensorial, sería porque se encuentra en un estado de entropía baja, y por tanto de baja sorpresa. Esto no es más que decir que los estados esperados tienen una distribución de entropía baja. Y a la inversa, mientras más alto sea el número promedio de observaciones requeridas para describir la dispersión de estados para equis variable, mayor sería la entropía de la distribución de probabilidad de esa variable. En consecuencia, el PEL postula que los sistemas vivos pueden mantenerse a sí mismos dentro de límites entrópicos al buscar minimizar su energía libre.

A primera vista, al menos, lo que el PEL posibilita es la generación de una unidad profunda, subyacente que conecta “los procesos de adaptación, vida y mente” (Friston, Thornton & Clark, 2012, p.1) catalogados en términos de una noción de teoría de la información de la energía libre. Todo esto equivale a decir que lo que permite a los sistemas vivos sobrevivir no es sino el mismo proceso que les permite percibir, actuar, pensar, etc. Luego entonces, el PEL ofrece la esperanza de proveer un único marco a través del cual unificar la teorización de la vida y la mente, y lo hace al apelar a un solo imperativo: la minimización de la energía libre (Friston & Stephan, 2007; Friston, 2013; 2011). Es así como el PEL ofrece razones para ligar procesos de vida con procesos de mente a través de lo que es esencialmente una perspectiva de minimización de la incertidumbre de la vida y la mente. Sin embargo, en el contexto del PEL, una inspección minuciosa revela la tensión que existe entre diferentes concepciones en torno a cómo entender mejor las implicaciones de la minimización de la energía libre y las propiedades centrales que ésta conlleva.

## 2.1. La energía libre y la predicción cognitivista de minimización del error

Algunas formulaciones de la energía libre añaden lo que se llama una restricción cognitivista, que tiene implicaciones en cómo una perspectiva semejante entiende la relación vida-mente. Por “restricción cognitivista” entendemos una restricción sobre la naturaleza del procesamiento de información en cuestión; que sería pensado como procesamiento de representaciones con contenido semántico. Además de postular las representaciones mentales semánticas, el PEL cognitivista también concibe la minimización de energía libre a través de unos lentes epistemológicos particulares; a saber, que el teorema de la energía libre lleva a un escepticismo global en torno a la relación mente-mundo (Hohwy, 2017, p.2). A pesar de que hay mucho que decir respecto a las implicaciones del PEL cognitivista, nos enfocaremos en el problema de las representaciones mentales semánticas.

El PEL cognitivista se enmarca, casi exclusivamente, dentro de una interpretación particular de la inferencia bayesiana acumulativa que subyace en términos de “minimización de predicción del error” (MPE). Mientras que el PEL toma como punto de partida problemas relacionados con la auto-organización en termodinámica, sistemas fuera del equilibrio, y, por ende, puede aplicarse a un mayor número de fenómenos diferentes, las estrategias de minimización de predicción del error se han asociado más directamente con el funcionamiento cerebral (Hohwy, 2013; ver Clark [2013] para más referencias). El cerebro aquí se perfila como un modelo jerárquicamente generativo para minimizar la predicción de una cantidad de error que refleja la probabilidad de entrada sensoriomotriz referente a un modelo interno y basado-en-conocimiento. Es esta formulación basada-en-conocimiento la que agrega al supuesto cognitivista. Desglosemos lo que queremos decir con esto, dado que el PEL, generalmente, se toma por implicar que los estados internos están involucrados en la inferencia bayesiana, en la que estados tanto internos –que comprenden un modelo generativo de sistema– como activos



pueden modelarse minimizando la energía libre de manera inferencial (Friston, et al., 2015). Así que, no es el problema de la inferencia o la posesión de un modelo generativo como tal lo que ejemplifica el supuesto cognitivista; sino que son las propiedades particulares asociadas con tales procesos inferenciales las que destacan un tipo particular, cognitivista, de minimización de la energía libre.

El PEL cognitivista otorga especial importancia al procesamiento de información interno con propiedades semánticas (es decir, con contenido). Se trata de una postura semántica de la teoría computacional de la mente, en la que las representaciones internas se catalogan en términos de inferencias probabilísticas *top-down* de distribuciones de densidad de probabilidad. Semejante visión del funcionamiento cerebral usualmente se formula en el lenguaje de la psicología popular (el lenguaje de las creencias, los deseos, la atención y las razones) y procede de la premisa de que el procesamiento de información con propiedades semánticas es lo que constituye la cognición. La razón común para postular estados internos con propiedades semánticas es que a menos de que verdaderamente existan tales estados, éstos no serán cognitivos pues sistemas puramente físicos no serían capaces de representar el mundo más allá de sus estados internos. Dado que las mentes generalmente se asumen manipulando representaciones y dado que la mayoría de los sistemas que ocurren naturalmente no se asumen manipulando tales cosas, se sigue que el PEL cognitivista dibuja una gruesa línea divisoria entre sistemas mentales y no mentales. Por ejemplo, Hohwy (2015; 2013; 2014) arroja esos resultados cognitivistas del PEL (ver también Gladziejewski [2016]).

Trabajos de este tipo motivan a lo que nos referimos antes como la perspectiva de independencia entre la vida y la mente, que ubica los orígenes de la mente posteriores a los de la vida y que trata la relación entre lo vivo y lo mental de manera contingente. Sin embargo, debido a su marco funcionalista, este enfoque amenaza con introducir un vacío difícil de explicar entre formas de vida cognitivas, más complejas, y el resto del mundo vivo, negando así, y definitivamente, la posibilidad de cualquier continuidad vida-mente. En una perspectiva cognitivista de la mente como ésta, sólo algunos sistemas vivos evolucionan la maquinaria neural capaz de realizar procesamiento de información que involucre propiedades semánticas.

## 2.2. Minimización no cognitivista de la energía libre

Otra variante menos cognitivista o, incluso, anti-cognitivista llega a la conclusión de que uno puede respaldar el PEL sin respaldar una lectura cognitivista de la inferencia bayesiana aproximativa en el contexto de minimización de predicción del error. El PEL no-cognitivista presenta la minimización de la energía libre en sistemas físicos en términos de la "entropía" de Shannon en la teoría de la información (Friston, Thornton & Clark, 2012). Por lo tanto, es posible postular al PEL como el principio unificador de la vida y la mente, y, al mismo tiempo, negar que las características más básicas de la vida y la mente implican inferencias probabilísticas con contenido semántico, aún si la base de la vida y la mente implica en sí misma

una inferencia probabilística (ver también Friston [2013], Kirchhoff [2018], Friston, et al. [2015]).

En algunas articulaciones generosas de esta perspectiva, se argumenta que la minimización de la energía libre no sólo ocurre en sistemas biológicos sino que también toma lugar en sistemas no vivos que abarcan desde la sincronización de relojes hasta el caldo primitivo y las redes sociales (Friston, 2009; 2013). A diferencia de PEL cognitivista, para quien la predicción de minimización del error es una función evolutiva de los cerebros que están en proceso de convertirse en modelos generativos jerárquicos, estas perspectivas “generosas” parecerían estar minando la continuidad y unidad de la vida y la mente. La razón de esto es que el principio que postulan, y por medio del cual unifican vida y mente, se aplica a sistemas que posiblemente no son ni vivos, ni mentales. Lo cual trae consigo algunos problemas. El primero es que si la mentalidad se realiza en procesos de minimización de la energía libre, y la minimización de la energía libre se aplica a todo desde seres humanos, relojes de péndulo hasta el caldo primordial, entonces la mentalidad resulta encontrarse casi en cualquier lugar. Es difícil evaluar si un pansiquismo de esta forma es correcto. Sin un forma clara de separar la mentalidad de la no-mentalidad, la vida de la no-vida, cualquier sobre-generosa versión del PEL se vuelve demasiado general y pierde así su valor explicativo al abordar la relación entre la vida y la mente.

En las siguientes dos secciones, pasaremos a desarrollar estas dos formulaciones del PEL para la relación vida-mente, mientras tendremos en cuenta los preceptos principales de ambas versiones para llevarlas a sus respectivas conclusiones.

### 3. DEL PEL COGNITIVISTA A LA DISCONTINUIDAD VIDA-MENTE

Algunos psicólogos, neurocientíficos y científicos cognitivos adoptan la postura de que la mente puede explicarse en términos de computación y añaden que las mentes son computacionales. La mayor suposición de esta postura es que la computación no puede explicarse sin hacer referencia a contenido semántico y representación mental. A lo cual, el PEL cognitivista no se opone.

#### 3.1. Conceptos de computación

Hohwy (2015; 2013; 2014) se basa explícitamente en el PEL para desarrollar una teoría del cerebro como si se encontrara embebido en procesos de minimización de predicción del error con contenido semántico. Como hemos visto, el PEL sostiene que para que los organismos se mantengan lejos de la frontera de las fases terminales deben minimizar su energía libre. Hohwy afirma que esta formulación de la energía libre “corresponde al trabajo del cerebro de minimizar la predicción del error, de muestrear selectivamente datos sensoriales, de optimizar precisiones esperadas y de minimizar la complejidad de los modelos internos” y que estas descripciones de trabajo “remiten a la percepción, la acción, la atención y la selección de modelos, respectivamente” (Hohwy, 2015, p.1).

La MPE es un marco computacional. En él las funciones computacionales realizadas por el cerebro se proyectan en términos de minimización de predicción del error, que reflejan la probabilidad de entrada sensomotriz (o información) relativa a un modelo estadístico. Bajo esta perspectiva, el cerebro se concibe llevando a cabo los papeles funcionales requeridos para codificar un modelo bayesiano generativo jerárquico, no local, que abarca todo el cerebro (Hohwy, 2012). Un modelo bayesiano es generativo dado que su función es “capturar la estructura estadística de algunos conjuntos de entradas observadas, al inferir una matriz causal, capaz de dar lugar a esta estructura” (Clark, 2016, p.21). Luego entonces, un modelo generativo es un modelo estadístico que mapea causas escondidas con consecuencias sensoriales, y, por ende, codifica previas creencias probabilísticas acerca de cuáles efectos sensomotrices poseen tales causas provenientes del cuerpo y/o del mundo (Colombo & Wright, 2017). Lo que significa que en cada nivel de la jerarquía cortical del cerebro, las funciones de densidad de probabilidad se codifican de las señales de predicción del error que llegan del nivel cortical inferior (Hohwy, 2012).

La MPE combina esta imagen computacional del cerebro con la perspectiva de que el procesamiento de información es inferencial y dice que la inferencia debería entenderse como inferencia bayesiana aproximada relacionada con algo semejante al contraste de hipótesis. En este sentido, la inferencia estadística es una herramienta de la ciencia. Hohwy adopta esta perspectiva del cerebro al apuntar que “los científicos están en el negocio de minimizar el error en predicciones generadas de sus hipótesis” (Hohwy, 2014, p.3). Existen diferentes maneras a través de las cuales uno puede sumergirse en el contraste de hipótesis. O bien, uno puede ajustar ciertos parámetros de su propio modelo, o bien, uno puede intervenir en las muestras obtenidas a fin de tener un mejor acuerdo entre el modelo y las muestras que uno va recolectando. Según Hohwy, así como “sucede a la inferencia estadística, así le sucede al cerebro en la percepción [...] y en la acción” (Hohwy, 2014, pp.3-4). En la percepción inferencial, la percepción reduce la predicción del error en virtud de determinar predicciones previas (i.e., creencias probabilísticas que constituyen el modelo generativo). En la inferencia activa, la acción minimiza la predicción del error al trabajar en cambiar la entrada sensorial en sí misma a través de su movimiento en el mundo (Hohwy, 2014). Percepción y acción, respectivamente.

La minimización de predicción del error puede, entonces, mostrarse como un mapeo a un mecanismo computacional, el modelo generativo realizado por el cerebro, que funciona para minimizar señales de error (Hohwy, 2013, cap. 2). Bajo tal perspectiva, los sistemas computacionales concretos son mecanismos funcionales de un tipo especial (Piccinini, 2010). Y aunque la comunidad científica aún no se ha decidido respecto a los detalles de una implementación específica, la MPE se perfila como aquél que ofrece revelaciones nuevas a los mecanismos computacionales detrás de la percepción, la acción, la atención y otros procesos cognitivos. Mecanísticamente,<sup>1</sup> siguiendo a Hohwy (2013, p.85), “esto se logra al suprimir la predicción del error en múltiples niveles de la jerarquía ordenada temporalmente”.

<sup>1</sup> N. de la T. Del original en inglés *mechanistically*, término acuñado por el autor.

### 3.2. Conceptos de información: hacia una consideración semántica de la computación

El PEL modela los estados internos embebiéndolos en la inferencia bayesiana aproximativa y donde ésta última es implementada en procesos de minimización de predicción del error: así es como convergen entre sí el PEL y la MPE. Sin embargo, la formulación cognitivista del PEL añade una dimensión semántica, explícitamente definida al perfil computacional de la MPE.

Para ver lo que esto implica, se necesita trabajar lo que la noción técnica de “información” podría involucrar en los procesos computacionales de reducción de predicción del error, en promedio y a lo largo del tiempo. Es posible distinguir diferentes conceptos de información; aquí consideraremos tres opciones.

La primera es que puede definirse termodinámicamente. Un sistema termodinámico cerrado, puede decirse, es uno que tiene contacto con su entorno circundante tan sólo en virtud del trabajo y del intercambio de calor. Termodinámicamente, la información equivale a la diferencia entre dos estados distinguibles (como son el potencial gravitacional alto y bajo). Es común pensar esta discrepancia en términos de información y, de este modo, ligarla con las nociones termodinámicas de entropía y energía libre.

Segundo, uno también podría intentar definir información en términos de teoría de la información. Aquí la información es una medida del promedio de una distribución de probabilidad. Dicho de otra manera, la información es una medida de la media de la verosimilitud de que un mensaje sea transmitido entre una fuente y un receptor (Shannon, 1948). Friston (2013) propone la minimización de la energía libre en términos de minimizar una cantidad de sorpresa, y dice que este concepto de información debería ser entendido en el sentido preciso de la información de Shannon (Friston, Thornton & Clark, 2012). Yendo un poco más allá, considérese lo que dicen Godfrey-Smith y Sterelny sobre la información de Shannon: “existe un tipo de ‘información’ a la que se remite en biología, el tipo originalmente descrito por Shannon, que no es problemática [. . .]. La información, en este sentido, existe siempre que haya contingencia y correlación” (Godfrey-Smith & Sterelny, 2004, p.4). Lo cual nos da una imagen en la que, incluso formas de vida simples (como las bacterias) pueden verse rastreando información y donde la información, en este sentido mínimo, puede mostrarse existente en sistemas complejos como los cerebros, y entre los organismos y su entorno. No obstante, es importante no sobre-intelectualizar esta noción. Como más adelante enfatizan Godfrey-Smith y Sterelny, si decimos que formas de vida simple pueden ser entendidas como instancias de la información de Shannon, o si decimos que los genes contienen información sobre las proteínas que producen, entonces “no estamos diciendo más de lo que decimos cuando decimos que existe una conexión de información entre el humo y el fuego, o entre los anillos de un árbol y su edad” (Godfrey-Smith & Sterelny, 2004, p.4). En efecto, de acuerdo a Godfrey-Smith y Sterelny, la información de Shannon implica que “cualquier cosa es una *fuentes* de información si tiene un rango de estados posibles y una variable *lleva* información sobre otra al grado que sus estados se correlacionan físicamente” (Godfrey-Smith & Sterelny, 2004, p.1). In-

tuitivamente, mientras más se pueda inferir sobre el estado de una variable por el estado de otra, mayor información transmite la relación entre las dos variables. Esto también se conoce como información mutua. La covarianza es formalmente equivalente a la información mutua en el siguiente sentido: si dos variables yacen en una relación de covarianza, entonces la información sobre una reduce sorpresa (*surprisal*) acerca de la otra; lo que no es sino decir que la covarianza, como la información mutua, optimiza la evidencia del modelo.

Tanto la termodinámica como la información de Shannon no pueden respaldar la formulación cognitivista del PEL. Hohwy presenta al procesamiento predictivo jerárquico dando una imagen *representacionalista* de la naturaleza de la mente y la cognición (Hohwy, 2014) (ver Gladziejewski [2016] como apoyo a la idea de que la MPE es una teoría representacional de la mente). Sin embargo, esto impide inmediatamente tanto a la termodinámica como a la información de Shannon jugar un papel importante al minimizar la sorpresa bajo la formulación cognitivista de la energía libre. La razón es simple. Aún si los anillos de un árbol son una fuente de información respecto a otros estados posibles (su edad), esto no significa que los anillos en sí mismos representen algo acerca de la edad del árbol: los dos estados son informacionalmente covariantes; entre ellos no existe una relación representacional.

La glosa representacional de Hohwy en torno a la mente es un acompañante más natural para un tercer concepto de información, a saber, una noción semántica de la información, y, de ahí, una perspectiva semántica de la computación. Una versión semántica/representacional de computación impone una restricción semántica. Piccinini presenta tal restricción como sigue: “Sólo los estados físicos que califican como representaciones pueden mapearse como descripciones computacionales, y por tanto calificar como estados computacionales” (Piccinini, 2010, p.9) Piccinini continúa diciendo que “la versión semántica es, probablemente, la más popular en la filosofía de la mente, porque parece cubrir mejor sus necesidades específicas que las otras. Dado que, generalmente, se asume que las mentes y las computadoras digitales manipulan [...] representaciones, resultan computar” (Piccinini, 2010, p.9). Así que, el PEL cognitivista postula que los cerebros computan información, y donde el tipo relevante de información es el tipo de información que usualmente nos parece importante para propósitos epistémicos.

Actualmente, se dice que el modelo generativo bayesiano, realizado en los circuitos neurales del cerebro tiene una arquitectura representacional doble. Esta arquitectura es “una que en cada nivel combina representaciones de entradas *bastante tradicionales* con representaciones de error. De acuerdo a la propuesta doble, lo que queda fuera de la explicación es la señal de error, que (en estos modelos) figura como computada por ‘unidades de error’ dedicadas. Mismas que están ligadas, pero son distintas, a las llamadas unidades de representación encargadas de codificar las causas de las señales sensoriales” (Clark, 2013, p.187; las cursivas son mías). Así que lo que el PEL cognitivista nos presenta es una perspectiva de la mente embebida en procesos computacionales de predicción semántica, codificados en representaciones jerárquicas de situaciones recibidas externa e internamente.

### 3.3. Problemas de integración

El PEL cognitivista eleva las demandas a favor de una integración de la información. En otras palabras, formas sofisticadas de cómputo, en términos de contenido semántico representacional, parecerían situar, para ponerse en marcha, una alta demanda del tipo de maquinaria requerida en la realización de tales modelos generativos jerárquicos y de amplio alcance. Se trata de una maquinaria que, probablemente, muchas formas de vida simple y otros organismos no tienen; dado que todo el trabajo de minimización de predicción del error, muestreo selectivo de datos, optimización de precisión, etcétera, se toma para ser “ordenado jerárquicamente en la corteza [cerebral]” (Hohwy, 2014, p.15). Clark (2017) llega, precisamente, a esta conclusión. Al considerar formas de vida básica como organismos unicelulares capaces de quimiotaxis, Clark señala: “Semejante forma de vida puede responder a perturbaciones ambientales utilizando una variedad de trucos y estrategias, para ninguno de las cuales, se le requiere, estar embebida en un proceso en el que simulaciones sensoriales recibidas se encuentran intentando generar la señal ‘de arriba a abajo’” (Clark, 2017, p.4). Además, Clark indica que, incluso, si tales bacterias son auto-evidenciadoras en el sentido de optimizar un modelo de su entorno, tales formas de vida básica “necesitan no depender de predicciones *top-down* para estructurar e informar sus intercambios con el mundo. El procesamiento predictivo constituye entonces una teoría de proceso biológicamente plausible que puede o no puede ser implementada en cualquier sistema” (Clark, 2017, p.5). Una manera de leer a Clark (2017) es creer que lo que dice es que mientras los organismos unicelulares están vivos, no son cognitivos, dado que carecen del tipo de arquitectura requerido por un sistema para instanciar un modelo generativo jerárquico por medio del cual se embeban en una inferencia probabilística. De hecho, si, en general, los sistemas nerviosos centrales y más particularmente, la corteza cerebral son requeridos para que se dé la inferencia bayesiana, y es este tipo de proceso el que se requiere para la mentalidad, entonces esto empuja la continuidad entre la vida y la mente, al despojar ramas enteras del árbol de la vida de poseer propiedades mentales.

Esto implica que algunas formas de vida son sin mente, mientras que, al mismo tiempo, otras (más avanzadas neuralmente hablando) son de un tipo totalmente distinto: están vivas y tienen mente. Sin embargo, esto implica una separación profunda entre las mentes (con semántica) y el resto del mundo natural, vivo y no-vivo (sin semántica). Son de una índole distinta.

### 3.4. Problemas de significado

La dependencia del PEL cognitivista en el contenido semántico genera una serie de problemas sobre cómo explicar de manera naturalista propiedades semánticas de representaciones mentales, un problema que retomaremos más adelante. Primero, queremos prestarle atención a un problema diferente, pero relacionado. Todos los sistemas físicos pueden entenderse en términos de la información de Shannon; sin embargo, bajo esta concepción la información “es tan sólo información en térmi-

nos de transferencia (insignificante) de energía y no debe confundirse con contenido intencional o semántico” (Bruineberg, Kiverstein & Rietveld, 2018, p.17). No obstante, generalmente, sólo algunos sistemas físicos se asumen capaces de manipular representaciones con contenido semántico. Una formulación cognitivista del PEL en la línea de la inferencia aproximativa bayesiana con propiedades semánticas es entonces consistente con una imagen que “conserva en sí a las mentes y a las computadoras, mientras deja fuera todo lo demás, vindicando así la teoría computacional de la cognición como una teoría sólida y no trivial” (Piccinini, 2015, p.9).

A pesar de que una teoría de la mente semejante es atractiva para los que defienden el PEL cognitivista, de inmediato enfrenta dificultades. Hohwy (2015) hace uso del PEL para llegar a una versión cognitivista de la mente. Pero tomar como punto de partida el PEL, que inicia con consideraciones termodinámicas acerca de la auto-organización en sistemas dinámicos aleatorios, no da licencia para inferir una formulación cognitivista de la minimización de la energía libre. La razón es que el PEL presenta la auto-organización en términos de la información de Shannon, esto es, en términos de covarianza, correlación física y sincronía generalizada. ¿Qué sigue de esto?

Primero, en una formulación no-semántica del PEL, donde la información se entiende en el sentido de Shannon, la arquitectura de las formas básicas de cognición (por ejemplo, adaptarse a y actuar en un ambiente dinámico de una manera más que meramente dispuesta) no involucra, necesariamente, la adquisición y manipulación de estados internos con contenido semántico (Hutto & Myin, 2013). Luego entonces, las versiones cognitivistas del PEL ponen un estándar innecesariamente alto respecto a qué tipo de actividades calificarían de mentales. De hecho, existen argumentos que muestran (si son correctos) que la información-como-covarianza no es ningún tipo de contenido semántico (Hutto & Myin, 2013). En la sección 5, profundizaremos en estos puntos.

Segundo, las mentes han evolucionado “para tener las cosas hechas en tiempo real” (Wilson & Foglia, 2011, p.5). Por lo tanto, las mentes (y los cerebros) han evolucionado primariamente para la acción y sólo secundariamente para el pensamiento, como tradicionalmente se había concebido. Las formulaciones cognitivistas del PEL restan importancia al papel protagónico de la acción a favor de sus estrellas computacionales: la información semántica y las representaciones *top-down*, realizadas por los modelos generativos, neuralmente codificados. No obstante, se ha de considerar que a los sistemas sensoriales actuales “no les concierne la verdad ni la precisión como tales, sino más bien, la acción y la necesidad de mantener la estabilidad funcional de los organismos en los que éstos se sitúan” (Shani, 2006, p.90). Esto se ajusta difícilmente a la epistemología del PEL cognitivista que supone estados internos con condiciones de verdad y/o precisión que ligen tales estados internos con situaciones en el mundo. Considérese (nuevamente) el caso de la quimiotaxis en organismos unicelulares como la bacteria *E. coli*. La quimiotaxis es un ejemplo de un mecanismo de control empleado por los organismos para conservar el estado de homeostasis y, gracias a ello, prolongar la probabilidad de su supervivencia. En este caso, es la búsqueda de comida (como los azúcares) basada en los

gradientes de concentración de repelentes y atractivos químicos en el entorno fluido de una bacteria (Auletta, 2013, p.311). Siguiendo a Auletta (2013), la quimiotaxis puede modelarse consistiendo de las llamadas predicciones homeostáticas o las expectativas previas dotadas por selección natural, mismas que aproximan los estados externos preferidos por los organismos –llamémosles preferencias intrínsecas de los organismos– (en la última sección, retomaremos el desglose de esta noción). De acuerdo a Auletta, “las creencias previas dotadas genéticamente, implicadas por los estados internos y la configuración del organismo... especifican lo que es innatamente sorprendente y permiten actuar para enfrentar desviaciones no predichas de estados esperados” (Auletta, 2013, p.315). En esta versión, el modelo generativo encorporeizado de la *E.coli* comprende creencias previas que especifican que debe luchar para encontrarse en gradientes altos de azúcar y se opone a lo contrario. Así que, la *E.coli* puede modelarse buscando estos estados a través de la inferencia activa. Lo cual sitúa a la acción y a las prioridades en pos de la acción en la base de la homeostasis y la vida. No hay razón para creer que la quimiotaxis que busca mejorar la vida está desprovista de mentalidad, dado que nada le impide tratar a los nutrientes que recibe como datos sensoriales, la membrana celular como una manta de Markov y el comportamiento constantemente escurridizo de la bacteria como casos de inferencia activa.

Esta diferencia comprometida con la teoría de la información –entre información semántica y no semántica– abre una brecha entre la vida y la mente. La vida tiene un lado metabólico. El metabolismo es una de las características principales de la vida (Boden, 1999). Los sistemas auto-organizativos pueden conservar su organización a pesar de toparse con tendencias termodinámicas hacia el desorden entrópico. Lo que se necesita es que los sistemas vivos sean capaces de localizar los estados correctos, en la totalidad de su espacio de estados, que les permitan mantenerse dentro de límites viables; como en el caso de la quimiotaxis. Por ejemplo, la “temperatura ideal de un humano está determinada por su corporalidad: a los 37 °C las encimas que regulan el metabolismo funcionan de manera óptima, mientras el costo metabólico de mantener la temperatura del cuerpo sea asequible bajo ciertas condiciones ambientales” (Bruineberg, Kiverstein & Rietveld, 2018, p.6). Mayor temperatura equivale a mayores niveles de sorpresa y viceversa. El gradiente de temperatura es una fuente de información, que se encuentra sistemáticamente relacionada con una distribución de probabilidad desconocida, en el sentido de que la sorpresa no puede ser directamente evaluada por un organismo. Sin embargo, esto no es sino decir que la información en cuestión es una covariación. No se trata de un estado semántico representacional que trae consigo información sobre otras situaciones. Luego entonces, formas básicas de procesos de auto-organización en sistemas vivos no tienen nada que ver con los requerimientos de mentalidad postulados por el PEL cognitivista.

Hohwy (2015) asume que una lectura cognitivista de la minimización de predicción del error es co-extensiva con el PEL. Hemos argumentado que la concepción técnica de información utilizada en el PEL (información de Shannon) difiere sustancialmente de la información semántica. Además argumentamos que la pri-



mera no implica la última noción de información, lo que explica, en parte, por qué una formulación cognitivista del PEL termina separando de tajo la vida de la mente. En la sección siguiente, consideraremos más a detalle formulaciones no cognitivistas del PEL y exploraremos las posibles implicaciones derivadas de una tesis de continuidad vida-mente, basada en esta perspectiva no-cognitivista del PEL.

#### 4. DE LA MINIMIZACIÓN DE ENERGÍA LIBRE A UNA PERSPECTIVA VIDA-MENTE DEMASIADO GENEROSA

El PEL es un imperativo para la auto-organización de sistemas dinámicos. Dado que la vida existe, el PEL afirma que los sistemas vivos deben manifestar las propiedades siguientes. Primero, los sistemas biológicos deben tener un modelo de cómo se genera su entrada sensomotriz y de los tipos de estado en los que esperan encontrarse. En otras palabras, el PEL concibe a los sistemas biológicos próximos a los modelos estadísticos óptimos de sus econichos. Como Friston dice: “el principio de energía-libre toma la existencia de los agentes como su punto de partida y concluye que cada fenotipo o agente *encorporeiza* (*embodies*) un modelo óptimo de su econicho. Esta optimización se logra al minimizar la energía-libre, misma que delimita la evidencia por cada agente (o modelo), producto de las interacciones sensoriales con el mundo” (Friston, 2011, p.89). La idea de que un sistema biológico encorporeiza un modelo requiere de un desglose cuidadoso.

Una manera de leer esta afirmación es que la evolución ha situado sistemas biológicos tales que, en promedio y a lo largo del tiempo, destilan (esto es, extraen) regularidades estadísticas de sus econichos, y, por lo tanto, las encorporeizan en su modelo. Quizá sea esto lo que lleve a los defensores del PEL cognitivista a decir lo siguiente: “La mente puede entonces entenderse en términos internalistas y solipistas, dejando de lado el cuerpo, el mundo y otras personas” (Hohwy, 2014, p.7). Una vez que el sistema biológico ha destilado las regularidades estadísticas de su econicho, puede deshacerse de él y, en cambio, depender de su modelo interno del mundo. Es ésta la implicación representacionista del PEL cognitivista.

#### La ergodicidad y la manta de Markov

Esta no es la manera como se entiende el concepto del modelo en el PEL según Friston (a menos de que explícitamente añadamos “cognitivista” al PEL, en lo que sigue, tendremos en mente una perspectiva no-cognitivista del PEL). La idea aquí es que el sistema biológico *es* un modelo de su econicho (Friston, 2011). Como señala Friston: un sistema biológico “carece de un modelo de su mundo: él es un modelo. En otras palabras, la forma, la estructura y los estados de nuestros cerebros encorporeizados no contienen un modelo de lo sensorio: ellos mismos son el modelo” (Friston, 2013, p.32). En este sentido, cada fenotipo o sistema vivo “encorporeiza un modelo óptimo de su econicho” (Friston, 2011, p.89). Cabe añadir, que no sólo el sistema biológico es el que puede decirse que encorporeiza (*embodies*) el medio en el que se sitúa (*embedded*), sino que “el medio encorporeiza al agente” (Friston,

2011, p.89). En segundo lugar, por lo tanto, puede mostrarse a los modelos encorporeizados dependientes de expectativas previas respecto a cómo los estados del entorno han de desenvolverse en el tiempo. Esta característica es también conocida como ergodicidad. Decir que un sistema es ergódico es simplemente decir que sus estados tenderán a visitar a algún miembro de su conjunto atractivo a lo largo del tiempo, o que éste regresará, una y otra vez, al mismo vecindario de su espacio de estados durante el transcurso de su vida. En otras palabras, los sistemas ergódicos “[ocuparán] un pequeño número de estados de alta probabilidad y [evitarán] un gran número de otros estados” (Rabinovich, Friston & Varona, 2012).

Los puntos principales que explican cómo es que los sistemas vivos perduran en el tiempo aplican del mismo modo a bacterias, plantas y a organismos como nosotros. Esto plantea las preguntas en torno a las continuidades y discontinuidades que queremos explorar en el PEL. Las respuestas a estas preguntas aún no son del todo trabajadas en la literatura del PEL y tienden a oscilar entre resultados radicalmente distintos.

En algunos pasajes, la formulación de Friston del PEL parece ofrecernos una visión profundamente continua de la relación vida-mente; lo que llamamos, en la introducción, el PEL no-cognitivist + una fuerte continuidad vida-mente. Friston enfatiza que existe más alrededor de la vida que la mera auto-organización. Los sistemas vivos también “negocian [...] un ambiente cambiante de manera que les permita perdurar largos periodos de tiempo” (Friston & Stephan, 2007, p.422). En otras palabras, se encuentran entregados al comportamiento adaptativo. Bruineberg, Kiverstein & Rietveld (2018) caracterizan esta habilidad adaptativa como “una instancia de lo que en la fenomenología filosófica se describe como ser-movido para tender hacia un agarre óptimo” (Bruineberg, Kiverstein & Rietveld, 2018, p.10; ver también Kirchoff [2018; 2014] para observaciones similares).

Sin embargo, en otros pasajes, Friston ofrece lo que para nosotros parece ser una perspectiva diferente y demasiado generosa del PEL no-cognitivist. Considérese, por ejemplo, su siguiente cita: el PEL “se aplica a cualquier... sistema que resiste una tendencia al desorden; desde los organismos unicelulares hasta las redes sociales” (Friston, 2009, p.293). O, como Friston dice aquí: “La motivación para minimizar la energía libre ha utilizado, hasta ahora, el siguiente tipo de argumento: los sistemas que no minimizan energía libre no pueden existir, porque la entropía de sus estados sensoriales no estaría limitada y aumentaría indefinidamente; según el teorema de fluctuación” (Friston, 2013, p.2). Estrictamente hablando, lo que Friston (2013) dice aquí es que para que cualquier sistema exista, debe hacer trabajo para minimizar la energía libre. Lo que lo compromete con alguna de las siguientes tres implicaciones. Primero, si la minimización de la energía libre es suficiente para que exista mentalidad, entonces todo sistema tiene una mente, incluso aunque no todos los sistemas estén vivos. Segundo, si la minimización de la energía libre es suficiente para la vida y la mente, entonces todos los sistemas que existen están vivos y son mentales. Finalmente, los sistemas biológicos, como todos los otros que existen, necesitan hacer trabajo para minimizar la energía libre. La última opción señala que la minimización de energía libre no es una propiedad

característica de los sistemas vivos, y, como tal, da lugar a alguna de las siguientes dos implicaciones. O bien (opción número uno) el PEL sitúa la mentalidad en una clase de sistemas que incluye pero no queda restringida a los sistemas vivos y, por lo tanto, vira hacia alguna forma de panpsiquismo; o bien (opción número dos) el PEL equipara la continuidad vida-mente con una perspectiva que ve a la vida y a la mente en todas partes.

Algunos científicos y filósofos han abrazado la primera opción para sus teorías de la mente (por ejemplo, Chalmers [2015], Tononi & Koch [2015]). Sin embargo, a excepción de las implicaciones panpsiquistas o pancomputacionales, se sigue que la minimización de la energía libre en sí misma no puede ser suficiente para la vida y la mentalidad, incluso tratándose de una propiedad necesaria para todo sistema vivo y cognitivo, como medio para establecer un límite máximo al desorden. ¿Qué más se requeriría entonces? La ergodicidad no parece ser suficiente ni para la vida ni para la mente dado que cualquier sistema dinámico aleatorio manifestará comportamiento ergódico porque tal sistema evolucionará en el tiempo hacia lo que se llama su atractor global aleatorio (Crauel, 1999). Considérese que arrojar una moneda al aire no sólo una vez, sino muchas es un ejemplo de un proceso ergódico, dado que la probabilidad de observar “caras”<sup>2</sup> convergerá como función del tiempo al mismo valor.

Además de la ergodicidad, Friston apela a la idea de que la manta de Markov delimita a los sistemas. Una manta de Markov está compuesta de estados sensoriales y activos, que separan estados internos de externos (en el sentido estadístico de independencia condicional). En una célula, digamos, la superficie de una célula constituye una manta de Markov al separar estados intracelulares (internos) de los extracelulares (externos). Una manta de Markov puede a su vez dividirse a sí misma en estados perceptuales/sensoriales y estados activos (Friston, 2013; Friston, et al., 2015). Si asumimos que uno puede interpretar los estados internos parametrizando “una densidad arbitraria (variacional) o algunas creencias bayesianas... sobre estados externos, entonces la dinámica de estados internos y activos puede describirse como un descenso del gradiente en energía libre variacional” (Friston, et al., 2015, p.3). En otras palabras, uno puede describir un sistema en virtud de procesar una manta de Markov, como si maximizara una evidencia del modelo a través de la inferencia bayesiana aproximativa. Por lo tanto, puede decirse que los estados internos de la manta de Markov infieren las causas ocultas de su entrada sensorial por medio de inferencia perceptual o activa.

Cabe mencionar que no todos los fenómenos poseen una manta de Markov; lo que muestra, desde la perspectiva del PEL, que la mera auto-organización no es suficiente ni para la vida ni para la mente. La flama de una vela es un caso concreto. A pesar de que puede parecer entregada a procesos de auto-manutención, no lo hace recursivamente (Bickhard, 2008), y, por lo tanto, no puede asegurar que los estados que la constituyen y sus interdependencias cambien lentamente; lo que se requiere

<sup>2</sup> *N. de la T.* En el caso de las monedas, usualmente se usan las parejas cara-cruz (España), caracelo (Colombia), cara-seca (Argentina) un poco más relacionadas con el inglés *head-tail*. Para el lector mexicano, se trata tan sólo del equivalente águila-sol.

para que una célula o un sistema ergódico posea una manta de Markov (Friston, 2013). A pesar de estas consideraciones acerca de las mantas de Markov, las preocupaciones que planteamos aquí también se aplican a sistemas que poseen una manta de Markov, dado que los relojes de péndulo pueden modelarse constituidos por una manta de Markov, embebidos en una inferencia bayesiana y mostrando cierto grado de ergodicidad (Friston, 2013). En el caso de los relojes de péndulo, Bruineberg, Kiverstein & Rietveld (2018) sostienen que la sincronización de sistemas caóticos puede explicarse, más parsimoniosamente, apelando a una sincronía generalizada que a la idea de que cada reloj infiere el estado de otro, en tanto que cada uno puede entenderse como modelo de la dinámica interna del otro. Según Bruineberg, Kiverstein & Rietveld (2018) aunque es completamente posible interpretar este caso en términos de la dinámica de la manta de Markov, no es necesario insistir en una lectura inferencial, sino que bastaría apelar a una sincronía generalizada. No nos interesa esta discusión en particular, lo que nos interesa es señalar que en otras publicaciones, Friston formula la sincronía generalizada como consistente con estados internos que se embeben en la inferencia bayesiana aproximativa (Friston & Frith, 2015). Nuestro punto es que dado que los conceptos principales del PEL no-cognitivista –la inferencia bayesiana aproximativa, la ergodicidad, las mantas de Markov, etc.– pueden aplicarse, por un lado, a sistemas vivos y cognitivos, por otro lado, existe el riesgo evidente de sobreexplotar la aplicación de estos conceptos, misma que resultaría en o bien concebir a la vida y la mente casi en todo lugar, o bien, en despojar al PEL de su poder explicativo cuando se trata de abordar la naturaleza de la vida y la mente y la relación entre ambas (supongamos que el primer punto puede defenderse, entonces el PEL no-cognitivista demasiado generoso no ejemplificaría una perspectiva de independencia entre la vida y la mente, en tanto que la vida y la mente esencialmente estarían presentes en cualquier lugar).

##### 5. RESTRINGIENDO EL PEL NO-COGNITIVISTA CON LA REC:<sup>3</sup> UNA CONSIDERACIÓN DE LA MENTE EVOLUTIVA Y TARDÍA

Nuestra estrategia consistirá, ahora, en mostrar que las implicaciones de la perspectiva demasiado generosa del PEL no-cognitivista pueden restringirse. En lugar de situar a la mentalidad fuera del dominio de la vida, o incluso pensar que todo lo que existe es semejante a la vida y entonces semejante a la mente, debemos sostener que tales implicaciones pueden constreñirse útilmente con el trabajo del enactivismo encorporeizado radical (REC) en la filosofía de la cognición naturalista (Hutto & Myin, 2013; Hutto, Kirchhoff & Myin, 2014). Esta restricción nos ayudará a dar los primeros pasos hacia el desarrollo de una perspectiva no-cognitivista del PEL que evite cualquier tipo de afiliación con un pansiquismo y en la que la pre-

<sup>3</sup> N. de la T. REC (del inglés *radical enactive cognition* = cognición enactiva radical) es un término hoy día utilizado como nombre propio por los autores del enactivismo encorporeizado radical (*radical embodied enactivism*) y no como simple abreviatura como el caso de PEL (o FEP en inglés, *free energy principle*).

sencia de contenido mental semántico (esto es, estados internos con condiciones de corrección) marque una transición en el reino de lo mental, en oposición a que señale un camino de lo no-mental a lo mental.

Los principales compromisos de la REC pueden articularse en dos principios básicos. El primero, es una negación de la perspectiva “usual” de las ciencias cognitivas y su filosofía, que señala que la cognición, en un sentido fundamental, involucra representación con contenido mental. Según la REC, “el vasto mar de posibilidades de lo que los seres humanos [y otros organismos] hacen y experimentan se entiende mejor al apelar al desenvolvimiento dinámico, las interacciones situadas y corporizadas y los compromisos con lo que el mundo nos da” (Hutto, Kirchoff & Myin, 2014, p.1). El segundo principio afirma que este tipo de actividades básicas cognitivas se dan en la actividad corpórea, entregada-al-mundo (Hutto & Myin, 2013). Ahora proseguiremos a destacar dos puntos de convergencia entre la REC y el PEL no-cognitivista.

Primero, ambos enfatizan la codependencia entre lo interno y lo externo. Recordemos que el PEL toma al sistema biológico como modelo de su econicho y agrega, además, que el econicho es un modelo del sistema biológico. Por ejemplo, mientras que la morfología y la posibilidad de acción de la araña reflejan su nicho, la telaraña y el entorno circundante reflejan el tipo de organismo que lo habita. En definitiva, el PEL realmente postula una separación entre los estados internos y externos: la manta de Markov implica dicha separación (Allen & Friston, 2018). Sin embargo, a diferencia del PEL cognitivista, esto no significa que tal separación indique una separación *epistémica*. Así que, la mera existencia de una manta de Markov no implica que los estados internos de un organismo tengan que representar estados más allá de la manta en virtud de construir estados internos con contenido semántico sobre aquellos estados externos; sino que más bien, sugiere, de manera similar a como lo hace el enactivismo, que “el organismo y el entorno están vinculados en una especificación y selección recíproca” (Varela, Thompson & Rosch, 1991, p.174: citado en Clark [2016, p.289]). Allen y Friston enfatizan esta mutualidad entre lo interno y lo externo al decir: “El punto es que la frontera en sí misma se constituye, más bien, por un intercambio dinámico ergódico entre ‘interno’ y ‘externo’, y no por una ejecución cognitivista de procesamiento interno” (Allen & Friston, 2018, p.16). La REC transforma esta mutualidad entre lo interno y lo externo en forma de covarianza, lo que no es sino expresión de cómo dos variables cambian (o no) juntas. La covarianza es formalmente equivalente a la emergencia de la sincronía generalizada que resulta de la inferencia activa –un corolario del PEL (ver Friston & Frith [2015])– y expresa un acoplamiento dinámico de dos o más sistemas dinámicos aleatorios. En este sentido, tanto la REC como el PEL formulan, a partir de principios básicos, por qué uno puede esperar una disminución de entropía cuando se da una sincronía generalizada o covarianza en acoplamientos agente-entorno. De manera similar a la inferencia activa en el PEL no-cognitivista, la REC entiende el ensamblaje y la orquestación de tales acoplamientos dinámicos como resultado de la actividad encorporeizada (embodied).

Segundo, tanto el PEL no-cognitvista como la REC conciben el tipo de información disponible para un organismo biológico del tipo de la variedad de Shannon. Sin embargo, donde el PEL asume que este tipo de información da cuenta de la auto-organización en los sistemas biológicos (Friston, Thornton & Clark, 2012), la REC introduce una implicación adicional que pretende plantear un problema serio para todas las teorías cognitivistas de la mente, incluyendo el PEL cognitivista (Hutto & Myin, 2013). El PEL cognitivista asume que un tipo de interacción inteligente con el mundo demanda contenido semántico. No obstante, esta suposición choca contra lo que Hutto y Myin (2013) llaman el *difícil problema del contenido*, cuando dicen que “postular contenido informacional es incompatible con el naturalismo explicativo. El problema de raíz es que la covarianza no constituye contenido” (Hutto & Myin, 2013, p.xv). La idea aquí es que el contenido semántico no existe independiente de ciertas prácticas socioculturales, ergo, no constituye una propiedad inherente ni de los sistemas biológicos, ni, por ende, de la vida (Hutto & Myin, 2013, p.xv).

No diremos nada sobre la relación entre el contenido y las prácticas sociales (pero ver Hutto [2008]). En vez de eso, puliremos la siguiente implicación: si asumimos que la información-como-covarianza no puede dar lugar a la información-como-contenido y si asumimos, además, que responder adaptativamente a la información-como-covarianza es una propiedad esencial de los sistemas vivos y cognitivos, entonces, la mentalidad no es, en sus formas más básicas, un asunto de procesar cualquier tipo de contenido. Es, precisamente, por esta razón que sostuvimos que el PEL cognitivista conduce a una posición de independencia o de no-continuidad respecto a la relación vida-mente. Afirmamos esto al observar que el PEL cognitivista no es compatible con el tipo de información en su base (como ésta se aplica a la auto-organización en los sistemas biológicos, esto es, información-como-covarianza), para dar cuenta de procesos que involucran información semántica, y, por lo tanto, esto lo obliga a excluir la mayoría de los procesos en biología del ámbito de lo mental.

La REC va más allá de sólo problematizar teorías de la mente cognitivista. Desarrolla una imagen positiva de actividad cognitiva sin contenido mental. De acuerdo a la REC si uno niega que cualquier tipo de interacción organísmica con el mundo debe, necesariamente, implicar contenido, no se sigue que este tipo de interacción sea, necesariamente no-mental. Bajo esta perspectiva, es posible que los organismos sean tanto *intencionalmente dirigidos*, activos, involucrados en compromisos dirigidos-al-mundo como responsivos informacionalmente, sin que esta dirección esté mediada por estados internos con contenido semántico. Como Hutto y Myin señalan: “Las formas más simples de vida son capaces de una respuesta intencionalmente dirigida” (Hutto & Myin, 2013, p.x), pero esta respuesta no es un asunto de interpretación, entendimiento o cualquier otro tipo de actividad representacional sofisticada.

La REC desarrolla su propia explicación de la direccionalidad intencional sin contenido a través de una versión modificada del teleofuncionalismo. En términos simples, el teleofuncionalismo es la perspectiva de que lo que hace que algo sea

una actividad mental tiene que ver con la función que desempeña en un organismo. La noción de función se concibe en términos de *funciones (biológicas) propias*, y tales funciones comúnmente se entienden a la luz de las condiciones evolutivas y/o históricas bajo las cuales las respectivas funciones fueron seleccionadas y/o adquiridas. Por lo tanto, el teleofuncionalismo explica por qué un organismo tiene ciertas capacidades biológicas y mentales, apelando al tipo de operaciones para las cuales tales funciones fueron seleccionadas, a fin de aumentar la probabilidad de lucha y supervivencia.

Muchos teleofuncionalistas son representacionistas con respecto a la mentalidad. La REC rechaza este compromiso del teleofuncionalismo. Según Hutto y Myin (2013) la direccionalidad intencional de las formas básicas de la actividad cognitiva (por ejemplo, cuando una rana usa su lengua como un látigo para atrapar a una mosca) están constituidas por su historia natural de selección. Llegamos a esta misma conclusión cuando discutimos arriba la quimiotaxis en organismos unicelulares; lo cual implica que la direccionalidad intencional tiene una dimensión normativa. Una forma de actividad intencionalmente dirigida (del tipo no-semántico) “busca provocar ciertos tipos de respuesta organizmicas a ciertas cosas (o tipos de cosas) y no a otras” (Hutto, 2006, p.142). Un bonito resultado de la REC es que implica una perspectiva de la mente dentro de la cual una transición de actividades carentes de contenido a otras llenas de contenido no indica una transición de la no-mente a la mente. La REC es, por lo tanto, una teoría transformativa de la mente en el ámbito de lo mental.

No todos los sistemas que ocurren naturalmente satisfacen la condición de la REC para la mentalidad. Esto es, no todas las cosas que existen exhiben direccionalidad intencional; por ejemplo, un termómetro. No porque un dispositivo como éste carezca de funciones sistémicas del tipo definido por el papel asignado al mismo. Según la REC, semejante maquinaria carece del tipo requerido de historia de selección natural asociada con las funciones biológicas apropiadas para que un sistema manifieste direccionalidad intencional. Si asumimos que la propuesta de la REC está en lo correcto, desarrollar el PEL no-cognitivistista bajo los auspicios del teleofuncionalismo de la REC implicaría entonces la siguiente restricción importante: que sólo un subconjunto de sistemas minimizadores de energía libre son intencionalmente dirigidos hacia ciertos motivos de su entorno local, y, por lo tanto, sólo un subconjunto de tales subsistemas es mental.

Este problema requiere mucha mayor discusión que la que aquí le daremos. No obstante, la distancia entre las versiones no-cognitivististas del PEL y el REC no es mucha, al menos no una vez que se reconoce un llamado a la historia de la selección. Así pues, leemos: “de acuerdo al RPP [i.e. procesamiento predictivo radical (*radical predictive processing*) basado en el principio de energía libre] la predicción de error desemboca no sólo en una escala ontogenética, sino también en una filogenética; si el cerebro (y el cuerpo) constituyen un modelo generativo, entonces aquellos [modelos generativos] que mejor se adecúan a su nicho ambiental serán seleccionados por evolución” (Allen & Friston, 2018, p.9). Esto es revelador. Allen y Friston (2018) reconocen aquí la necesidad de desarrollar una perspectiva de modelos generati-

vos, acoplamiento dinámico y actividad corporal en la línea sugerida por la REC. Al reconocer este traslape entre el PEL no-cognitivistista y la REC, llegamos a la conclusión de que es posible desarrollar una perspectiva no-semántica de organismos que minimizan la energía libre, sin que esto nos lleve a una generalización de lo mental sin restricciones.

Sin embargo, argumentaremos ahora que la REC se queda corta al defender una versión fuerte de la tesis de la continuidad vida-mente (nótese que esto no implica un dilema fatal para la REC al tener que dar cuenta de los orígenes del contenido en términos naturalistas; ver Hutto & Satne [2016] para mayor discusión). Por extensión, si el PEL no cognitivistista tuviera que desarrollarse dentro de los confines de la REC, también se quedaría corto en llegar a tal perspectiva fuertemente unificadora de la vida y la mente. La razón de esto es que una vez que el REC se añade al PEL, esta adición resulta en una perspectiva evolutiva tardía de la mente. REC sitúa los orígenes de la vida previos a la emergencia de la mente, dada su adopción al teleofuncionalismo. Se sigue que el REC puede caracterizarse por aceptar los siguientes tres supuestos: el primero, que existe la vida pero no la cognición; el segundo, que existe la vida y que la vida y la mente convergen cuando los sistemas vivos se hacen capaces de formas sin-contenido de la direccionalidad intencional, y, finalmente, que ciertos tipos de sistemas vivos (los seres humanos, por ejemplo) son capaces de comprometerse con actividad cognitiva con contenido semántico (como escribir o hacer matemáticas). No abordamos esta última implicación del REC, sino que nos enfocamos y nos hemos enfocado en una segunda afirmación, que es aquella según la cual organismos REC exhiben mentalidad –definida como acciones intencionales dirigidas– dada una historia de selección. Por lo tanto, aunado al PEL, el REC reduce el alcance del PEL no-cognitivistista, dado que su apelación a una historia de selección podría implicar que las primeras formas de vida no tienen propiedades mentales en tanto que carecerían (al menos todavía) de una historia natural de selección.

Estamos en desacuerdo con la perspectiva de la relación vida-mente que la REC conlleva, especialmente cuando resulta poco claro el trabajo explicativo que se está haciendo al apelar a la selección. Considérese, por ejemplo, cuando el primer sistema vivo empieza a dividirse. Este proceso resulta en un número de clones del primer sistema individual. Aunque, dadas las fluctuaciones ambientales, no todos los clones sean capaces de sobrevivir. Lo que nos lleva a la pregunta: ¿los sobrevivientes han sido “seleccionados naturalmente”? Si respondemos afirmativamente, entonces los sobrevivientes tienen direccionalidad intencional y los otros no. No obstante, es posible que no exista una diferencia funcional notable entre el individuo original y sus clones —independientemente de que sobrevivan o mueran. La implicación de esto sería entonces que organismos psicológicamente idénticos pueden diferenciarse en términos de mentalidad, lo que lleva a una preocupación filosófica similar a la que evoca el experimento pensado del “hombre del pantano” o la noción de zombies filosóficos (libres de energía).

Y aún más, la apelación a la “selección” arrastra problemas adicionales. Por ejemplo, ¿en qué punto podemos decir que una función fue “seleccionada”? ¿Se



trata acaso del momento en el que una función contribuye por vez primera a niveles relativamente mayores de reproducción de un organismo, comparados con los de sus congéneres? ¿O acaso se requiere de varias generaciones de individuos por encima de la aptitud (*fitness*) promedio? ¿Y cómo es que esta particular contribución de la función a la aptitud puede ser desenredada no-trivialmente del resto de factores en juego? Lo que es seguro es que sin duda, a lo largo de las generaciones, la selección natural puede cambiar la manera particular en la que los organismos se dirigen intencionalmente a su entorno, pero aún no es claro si en primer lugar este proceso evolutivo debería tomarse constitutivo de esta direccionalidad intencional como tal (y por ende, mentalidad básica).

#### 6. DE LA REC AL EA Y EL PEL NO-COGNITIVISTA: UNA FUERTE CONTINUIDAD VIDA-MENTE

Finalmente, sugeriremos una manera a partir de la cual rehabilitar efectivamente el problema arriba mencionado; y lo haremos mostrando que el PEL no-cognitivista también se encuentra a la par del enactivismo autopoietico (EA), permitiéndonos tejer así conjuntamente los orígenes de la vida y los orígenes de la mente (esta versión constituye un desarrollo más en la línea de argumentación perseguida en Kirchhoff [2018]).

La REC toma como punto de partida que existe una población de individuos que puede tomar forma por las fuerzas de la selección natural. Sin embargo, ¿qué es lo que es precisamente un individuo? (No estamos en posición de discutir esto a profundidad aquí —una tarea para otra ocasión. Para una discusión inicial detallada ver Pradeu [2016] y el resto de los artículos en *Biology and Philosophy*). Si este concepto es demasiado amplio, entonces dificulta delimitar apropiadamente la noción de direccionalidad intencional, dado que muchos tipos de sistemas pasan por historias de cierto tipo de selección respecto a su funcionamiento, como un termostato. Además, es innegable que el funcionamiento de un termostato puede ser descrito normativamente, esto es, en términos de si regula correctamente o no la temperatura. Sin embargo, dado que sus diseñadores y usuarios especifican externamente las condiciones de “corrección”, su normatividad es tan sólo un tipo derivado de normatividad; éste no es el caso de los sistemas vivos. Por ejemplo, nuestros cuerpos están regulando continuamente la temperatura para mantenerla dentro de unos límites específicos. Según el PEL, esto se logra por la minimización de la energía libre, en promedio y a lo largo del tiempo. Esta función se encuentra también sujeta a condiciones de éxito y fracaso, pero aquí las condiciones son intrínsecas al cuerpo en lugar de ser definidas de manera externa, por la simple razón de que están determinadas por un rango de viabilidad, que al final constituyen una cuestión de existencia, de vida y muerte (Allen & Friston, 2018).

Siendo justos, incluso un termostato descompuesto puede desintegrarse eventualmente por sobrecalentamiento. No obstante, esto no es suficiente para atribuirle una forma intrínseca de normatividad. La diferencia principal es que nuestro cuerpo, o cualquier sistema vivo en este caso, y en contraste con el termostato, es

un sistema físicamente auto-productivo (autopoiesis). Vivir es un proceso que se mantiene a sí mismo lejos de condiciones termodinámicas de equilibrio al invertir trabajo en prevenir su propia desintegración. De esta manera, debe definir una frontera entre lo que le pertenece a sí mismo y lo que le pertenece a su entorno. Esta frontera lo define como un individuo autónomo. Según el PEL no-cognitvita, un sistema semejante es un sistema adaptivo capaz de una inferencia activa con una manta de Markov, donde la manta de Markov no conlleva nada parecido a una frontera epistémica que separa la mente del mundo. Mientras que el modo de ser de un termostato se caracteriza por una persistencia pasiva, un organismo se caracteriza por una existencia activa (o inferencia activa). Sin mencionar que, dado que el ser de un organismo es su hacer, su existencia como individuo es inherentemente precaria y aun así los seres vivos generalmente hacen todo lo que pueden para mantener su forma de vida contra todo pronóstico. Esto es, a pesar de tener la posibilidad de dejarse simplemente sucumbir ante las fuerzas de decaimiento y desintegración, consistentemente regulan sus fronteras para evadir este destino. En otras palabras, los seres vivos no pasan simplemente por perturbaciones como los sistemas no-vivos, sino que responden selectivamente, y el éxito de esta respuesta está normativamente ligado a la preservación de su forma de vida.

Por lo que el EA nos da los inicios de una versión de cómo el origen de la vida es también el origen de una individualidad autónoma y de una normatividad intrínseca (los orígenes de sistemas que mantienen los estados internos de sus mantas de Markov, vía inferencia activa). Sin embargo, al principio esta normatividad no es específica de una función particular sino que concierne a un individuo como un todo: toda la actividad que no mata al individuo tiene un valor positivo para el sistema vivo. La actividad que mata al individuo tendría un valor negativo excepto que ya no puede ser así para el sistema (que ya no está). A fin de poder ser capaz de funcionar de una manera más eficiente, es necesario que el sistema vivo sea capaz de responder de manera diferencial y, particularmente, de detectar y evitar interacciones potencialmente letales antes de que éstas se vuelvan letales. Es poco posible que este tipo de complejidad pueda emerger espontáneamente en el origen de la vida, en tanto requiere una historia de selección, concebida en términos generales como el resultado de la interacción, el desarrollo y la evolución. En otras palabras, es aquí donde el EA se conecta con las preocupaciones de la REC y la direccionalidad intencional entra en escena como una manera de responder adaptativamente a características relevantes del medio interno y externo del organismo. Mientras que el EA ayuda a la REC a constreñir apropiadamente su apelar a una historia de selección; en respuesta, la REC puede ayudar al EA a crear un puente a la “brecha cognitiva” (Froese & Di Paolo, 2009) entre mentes básicas y mentes no-básicas.

Aproximarse a la direccionalidad intencional de esta manera tiene la ventaja de llegar al contexto de un individuo autónomo del que ya se encuentra activamente distinguido, al mismo tiempo que relacionado con, lo que es otro (su entorno) y cuya actividad ya está intrínsecamente caracterizada por una forma básica de normatividad holística. Además no hay necesidad de preocuparse por el estatuto

mental de artefactos con funciones seleccionadas artificialmente, dado que carecen del criterio de vida básica (autopoiesis y adaptividad, ver Froese & Ziemke [2009]). La direccionalidad intencional es en efecto, bajo esta perspectiva, un refinamiento y elaboración de un perfil existencial básico por medio de historia selectiva. Las condiciones de lo que la REC considera una mente básica, es decir, un individuo autónomo que tiene normatividad intrínseca, ya estarían dadas. De ser así, podemos decir que tanto la mente básica como la vida básica emergen juntas en el origen de la vida, un evento de capital importancia, que después debería reconceptualizarse como el origen de la-vida-y-la-mente —como los orígenes de organismos con mantas de Markov capaces de mantener sus propios estados internos (o procesos) a través de una inferencia activa (en este artículo hemos dado pasos hacia el desarrollo de una aproximación a la tesis fuerte de la continuidad vida-mente que puede juntar revelaciones clave del principio de energía libre con los últimos trabajos en la ciencia cognitiva enactiva. No obstante, esta tarea está lejos de estar concluida. Sospechamos que trabajos posteriores de este proyecto buscarán evaluar el PEL no sólo en relación con los marcos de la REC y el EA, sino también en términos de otras versiones de dinámica predictiva y anticipativa. Para trabajos apuntando en esta dirección, ver Bickhard [2016], Rosen [2012], y Nasuto & Hayashi [2016]).

## 7. CONCLUSIONES

Si algo como el PEL es lo suficientemente apropiado para abordar la relación vida-mente, entonces la vida y la mente co-emergen dentro de la amplia clase de procesos que le conciernen a la minimización de incertidumbre. Sin embargo, no existe ninguna versión singular de esta clase general para pensar la relación entre vida y mente. En este texto, hemos explorado dos perspectivas diferentes del PEL en torno a la relación vida-mente. En primer lugar, argumentamos que el PEL cognitivista implica que no existe continuidad entre la vida y la mente. Esencialmente, el apelar del cognitivismo al contenido semántico como signo de lo mental sitúa una alta barrera que sólo puede ser cruzada por un pequeño número de especies recientes y, potencialmente, por sus artefactos. En segundo lugar, argumentamos que formulaciones demasiado generosas del PEL no-cognitivista amenazan con implicar que la mentalidad se encuentra prácticamente en cualquier lugar.

Para evitar estas implicaciones, posteriormente argumentamos que una versión no-cognitivista del PEL puede restringirse útilmente al integrarse a ideas clave de la ciencia cognitiva enactiva acerca de la individualidad y la normatividad. Finalmente, concluimos que la versión más contundente de la relación vida-mente las trata de fuertemente continuas y que esta continuidad se basa en conceptos particulares de vida básica (autopoiesis y adaptividad) y mente básica (intencionalmente dirigida aunque no semántica) en el contexto del principio de energía libre.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Kirchhoff fue apoyado por un Proyecto de Descubrimiento del Consejo de Investigación Australiano (Australian Research Council Discovery Project) “Minds in Skilled Performance” (DP170102987); la beca “Probabilitizing Consciousness: Implications and New Directions” de la Fundación John Templeton; por una beca Mind, Brain and Cognitive Evolution de la Universidad Ruhr de Bochum (RUB), y por una beca académica de formación cruzada de la Fundación John Templeton en el Wellcome Trust Center for Neuroimaging de la University College de Londres (UCL). Las opiniones expresadas en esta publicación son propias de los autores y no necesariamente reflejan la perspectiva de la Fundación John Templeton. Por su parte, el trabajo de Froese fue apoyado por el galardón Vice-Chancellor’s International Scholar Award de la Universidad de Wollongong (UOW), y por el proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT: “Explorando los alcances de la auto-organización social: Desde la cultura hasta la célula” (IA104717) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Un agradecimiento especial a Karl Friston, Jelle Bruineberg, Micah Allen, Thomas Parr, así como para los asistentes al encuentro de neurobiología teórica del 13 de marzo, en UCL, por una discusión fructífera. Asimismo, un agradecimiento a Marcin Milkowski, Tomasz Korbak y Paolo de Jesus por sus comentarios en una sesión Academia.edu acerca de este artículo. Finalmente, un gran agradecimiento a los cuatro revisores anónimos por sus excelentes sugerencias para mejorar el texto.

## REFERENCIAS

- Allen, M. & Friston, K.J., 2018. From cognitivism to autopoiesis: Towards a computational framework for the embodied mind. *Synthese*, 195(6), pp.2459–2482. doi:10.1007/s11229-016-1288-5.
- Auletta, G., 2013. Information and metabolism in bacterial chemotaxis. *Entropy*, 15, pp.311–326.
- Bickhard, M.H., 2008. Interactivism: A manifesto. *New Ideas Psychol.*, 27(1), pp.85–95.
- Bickhard, M.H., 2016. The anticipatory brain: Two approaches. In: Müller, V.C., (ed.), *Fundamental Issues of Artificial Intelligence*. Berlin/Heidelberg: Springer. pp.261–283.
- Bitbol, M. & Luisi, P.L., 2004. Autopoiesis with or without cognition: Defining life at its edge. *J. R. Soc. Interface*, 1, pp.99–107.
- Boden, M.A., 1999. Is metabolism necessary? *Br. J. Philos. Sci.*, 50, pp.231–248.
- Bruineberg, J., Kiverstein, J. & Rietveld, E., 2018. The anticipating brain is not a scientist: The free-energy principle from an ecological-enactive perspective. *Synthese*, 195(6), pp.2417–2444. doi:10.1007/s11229-016-1239-1.
- Bruineberg, J. & Rietveld, E., 2014. Self-organization, free energy minimization, and optimal grip on a field of affordances. *Frontiers in Human Neurosciences*, 8. doi: 10.3389/fnhum.2014.00599.
- Chalmers, D., 2015. Panpsychism and panprotopsychism. In: Alter, T., Nagasawa, Y. (eds.), *Consciousness in the Physical World: Perspectives on Russellian Monism*. Oxford University Press. pp.246–276.

- Clark, A., 2013. Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behav. Brain Sci.*, 36, pp.181–253.
- Clark, A., 2016. *Surfing Uncertainty: Prediction, Action, and the Embodied Mind*. Oxford University Press.
- Clark, A., 2017. How to Knit Your Own Markov Blanket: Resisting the Second Law with Metamorphic Minds. In: Metzinger, T.K. and Wiese, W., (eds.), *Philosophy and Predictive Processing*. Frankfurt: MIND Group. Ch.3. Disponible en: [knittingmarkov8.pdf](#) [consultado: 14.abril.2017].
- Colombo, M. & Wright, C., 2017. Explanatory pluralism: An unrewarding prediction error for free energy theorists. *Brain and Cogn.*, 112, pp.3–12. doi:10.1016/j.bandc.2016.02.003.
- Crauel, H., 1999. Global random attractors are uniquely determined by attracting deterministic compact sets. *Annali di Matematica Pura ed Applicata*, 4, 176(1), pp.57–72.
- Di Paolo, E., 2009. Extended life. *Topoi*, 28, pp.9–21.
- Friston, K.J., 2009. The free-energy principle: A rough guide to the brain? *Trends Cogn. Sci.*, 13, pp.293–301.
- Friston, K.J., 2010. The free-energy principle: A unified brain theory? *Nat. Rev. Neurosci.*, 11, pp.127–138.
- Friston, K.J., 2011. Embodied inference: Or ‘I Think Therefore I am, If I Am What I Think’. In: Tschacher, W., Bergomi, C., (eds.), *The Implications of Embodiment (Cognition and Communication)*. Exeter, UK: Imprint Academic. pp.89–125.
- Friston, K.J., 2013. Life as we know it. *J. R. Soc. Interface*, 10. doi:10.1098/rsif.2013.0475.
- Friston, K.J. & Frith, C., 2015. A duet for one. *Conscious. Cogn.*, 36, pp.390–405.
- Friston, K.J., Levin, M., Sengupta, B. & Pezzulo, G., 2015. Knowing one’s place: A free energy approach to pattern regulation. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(105). doi:0.1098/rsif.2014.1383.
- Friston, K.J. & Stephan, K.E., 2007. Free-energy and the brain. *Synthese*, 159, pp.417–458.
- Friston, K., Thornton, C. & Clark, A., 2012. Free-energy minimization and the dark-room problem. *Front. Psychol.*, 3, p.130.
- Froese, T. & Di Paolo, E., 2009. Sociality and the life-mind continuity thesis. *Phenomenol. Cogn. Sci.*, 8, pp.439–463.
- Froese, T. & Di Paolo, E.A., 2011. The enactive approach: Theoretical sketches from cell to society. *Pragmat. Cogn.*, 19, pp.1–36.
- Froese, T. & Ikegami, T., 2013. The brain is not an isolated “black box,” nor is its goal to become one. *Behav. Brain Sci.*, 36, pp.213–214.
- Froese, T. & Ziemke, T., 2009. Enactive artificial intelligence: Investigating the systemic organization of life and mind. *Artif. Intell.*, 173(3-4), pp.466–500.
- Gładziejewski, P., 2016. Predictive coding and representationalism. *Synthese*. 193(2), pp.559–582. doi:10.1007/s11229-015-0762-9.
- Godfrey-Smith, P., 2016. Mind, matter, and metabolism. *Journal of Philosophy*, 113(10), pp.481–506. doi:10.5840/jphil20161131034.
- Godfrey-Smith, P. & Sterelny, K., 2004. Biological Information. *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [online] Disponible en: [information-biological](#) [consultado: 14.abril.2017].
- Hohwy, J., 2012. Attention and conscious perception in the hypothesis testing brain. *Front. Psychol.*, 3, pp.74–87. doi:10.3389/fpsyg.2012.00096.
- Hohwy, J., 2013. *The Predictive Mind*. Oxford University Press.
- Hohwy, J., 2014. The self-evidencing brain. *Noûs*, 50(2), pp.259–285.

- Hohwy, J., 2015. The Neural Organ Explains the Mind. In: Metzinger, T.K. and Windt, J.M. (eds.), *Open MIND*. Frankfurt: MIND Group. Ch.19(T). Disponible en: [the-neural-organ-explains-the-mind](#) [consultado: 14.abril.2017].
- Hohwy, J., 2017. How to Entrain Your Evil Demon. In: Metzinger, T.K. and Wiese, W., (eds.), *Philosophy and Predictive Processing*. Frankfurt: MIND Group. Ch.2. Disponible en: [how-to-entrain-your-evil-demon](#) [consultado: 14.abril.2017].
- Hutto, D.D., 2006. Against passive intellectualism: Reply to Crane. In: Menary, R. (ed.), *Radical Enactivism*. London: John Benjamins Publishing Company.
- Hutto, D.D., 2008. *Folk-Psychological Narratives*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Hutto, D.D., Kirchhoff, M.D. & Myin, E., 2014. Extensive enactivism: Why keep it all in? *Front. Hum. Neurosci.*, 8, p.706. doi:10.3389/fnhum.2014.00706.
- Hutto, D.D. & Myin, E., 2013. *Radicalizing Enactivism*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Hutto, D.D. & Satne, G., 2016. Continuity scepticism in doubt: A radically enactive take. In: Durt, C., Fuchs, T., Tewes, C., (eds.), *Embodiment, Enaction, and Culture*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Kirchhoff, M.D., 2014. Experiential fantasies, prediction, and enactive minds. *J. Conscious. Stud.*, 22, pp.68–92.
- Kirchhoff, M.D., 2015. Species of realization and the free energy principle. *Australas. J. Philos.*, 93, pp.706–723.
- Kirchhoff, M.D., 2018. Autopoiesis, free energy, and the life-mind continuity thesis. *Synthese*, 195(6), pp.2519–2540. doi:10.1007/s11229-016-1100-6.
- Nasuto, S.J. & Hayashi, Y., 2016. Anticipation: Beyond synthetic biology and cognitive robotics. *BioSystems*, 148, pp.22–31.
- Piccinini, G., 2010. Computation in Physical Systems. *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [online] Disponible en: [computation-physicalsystems](#). [consultado: 14.abril.2017].
- Piccinini, G., 2015. *Physical Computation: A Mechanistic Account*. Oxford University Press.
- Pradeu, T., 2016. The many faces of biological individuality. *Biol. Philos.*, 31(6), pp.761–773.
- Rabinovich, M.I., Friston, K.J. & Varona, P. (eds.), 2012. *Principles of Brain Dynamics: Global State Interactions*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Rosen, R., 2012. *Anticipatory Systems: Philosophical, Mathematical, and Methodological Foundations*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Shani, I., 2006. Intentional directedness. *Cybern. Hum. Know.*, 13, pp.87–110.
- Shannon, C., 1948. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, 27, pp.279–423.
- Stewart, J., 1992. Life = Cognition: The Epistemological and Ontological Significance of Artificial Life. In: Varela, F.J., Bourgine, P. (eds.), *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press. pp.475–483.
- Stewart, J., 1996. Cognition = life: Implications for higher-level cognition. *Behav. Process.*, 35, pp.311–326.
- Thompson, E., 2007. *Mind in Life*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Tononi, G. & Koch, C., 2015. Consciousness: Here, there and everywhere? *Philos. Trans. R. Soc. B*, 370. doi:10.1098/rstb.2014.0167.
- Varela, F., Thompson, E. & Rosch, E., 1991. *The Embodied Mind*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wilson, R. & Foglia, L., 2011. Embodied Cognition. *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [online] Disponible en: [embodied-cognition](#) [consultado: 14.abril.2017].

## ¿CÓMO ACTUAR EN CASO DE EMERGENCIA?: GEOINGENIERÍA Y COMPLEJIDAD

Agustín Mercado-Reyes\*

EXISTE una ciudad modelo llamada Magnasanti cuyo diseño está orientado a un único fin: lograr un estado estable en donde se logren acomodar la mayor cantidad posible de habitantes en un espacio limitado. La forma de Magnasanti tiene una influencia directa en la calidad de vida y el comportamiento de sus habitantes. Por ejemplo, está planeada para que sus habitantes no necesiten salir de su calle para llegar a su trabajo y, en tanto que la movilidad se lleva a cabo a pie no tiene congestionamientos. Hay ciertos sacrificios, sin embargo, que se tienen que hacer en aras de la eficiencia. Si bien teóricamente la ciudad no tendría crimen, esto se debe a que la seguridad se lleva a cabo por una fuerza policial militarizada. El aprovechamiento del espacio implica la presencia de puntos de contaminación industrial distribuidos homogéneamente, lo cual, aunado a la ausencia total de un sistema de salud hace que la expectativa de vida sea de 50 años.

El diseño de Magnasanti fue planeado, a lo largo de varios años, por Vincent Ocasla —en ese entonces estudiante de arquitectura— utilizando *SimCity 3000*, un simulador clásico de urbanización lanzado en 1999.<sup>1</sup> *SimCity* es el videojuego abierto por excelencia. Las únicas reglas que contiene son las que determinan el comportamiento de cada celdilla del campo de juego, dependiendo del estado en el que se encuentren las celdas que la rodean. El simulador es lo suficientemente sofisticado como para proyectar la emergencia de comportamientos globales y locales, pero lo suficientemente sencillo como para elaborar un plan con un número reducido variantes controladas. En su modo más libre, no hay un objetivo fijo; el objetivo del juego es la experimentación, la observación de los efectos de dicha experimentación y la posibilidad de intervenir en cualquier momento para modificar el estado de la ciudad.

La importancia del experimento de Ocasla no radica en su capacidad de predecir un posible estado “real” de una ciudad. No creo que se pueda leer como una visión distópica factible, porque la simplicidad de *SimCity* no permite que sea viable como una proyección de una ciudad efectivamente existente. El punto que me interesa es que, en tanto que el simulador está formulado radicalmente como un

---

\* Posgrado en Filosofía de la Ciencia, Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>1</sup> Recientemente, el diseño de Magnasanti ha sido adquirido por el Museo de Arte Moderno de Nueva York (MoMA) e integrado a la colección “Design and Violence”. Ver [sim-city-magnasanti-vincent-ocasla](#) (consultado: 1.junio.2017).

*sandbox*, una experiencia sin un objetivo final fijo, la noción misma de propósito, la condición de “ganar el juego”, queda abierta a cualquier interpretación. En el caso de Magnasanti, el valor elegido fue el tamaño poblacional y la estabilidad demográfica. La salud de los habitantes o las preocupaciones ambientales, por ejemplo, son factores irrelevantes para encontrar una solución estable para una pregunta determinada. La ausencia de objetivos del simulador hace imposible defender más allá de toda duda que Ocasla derrotó al juego; pero, simétricamente, es imposible demostrar que no lo hizo. En este caso, el lazo entre la teoría y la práctica se revela a través de una decisión deliberada, en la cual se selecciona una variable protagónica que rige la acción. Mi objetivo en el presente texto es intentar pensar en la importancia de dicha decisión, utilizando emblemáticamente la palabra “emergencia” para explorar los complicados lazos de esa decisión con las ciencias de la complejidad.

En la situación actual de emergencia ecológica esta reflexión se vuelve inevitable, porque el estado actual de las cosas se cuele —aunque no lo deseemos, aunque tratemos de practicar un escapismo— a encarar cotidianamente las posibilidades y consecuencias de un cambio potencial a una escala no local. Como lo pone Timothy Morton (2013, p.99): ya no es posible llevar a cabo un intercambio de frases cordiales (“¡Qué calor está haciendo hoy!”, “¡Pero qué tiempo tan raro ha hecho este verano!”) sin que aparezca sobre la conversación trivial el espectro de estar hablando sobre una crisis de proporciones globales. En efecto: el estado de las cosas hace necesario un pensamiento constante, aunque no sea explícito, acerca de las posibilidades y consecuencias asociadas con una serie de intervenciones a gran escala sobre un sistema complejo.

La crisis es algo que permea a través de una característica insidiosa: sólo es caracterizable de manera terminante a través de una marea de datos interrelacionados —medidas de temperatura, concentración de distintos gases en la atmósfera, áreas diferenciales de terrenos congelados o de terrenos secos— por lo que se hace efectiva y simultáneamente visible e invisible, delimitada a través de una superposición de entidades teóricas, simulaciones computacionales, tecnologías de medición, políticas y criterios institucionales, etcétera. Está en el futuro y aquí al mismo tiempo: “es como darte cuenta de que habías estado realizando tus tareas diarias en la esfera en expansión de una bomba atómica en cámara lenta” (Morton, 2013, p.103). En efecto: esta situación global pone sobre la mesa el carácter inescapablemente contradictorio de lo que, para fines prácticos, podemos llamar “realidad”. Está formada de tal manera que simultáneamente pone en relevancia el carácter global de nuestros modos de vida actuales y la imposibilidad de homogeneizar estos modos en términos generales. Pone en relevancia tanto la penetración inevitable de consecuencias potenciales, la expansividad de dichas consecuencias, como la multiplicidad de las maneras en que estas consecuencias puedan expresarse. Los efectos de esta situación vendrán inevitablemente a través de la intervención, de la inercia, de la inacción, o de una combinación entre ellas; ninguna de estas opciones excluye a las demás; pero en distintos momentos y lugares, los efectos se expresarán de manera asimétrica y, en muchas ocasiones, inesperada.



La disolución de las fronteras de los tiempos cotidianos y de los tiempos geológicos, una disolución aún más dramática que la eliminación de la frontera entre el tiempo ecológico y el evolutivo, nos posiciona en un estado de sensibilidad a la urgencia. No ayuda el recordatorio constante que esa urgencia hace referencia a una crisis en proceso de aceleración que es, en primer lugar y sobre todo, de carácter biológico. Frente a tal escenario, una pregunta insiste: ¿Cómo actuar frente a un estado de emergencia? Esta palabra es valiosa por su polisemia, que en inglés desdobra con un cambio de una sola letra: *emergence* y *emergency*. Es bajo este doble significado en donde se moverá este texto. Por un lado, la emergencia como urgencia marca un estado en donde más y más frecuentemente se habla de comprar tiempo, retrasar un poco la catástrofe para tratar de encontrar una manera, que aún no tenemos, de evitarla. En este modo de emergencia, la discusión acerca de la validez del término *antropoceno* no gira en torno a su carácter fundamentado en evidencias, sino a los distintos discursos potenciales que moviliza el homogeneizar responsabilidades, de olvidar la heterogeneidad de los actores que han tomado parte en un proceso. Es aquí donde me parece entrever una conexión con el otro modo de emergencia: aquel que está marcado por la constitución propia del proceso que la hace surgir, por la aparición de una especie de sorpresa. No únicamente sorpresa: una sorpresa que obliga a dar testimonio de ella. Los testimonios pueden estar formulados de distinta manera; como preguntas o como explicaciones, por ejemplo. Pero siempre implican un esfuerzo de poner en relevancia distintas líneas que se expresan en un problema. De nuevo: la imposibilidad de homogeneizar un resultado y de olvidar la heterogeneidad de lo que se moviliza.

Isabelle Stengers (2004), quien propone esta noción de sorpresa, la asocia con otra polisemia, la de la palabra *wonder*: una reacción de asombro frente a algo que maravilla, pero también la acción creativa de problematizar algo. Esta sorpresa se encuentra en el corazón de los fundamentos teóricos de la complejidad; su olvido trae consigo un modo de relacionarse con el mundo. El olvidar la sorpresa trae consigo actitudes que considero que están relacionadas tanto con el punto crítico en que nos encontramos, como con las actitudes que se toman frente al problema de la crisis. Son actitudes de diverso tipo, pero en general están centradas en una idea de control: la necesidad de llevar todo a un terreno deductivo, la consideración de una reacción mecánica frente a una crisis, la presuposición de que la naturaleza<sup>2</sup> es muda. Tomando como emblema la pregunta que le da título y tomando como guía distintas ideas de Stengers, la tarea de este texto es tratar de entender, de manera necesariamente fragmentaria, cómo es que el olvido permea las formas de hacer frente a una crisis.

Es posible tomar distintas actitudes frente a una pregunta; y cada una de estas actitudes determina la naturaleza de dicha pregunta. Una manera de acercarse a

---

<sup>2</sup> Hago uso de la palabra "naturaleza" a pesar de las advertencias que hace Timothy Morton (2007) acerca del concepto que parece establecer un dominio separado de lo humano, controlable y estable. Estoy de acuerdo con esa crítica y, como se verá, trato de seguirlo en su idea de un pensamiento ecológico. Sin embargo, creo que hay otros tipos de conceptos de "naturaleza", como la naturaleza activa de Stengers, o el difícil concepto de la Naturphilosophie de Schelling, que trató de observar simultáneamente intuiciones metafísicas y los datos científicos de sus contemporáneos.

ella, tal vez la manera a la que automáticamente se tiende a seguir, es buscar una respuesta. Es el modo usual de cualquier investigación; sobre todo de aquellas que están financiadas, de aquellas que necesitan presentar un producto final aplicable. Lo deseable sería que el camino estándar de las preguntas desembocara en una certidumbre al menos parcial. Aquí trataremos de seguir otra ruta, la cual empieza por considerar a la pregunta como una especie de representante de algo más profundo, a lo cual llamaremos "problema". Lo más importante de esta concepción de un problema es que éste es un elemento *real*. No depende de una manera de responderlo o solucionarlo, porque no depende de una conceptualización. Al contrario: aceptar a un evento como problemático es un primer paso para que nosotros podamos, poco a poco, construir o reconstruir una serie de conceptos que nos apoyarán para lidiar con él. Visto de esta manera, un problema no es algo negativo, como una falla que se necesite reparar o una complicación cuya presencia tiene que ser erradicada. Aquí trataremos a un problema como una invitación a una creatividad constante; una invitación que reside no en nuestro poder (humano) de invención sino en la constitución misma de la realidad.

La situación crítica en la que estamos puede ser integrada como uno de los componentes del problema. Mi intención no es hacer de la crisis que se está desarrollando actualmente algo utilitario, como si fuera una especie de pretexto para un ejercicio pasivo retórico, sino precisamente lo opuesto. La situación de crisis pone en relieve la importancia de construir el concepto central de la pregunta, aquel de *acción*. La labor de construcción sólo se puede realizar cuando deliberadamente resistimos a tomar a una crisis como un evento que se necesite reparar y, particularmente, a planear esa reparación como una intervención sobre un conjunto limitado de variables o, peor aún, sobre una única variable, sea esta variable la temperatura, la radiación o la concentración de un compuesto químico cualquiera en la atmósfera. Lo que aquí se llama "problemático" es una característica de todo; y la presencia de esta característica *obliga* a una relación distinta, de doble dirección, con la crisis. Una dirección de esta relación es nuestra actitud frente al sistema en donde ocurre la crisis; la característica inevitablemente problemática hace de ese sistema (que podemos llamar sistema ambiental o ecológico) un conglomerado de eventos que pueden ser totalmente imprevisibles. Por lo tanto, la intervención directa sobre él puede ser modelada, pero nunca replicada para tener sobre él un control total. La otra dirección es lo que lo ecológico impone en nosotros: un replanteamiento de la manera de tratar los problemas, del propio pensamiento, que no repita una y otra vez el mismo patrón. En esta cámara de eco, la pregunta será un avatar del problema, pero no su única imagen.

En pocas palabras: lo que trato de decir aquí es que la acción en tiempos de crisis es un problema importante; pero que ese problema no necesariamente se tiene que acorralar a través de una intervención dada por una única variable, sino que es necesario considerar que la acción puede tener otros modos de realización.

Dicho esto, espero que no resulte sorprendente que el texto no busque una respuesta directa a la pregunta. No considero que esto deba de leerse como un fracaso. Una respuesta tajante a una pregunta acerca de la acción (a pesar de que sea una

respuesta vacilante, de que se construya a través de *provisos* y *caveats*) necesariamente toma la forma de una recomendación o sugerencia de una normatividad. En cierto sentido, ofrecer una normatividad e incluso intentar ofrecer las bases que requiere toda normatividad sería un movimiento contrario al grano de lo que aquí se intenta decir: que para ofrecer una base para actuar que sea aceptada como incuestionable es necesaria la imposición de un aparato normativo. Incluso el análisis de los riesgos potenciales tiene, cuando se persigue ese objetivo, de realizarse y de evaluarse a través de un aparato que diga explícitamente qué tipo de elementos son relevantes, y cómo lo son. Lo que trato de hacer aquí es simplemente configurar a la pregunta como un problema real: de darle el poder de hablar en distintos registros y seguir, de manera necesariamente breve, algunos de estos registros.

\* \* \*

En este momento se lleva a cabo una discusión acerca de una posible toma de acción frente al problema del calentamiento global: es una discusión afortunadamente coral y polifónica, por lo que creo que ningún especialista podría manejar todas las variables necesarias para hacer un recuento total de los puntos que se han considerado relevantes. No es lo que voy a hacer aquí, porque este texto no es una reseña que presente el abanico de opciones para sugerir “la mejor”. Aquí sólo me referiré brevemente a una única propuesta para un curso de acción: a la promesa encarnada en lo que se conoce como “geoingeniería solar”. En breve, esta propuesta implica el incremento de la reflectividad global del planeta a través de la modificación de la composición química de las capas altas de la atmósfera.

Existen algunas variantes alrededor de la geoingeniería solar. Hay propuestas de colocar en órbita una serie de espejos orientables (McInnes, 2010), o de rociar distintas soluciones en las capas superiores de la atmósfera, como sal de mar (ver Zhang, et al., 2014). La más comentada el día de hoy es probablemente la inyección de partículas de compuestos de azufre (el ácido sulfúrico es un contendiente bastante fuerte) en la estratósfera (Keith, 2013, p.89). Esta opción hace eco de uno de los mitos de origen de la geoingeniería con aerosoles, es decir, la erupción espontánea del volcán Pinatubo de 1991, durante la cual la temperatura global descendió significativamente (0.5 °C) durante algunos meses. En efecto, en el reporte inicial de este efecto, Hansen, et al. (1992) consistentemente se refirieron a la erupción como “el gran experimento climático de la naturaleza”. Este plan no es un arreglo definitivo de un problema extremadamente complicado. Según los propios proponentes de la geoingeniería solar, sólo sería una medida paliativa. El dióxido de carbono y los otros gases de efecto invernadero permanecerían, desde luego, en la atmósfera. Esto es algo que causa un riesgo inherente, pues si en algún momento alguien decide empezar a inyectar compuestos de azufre en las capas altas de la atmósfera y, posteriormente, decide suspender el tratamiento, la temperatura del planeta subirá bruscamente en un efecto de rebote —lo cual es un escenario mucho más peligroso que el aumento relativamente rápido pero gradual que se ha observado en las últimas décadas.

La geoingeniería solar asume un concepto de acción particular sin cuestionarlo. Se podría enunciar así: la acción que tenemos que tomar es, de manera indiscutible, una de intervención. Cualquier movilización de conocimiento (teórico, práctico, tecnológico) está al servicio de una sola manera de entender el problema. Funciona para explicar el concepto de problema que he tratado de explicar: si la geoingeniería se toma, incuestionablemente, como una solución, el problema ha quedado restringido a una configuración profundamente limitada. Bajo el signo de la geoingeniería, el concepto de acción está fijo: hace referencia implícita a una interacción, a una modificación mecánica, derivada de la invisibilización tanto de *variables* (por ejemplo, las aproximaciones y el descarte de factores para poder lidiar con un sistema de otro modo incomputable) como de *variaciones* (cambios cuyo efecto en un complejo de aspectos relacionados difícilmente podrían ser reducidos a una lógica numérica, lineal, o completamente libre de contradicciones sin hacer violencia a la lógica propia de las diversas expresiones potenciales de dichos cambios).

Esto quiere decir, por un lado, que se apega a un ejercicio de modelización, en el que es necesario apelar a una aproximación que sea lo suficientemente buena y lo suficientemente cercana a lo que se desea lograr. Nunca se podrá obtener una descripción infinitamente precisa; y las razones que se darán para explicar este defecto son muchas. Se podrá apelar al poder de cómputo limitado, por ejemplo, que impide que se calculen todas las trayectorias de todas las partículas que se pondrán en juego. También se podrá decir que las capacidades de medición son finitas, por lo que habrá necesariamente un error instrumental. Aún más: este error instrumental puede esconder detrás de sí un exponente de Lyapunov positivo de la serie de tiempo en la que se represente un comportamiento. Cualquier ley que podamos declarar sobre el sistema será una mentira, como ya lo ha dicho Cartwright (1983). Sería necesario realizar un modelo, evitar las variables que puedan introducir ruido a las predicciones y acercarnos lo más posible a una descripción (y por tanto a una predicción) que sea *suficientemente buena*.

No es este juego de variables, la decisión de incluir algunas y no otras, lo que interesa en el presente texto, sino un lado radicalmente distinto. A final de cuentas, lo que me interesa es el concepto de acción, usando como estandarte a la emergencia, como entiendo que la describen las ciencias de la complejidad; y la decisión de la abstracción de variables es moneda corriente en la ciencia desde varios siglos antes de que las ciencias de la complejidad hicieran su aparición, al final de los años sesenta del siglo XX. No son las variables, sino las variaciones lo que me interesa explorar aquí. En efecto, son sólo las variaciones lo que permitirá la construcción de un concepto filosófico; que pueda explorar de manera abierta lo que puede ser, los comportamientos que pueden aparecer sin anunciarse previamente, las maneras en que los elementos del sistema pueden crear relaciones y redes novedosas y sorprendentes entre sí.

Si lo problemático, como lo hemos abordado, es constitutivo de la realidad, esta acción —aunque sea una acción que aún no ocurre en la actualidad, que es una acción futura— tiene un componente problemático. Este componente la ha alimentado antes de que adquiriera una configuración alrededor de ciertas soluciones y

de ciertos objetivos fijos como, en este caso, la reducción de la temperatura global o el evitar que se llegue a los puntos proyectados incluso por las simulaciones más optimistas. Cuando se consideran los tiempos en los que se perfilan estas proyecciones,<sup>3</sup> el sentimiento inmediato es de urgencia. Parece ser necesario tomar acción *ahora*. No creo que sea casualidad Paul Crutzen, quien comenzó a popularizar el término de “antropoceno” (Crutzen, 2002), haya publicado una exasperada llamada a redoblar los esfuerzos de investigación de geoingeniería (Crutzen, 2006). En efecto, el panorama del diluvio de datos de la gran aceleración pone sobre la mesa un mundo en el que no será posible detener una tendencia y en donde se prepara el escenario para revivir la leyenda de Casandra. Los datos, en este sentido, se empiezan a configurar como una reivindicación de los que en estos momentos son llamados locos —literalmente.<sup>4</sup>

Para hacer virar este complejo de Casandra, este clima de catástrofe necesaria, es posible, según considero, tomar el tiempo de ir en la dirección contraria: tomar un respiro, evitar que las soluciones se precipiten, y *alentar* el pensamiento. El término de “pensamiento lento” está utilizado en el sentido cosmopolítico de Stengers (1997, vol. 5, cap.3; 2005). No quiere decir dejarse caer en la apatía ni paralizarse ante el carácter imponente de la complejidad; más bien se podría entender con el oxímoron *festina lente*. Es tratar de lanzar el pensamiento a otros elementos que constituyen el problema, tratar de sondearlo. Por decirlo así, poner un oído en la tierra y aprender a atender a las vibraciones. Entre otras prácticas, es tratar de pensar lo que no es inmediatamente evidente, lo que no se deduce de la postulación de las soluciones o lo que no se toma por sentado cuando la solución se postula como tal. De esta manera, la supuesta solución al problema del calentamiento global en realidad se llena, otra vez, de contenidos problemáticos y deja de tener la claridad que le confería un movimiento rápido de pensamiento.<sup>5</sup> En esta claridad, la relación de causa y efecto es clara, y se puede describir en términos exclusivamente termodinámicos: por un lado, un cambio en el ingreso energético al sistema delimitado como “el planeta”; por el otro, la reducción cuantitativa de una medida macroscópica de estado.

¿Es posible, sin embargo, reducir cualquier predicción de estas intervenciones a un modelo de reducción de temperatura? Es aquí en donde las nociones de las ciencias de la complejidad, y sus puntos de origen en un modo distinto de comportamiento que no es el de los sistemas en equilibrio, empiezan a revelarse como elementos necesarios de discusión. Una modificación de este estilo rechaza (al menos)

<sup>3</sup> Por ejemplo: el escenario más optimista (basado en las predicciones de la trayectoria de aumento de la concentración de gases de invernadero, cuya trayectoria es designada por el IPCC como RCP 2.6) es una elevación promedio de 1 °C al final del siglo XXI, y corresponde al prácticamente imposible escenario en el que después del 2020 comience a caer la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera; ver Collins, et al., (2013).

<sup>4</sup> Ver, por ejemplo, el artículo de Pierrehumbert en [nrc geoengineering report climate hacking](#) (consultado: 3.junio.2017); ver también Robock (2008).

<sup>5</sup> La distinción entre “rápido” y “lento”, entre *celeritas* y *gravitas*, es explorada por Deleuze y Guattari (1980, p.460), en donde afirman que entendidos de esta manera, los conceptos no se diferencian por un cambio de una magnitud cuantitativa, sino que son cualitativamente modos distintos y complementarios.

dos elementos teóricos que han sido propugnados por las ciencias de la complejidad. En primer lugar, pone total confianza en que el sistema global (en este caso, el planeta) puede ser competentemente descrito en términos de una única magnitud —el cambio *lineal* de la temperatura. En segundo lugar, deliberadamente ignora, al colapsarlas en la magnitud única, las *singularidades locales* que puede presentar cualquier sistema, particularmente cuando se encuentra en un régimen lejano al equilibrio.

La confianza en que la omisión voluntaria de estos dos puntos, a mi parecer fundamentales, no es relevante —es decir, que son dos puntos presentes pero omitibles en términos prácticos— pone en primer plano la creencia de que en la realidad física la reversibilidad es el comportamiento esperado. Si eliminamos una fracción de la energía solar que ingresa al sistema, parecen decir los proponentes de la geoingeniería como Keith, habrá una reversión a un estado previo global, el cual podrá ser rastreable a través de la disminución de la magnitud promedio de temperatura. Creo que esto es innegable, porque la geoingeniería no podría postularse como un *techno-fix* si no prometiera un regreso a un punto en el pasado, en el que todavía podríamos hacer algo; un regreso en el tiempo en el que además podemos conservar nuestro conocimiento técnico, en el que podremos intervenir utilizando lo que ahora sabemos. En este sentido, es un punto en común con las posiciones que pretenden reducir el comportamiento físico a una descripción puramente dinámica. En el caso de la reversibilidad detrás de la geoingeniería solar, no se trata únicamente de un problema de insuficiencia de poder computacional; se trata de la manera de construcción del problema, limitándolo a pedir cierto tipo de soluciones relevantes, sin detenerse a considerar que basa su pensamiento en modos de plantear el problema que obligan que dicha solución se precipite.<sup>6</sup>

Sirva este acercamiento sumario al conjunto de propuestas de la geoingeniería, especialmente aquella de la geoingeniería solar, para comenzar a hablar de un punto extremadamente visible. El despliegue de esta tecnología es un intento de llevar a cabo un “buen antropoceno”, en el que los humanos tomemos la batuta de la trayectoria dinámica del sistema que es el planeta. Desde cualquiera de las alternativas que se establecen, se asume que una modelización es apropiada para tener una visión aproximada de los efectos que se ocasionarán; o, al menos, lo suficientemente apropiada para tomar una decisión eventual acerca de la conveniencia o necesidad de aplicar este plan. La geoingeniería toma como ciertos los datos expresados en los modelos, y usa esta certeza para dirigir una intervención que se sabe que afectará a otros. En el caso de la aspersión de aerosoles de azufre ese efecto sobre otros es particularmente intenso: en realidad, el costo neto y la tecnología necesaria están al alcance de varios países. De hecho, este es uno de los puntos problemáticos de esa propuesta: es posible que alguien —una empresa o

<sup>6</sup> Las presuposiciones profundas, y particularmente los problemas temporales que ofrece una visión enfocada a una reversibilidad fundamental ha sido analizada en extenso en los libros *Cosmopolitiques* de Stengers (1997), particularmente en los volúmenes 5 y 6. La noción de una reversibilidad ontológica, que obliga a una concepción determinada de la existencia física (por ejemplo, a lo físico como algo puramente dinámico e integrable en el sentido hamiltoniano), y que es el enfoque del componente de temporalidad del problema, contrasta con el uso del concepto antropocéntrico de lo irreversible.

un gobierno— decida hablar por el resto del mundo, unilateralmente.<sup>7</sup> Resuena, en este momento, la crítica que hace de Clive Hamilton y que David Keith recupera (Keith, 2013, pp.144—145): ellos imponen una visión del mundo distintivamente estadounidense al problema de la geoingeniería. En efecto, ya no se trata únicamente de la actitud general de lidiar con el riesgo ambiental a través de una confianza en un *techno-fix*, en oposición (al menos según la opinión de Hamilton) al activismo ambiental europeo. En la administración actual de Estados Unidos, liderada por Donald Trump, hay figuras en altas posiciones, como Rex Tillerson (el secretario de estado y ex-CEO de Exxon) o David Schnare (negacionista del cambio climático y parte del equipo de transición de Trump para dirigir la Agencia de Protección Ambiental estadounidense), que han apoyado financiera, política y económicamente las propuestas de geoingeniería solar.<sup>8</sup>

Creo que es posible observar una red complicada de conexiones acerca de cómo y por qué en algún momento una práctica —o, al menos, una manera de interactuar con una práctica— puede sugerir que confiere el poder de hablar por otros. Creo también que las ciencias de la complejidad, como fueron consideradas por figuras que les dieron un motor filosófico propio, como Stengers y Prigogine, pueden ayudar a observar ese nudo complicado que es la intervención sobre un sistema en crisis. En este nexo existen hebras conceptuales tanto éticas como ontológicas; el interés de este texto son las últimas, pero en este tipo de problemas (*super wicked problems*, como les ha llamado Morton, 2016a, p.37) es difícil, si no imposible, mantener una separación siquiera operativa. Frente a tal magnitud del problema, ¿es posible evitar o limitar la acción de “hablar por otros”? ¿cómo es que el pensamiento impone una red real de significados desde la plataforma de cada práctica?, ¿cómo es posible fabricar un concepto de los eventos que pueden llegar a ocurrir que dé cuenta de la creatividad que señala la complejidad?, ¿cómo, en pocas palabras, actuar en casos de emergencia?

\* \* \*

El análisis de la geoingeniería no es decidible desde un único punto de vista. Las preguntas que levanta tienen que ver con conceptos tan dispares como reversibilidad e irreversibilidad, autonomía y soberanía, predicción y control, o totalidad absoluta y singularidades locales ¿Qué relación tiene esta multiplicidad de miradas sobre una acción con las prácticas de la emergencia? Propongo este fragmento de Stengers como punto de partida para esta pregunta inevitablemente complicada:

The emergence of out-of-equilibrium order can be associated with a kind of surprise no explanation can eliminate. Sensitivity is emerging; it cannot be attributed to the molecules, the individual behaviors of which remain impeccably random. Sensitivity is, as such, a far-from-equilibrium property. And as a result the definition of equilibrium states have changed. At equilibrium what

<sup>7</sup> Ver, por ejemplo, [A cheap and easy plan to stop global warming](#) (consultado: 1.junio.2017).

<sup>8</sup> Ver el reporte [Trump administration geoengineering administration](#) (consultado: 1.junio.2017).

physicists define as correlations, measuring the kind of togetherness among randomly interacting constituents, are by definition of zero range and intensity. (Stengers, 2004, p.94)

En este fragmento particularmente cargado de referencias, tenemos, en un inicio, la sorpresa asociada a la emergencia. La emergencia, dicho de una manera abstracta y mínima, es la noción de un comportamiento descentralizado, que sigue un patrón que identificamos como una organización. Creo que la mención de correlaciones de esta cita hace un guiño implícito a la hipótesis del caos molecular de Boltzmann,<sup>9</sup> en donde se asume que en efecto “las correlaciones” de los átomos o moléculas de un gas “son por definición de orden e intensidad cero”, y por tanto no existe una asimetría en el camino aparentemente inevitable hacia el equilibrio. La trayectoria de un sistema, desde el punto de vista del caos molecular, se vacía de la sorpresa necesaria para la complejidad y la emergencia, porque puede ser explicada de modo completamente mecánico por meras colisiones sin memoria entre las partículas. Los trabajos de Prigogine y sus colaboradores tratan de reintroducir las correlaciones a la visión de la naturaleza.

En el pasaje de Stengers citado arriba, las correlaciones trascienden al mero comportamiento termodinámico de un gas enrarecido; la preocupación de Stengers, arriba, es acerca del lazo que se establece entre las correlaciones y la “sensibilidad”. Aquí, sensibilidad se refiere, desde luego, a la noción de sensibilidad a las condiciones iniciales, que se ejemplifica dramáticamente en los procesos caóticos; pero también se refiere a sensibilidades emergentes y sorprendentes, que se revela en los ingresos de elementos insospechados cuando se establecen dinámicas fuera del equilibrio. Por ejemplo: “la gravedad”, dice Stengers (2004, p.95), “es sólo un ruido insignificante en el equilibrio”; fuera del equilibrio, sin embargo, los sistemas adquieren una sensibilidad *distinta*, en la que la gravedad “se hace bastante relevante, y entra en la definición de estructuras que no serían posible sin ella, adquiriendo un significado nuevo”. “Togetherness”, una especie de intimidad que hace que surjan los comportamientos emergentes, no es un mero agregado de partes que se pueda definir a través de valores cuantificables y reductivos. La noción de ese “estar juntos” implica, más bien, que las intensidades de las que habla Stengers son múltiples, que en cada punto de actualización estas intensidades pueden adquirir una multiplicidad de intereses; es decir, que son de carácter caleidoscópico e incluso pueden llevar a contradicciones. El punto fundamental aquí es que el carácter potencialmente contradictorio efectivamente existe como parte del sistema con el que distintas prácticas tienen un diálogo. Es decir, que las correlaciones no son únicamente parte de un marco teórico impuesto desde el punto de vista de los humanos, sino que son parte del carácter emergente y general de la naturaleza. Si se acepta la complejidad, se aceptan los resquebrajamientos de la lógica lineal que intenta excluir, por todos los medios, las contradicciones.

“Togetherness”, en este caso, resiste a una actitud despótica, ya sea que ésta provenga de la ilusión de que la naturaleza recomienda de alguna manera un cur-

<sup>9</sup> Este teorema de Boltzmann y la reinterpretación que hace Prigogine de las correlaciones que niega son uno de los puntos centrales de Stengers (1997, vol. 5).



so de acción fijo, o que los datos que extraemos de ella marcan el camino necesario para intervenirla de manera exitosa. El concepto de “togetherness”, las distintas maneras de *estar juntos*, señala que la intervención sobre un sistema complejo es indecible. Si llevamos el razonamiento hasta sus límites en esta dirección, empieza a hacer su aparición una consecuencia. Desde sus orígenes (puestos aquí, un poco arbitrariamente, en los trabajos de Prigogine), las ciencias de la complejidad nos han permitido obtener una experiencia de la crisis ecológica actual. Nos han llenado de herramientas nuevas, en las que los datos pueden hablar de maneras completamente distintas a como habían hablado en el marco de la dinámica. Sin embargo, cuando observamos estas herramientas que la complejidad nos pone en la mano, vemos que tienen un doble filo —o, más bien, que el mango de la herramienta es también una navaja: si se toma en serio la propuesta de la complejidad, no hay manera de formar una posición sin un *modicum* de inestabilidad. Esto es importante: esta inestabilidad aquí no quiere decir de ninguna manera un relativismo como lo que ha sido mal llamado pensamiento posmoderno, en donde la realidad es simplemente una construcción humana y la relatividad es rampante. Muy al contrario: es, en primer lugar, reconocer que la propia realidad es creativa y que la ciencia abreva de esa creatividad; y, en segundo lugar, que siempre existe el riesgo de que al tomar una posición, cualquier posición, hay una tentación de tratar de hablar por otros —y estos otros pueden ser tanto humanos que llevan a cabo otro tipo de prácticas, como elementos no humanos del mundo.

La palabra que Stengers escoge en el pasaje citado, *togetherness*, tiene raíces en la filosofía de Alfred North Whitehead, el físico matemático que, después de colaborar con Bertrand Russell en un intento de inferir las bases de las matemáticas a través de lógica simbólica, pasó sus últimos años desarrollando un sistema metafísico que pudiera dar cuenta de cómo funciona la realidad en general. *Togetherness* es la manera en que cada evento de la realidad ocurre: “‘Together’ is a generic term covering the various special ways in which various sorts of entities are ‘together’ in any one actual occasion. Thus ‘together’ presupposes the notions ‘creativity’, ‘many’, ‘one’, ‘identity’ and ‘diversity’” (Whitehead, 1978, p.21). El sistema filosófico de Whitehead es particularmente complejo pero, si se me permite una simplificación burda, uno de sus puntos fundamentales es preguntarse cómo es que la realidad puede ser creativa; es decir, que pueda tener esas instancias de “estar juntos” de maneras insospechadas y sorprendentes; por ejemplo, la manera en que en un sistema lejos del equilibrio, las interacciones y los procesos se entretajan en procesos novedosos. Y más aún: *togetherness* implica que no hay forma de separar totalmente la manera que tiene el sistema de tener contacto con un objeto determinado: todas las correlaciones que se forman en ese evento forman parte del tejido de la realidad. Esta es, según creo, una de las razones por las que tanto Prigogine como Stengers (ver Prigogine y Stengers, 1997, p.59; o el estudio masivo que le dedica Stengers, 2011) aprecian su filosofía: es un marco metafísico en el que es posible acomodar sus ideas de una naturaleza no sólo reactiva, sino creativa, siempre dispuesta a dialogar con las prácticas que la interpelan y traer sus propios términos al diálogo.

Si tomamos en serio el concepto de *togetherness*, pues, tenemos que aceptar que no hay un único modo de hablar de “lo que realmente importa” para una descripción del mundo, pues práctica y naturaleza quedan disueltas de manera mucho más radical que en la propuesta filosófica de la física cuántica. Cuando la complejidad hace su aparición, los datos no hablan ni de la “realidad física” en el sentido de una magnitud absoluta extraída de la naturaleza muda, ni apelan a una prescripción que se ha llenado de una ética, es decir, no hacen un pronóstico que deben seguir. ¿De qué sí hablan, entonces? Hablan de la práctica, del “dedo que apunta a la luna”, como dice Stengers (2004). Esto no significa que las preguntas que hacemos al sistema sean amañadas, que tenemos que purificar el lenguaje para obtener una respuesta más pertinente o más pura; quiere decir que en las prácticas de la emergencia se dan cita una serie de factores que subvierten las nociones dinámicas que imperaban como objetivo de la ciencia. Por ejemplo, la sensibilidad de los sistemas complejos; la emergencia de estados inesperados, en donde importa preguntarse cómo es posible que eso ocurra, y que esta pregunta no se agota con una descripción mecanicista.

La emergencia —y a través de ella las ciencias de la complejidad— se rebela continuamente en contra de esa actitud que intenta determinar “lo que realmente importa”. Decir qué importa y qué no, que no quepa duda, una actitud utilitaria. Cuando algo es importante, necesariamente quiere decir que es importante *para* algo. Hablar de importancia implica establecer, generalmente apelando a un sentido común, una serie de compromisos, los cuales adquieren la forma de, si es posible utilizar la frase de Žižek (2006), “unknown knowns”, las “presuposiciones silenciosas” que permean cualquier instancia de pensamiento que un sistema puede generar. De esa manera, el sentido común que rige “lo que importa” puede ser entendido como una estructura necesaria pero no inevitable. Necesaria, porque no hay manera de producir un pensamiento hilando sobre el vacío; evitable, porque la creatividad de las prácticas (y, de nuevo, esto es lo que pone sobre la mesa la idea de complejidad) renegocian constantemente los puntos de partida de la formación de su conocimiento. El propio Prigogine, en su labor de exploración de correlaciones, fue a contracorriente del sentido común termodinámico, y postuló una importancia a los estados fuera del equilibrio en una época en donde la marcha al equilibrio era considerado inevitable, incluso teóricamente.

Desde mi punto de vista, los escritos de Stengers dejan ver una preocupación que trasciende la idea de que las prácticas pueden estructurarse como una ecología —o, al menos, en el sentido ególatra que asume no sólo que los humanos somos los únicos que tomamos parte en una práctica, sino que además tenemos el poder absoluto de invocar una estructura de prácticas que nosotros deseemos. En efecto, el tipo de práctica determina el tipo de responsorio que se tiene con el objeto con el que nos relacionamos; pero la delimitación completamente antropocéntrica de las prácticas es subvertido por la elaboración más extensa de la idea de Isabelle Stengers acerca de la noción ecológica. En ella, lo estudiado y la manera de estudiar establecen un diálogo; no es una manera de seccionar y reducir a componentes una parcela de la realidad física. Aquí se revela algo completamente contraintuitivo: si

lo estudiado, aquello que podríamos llamar con debida precaución la “naturaleza” o la “realidad”, ofrece su parte del diálogo para dar una personalidad al tipo de práctica que se está utilizando, entonces hay una ruptura de la idea de la naturaleza muda, aquel objeto que sólo se ofrece pasiva y unívocamente a una mirada externa. Pero si la realidad deja de ser muda, habla de maneras completamente crípticas; sería ingenuo, en efecto, esperar que este diálogo se lleve a cabo en los términos de la persona practicante. La práctica, en la mayoría de los casos, funciona como un ejercicio de traducción, en el que no hay una codificación prefabricada de cómo se acomodarán los datos que obtendremos a través de nuestros aparatos y mediciones.

Un diálogo que es asimétrico muchas veces alimenta la creencia de que el diálogo es ocioso, en el mejor de los casos, o imposible, en el peor. Nos vemos como personas encerradas en nosotras mismas, sin posibilidad de comunicación externa. Esto, repito, me parece fundamental, porque de dicha visión abrevan posiciones como la de Jedediah Purdy: “the idea of inter-species democracy is nonsense”,<sup>10</sup> una aseveración asentada en la base del inevitable mutis de todo lo que no sea humano. A pesar de que parece que “la naturaleza tiene demasiados significados como para que pueda guiarnos”, vivimos en una época en la que “con respecto al mundo no humano, tenemos la responsabilidad última de la producción de significado”. Esto es a lo que orilla la idea de un mutis total; en última instancia, la única opción que queda frente a este panorama de silencio universal es simplemente tomar la oportunidad de hablar en el lugar de cualquier cosa que se nos ponga enfrente, de hablar *por todo*.

No es sorprendente la posición de Purdy, pues los proponentes de la geoingeniería solar eligen el uso de sus herramientas como una imposición de su propio aparato de significados. Imponen un marco temporal, que asume una reversibilidad en los efectos; imponen una dimensionalidad en su propia escala, negando la incontabilidad de los sistemas complejos; imponen una manera específica de crear significados, por lo que la naturaleza se vuelve muda; e imponen, en fin, una dirección definida a la tecnología, aquella dirección de las dinámicas de la tecnología, que siempre se mueve hacia el progreso. La confianza en el refinamiento progresista de la tecnología se hace explícita cuando se lee su propuesta a la luz del llamado “Manifiesto ecomodernista” (Asafu-Adjaye, et al., 2015). La idea detrás de este movimiento es que eventualmente llegaremos a la población máxima que puede soportar el planeta y, consecuentemente, al uso máximo de recursos. Esta presión —según el manifiesto— no se puede aminorar mediante la implementación de prácticas que interpelen a la interdependencia necesaria entre especies (como lo ha señalado consistentemente Anna Tsing —ver Tsing (2014) para un texto enfocado a este tema) sino, contradictoriamente, intensificar las actividades de uso y producción, “particularmente la agricultura, la extracción de energía, la explotación forestal y la urbanización”. La base de esta expresión máxima de la idea de un *techno-fix* absoluto es que actualmente, gracias a la modernización, los valores

<sup>10</sup> La cita proviene de la respuesta que Purdy da a Tsing y a otros pensadores, como Vandana Shiva y Roy Scranton, en [Boston review - forum](#) (consultado: 3.junio.2017).

de libertad y de derechos universales se han extendido cada vez más. En pocas palabras, el *techno-fix* promete que la intensificación de las tecnologías de producción harán que en un futuro haya cada vez más riqueza económica, cada vez más distribuida, con un impacto ambiental cada vez menor.<sup>11</sup>

Se necesitaría un texto completo para discutir los presupuestos que este *techno-fix* ideal está usando para postular este escenario de progreso e igualdad. Baste decir que mi posición es menos optimista. Siguiendo a Stengers (2009, p.27), podemos pensar que la competencia científica no es suficiente para evitar un escenario de barbarie social. Siguiendo a Morton (2016a), podemos proponer que el pensamiento agrologístico que describe, aquel que cuando observa un prado sólo puede ver un lugar intervenible no contradictoria y predeciblemente, es precisamente el tipo de pensamiento que ha ocasionado asimetrías, no sólo sociales como ecológicas sino radicalmente ontológicas (Morton, 2016a). Mi única intención en este momento es señalar que el camino que esos modos de pensamiento proponen muchas veces parece llevar a una consecuencia necesaria: en tanto que el mundo es perfectamente escalable, una llamada a un arreglo tecnológico y una confianza en la tecnología es algo que necesariamente lleva a un progreso. Creo que este lazo estrecho proviene de ignorar, deliberadamente o no, lo que las prácticas de la complejidad y la emergencia dicen acerca del mundo; proviene, en otras palabras, de postular una “complejidad reduccionista” que traza una línea que tiene un objetivo absolutamente determinado como final, en oposición a una visión de la complejidad (Stengers, 1997, vol. 6 cap. 2) que intenta plantear problemas que no presupongan un *tipo* de resolución. Y creo que el lazo se deja ver explícitamente cuando uno nota que David Keith,<sup>12</sup> el investigador que he tomado como emblema de la promesa de la geoingeniería solar, la promesa de que el antropoceno puede ser un “buen antropoceno”, es también uno de los firmantes del “Manifiesto eco-modernista”.

\* \* \*

En este texto no he querido derivar una posición ética del análisis de los datos, tanto empíricos como modelados, que apuntan al calentamiento global. Lo que he intentado es mostrar un vínculo entre la ontología que presuponen las prácticas de la complejidad y la *forma* que esa ética puede tener: en tanto que la complejidad deja de lado un objetivo determinado y está abierta a la emergencia de comportamientos insospechados, la forma de una ética no tiene manera de estar anclada en una naturalización total. Este texto tampoco es una admonición para alejarse de

<sup>11</sup> Ver, por ejemplo, Keith (2013, p.147): “it’s hard to avoid the conclusion that most of the big environmental wins of the last half century have been techno-fixes. Air pollution was cut using catalytic converters, not carpooling; the ozone layer was saved by changing refrigerants not turning back to root cellars; and peregrine falcons were saved from DDT by developing insecticides less prone to bioaccumulation.”

<sup>12</sup> Keith no es el único investigador y empresario que propone y promueve la promesa de la geoingeniería solar a través del rocío de sulfatos. Sin embargo, lo he utilizado como un emblema por su visibilidad: el equipo de la Universidad de Harvard, que comenzará los experimentos de campo de dispersión de partículas en 2018, lleva su nombre: “The Keith Group”.

perspectivas viables como aquella de la geoingeniería solar, la cual no adquiere su viabilidad a través de ser considerada una opción justa, sino simplemente porque es una opción *posible*. Como un organismo en estado de inanición que gradualmente ve a sus acciones cada vez más determinadas por la intrusión de un imperativo de sobrevivencia, es posible que las miras de la acción ecológica queden obnubiladas pronto por una urgencia que se manifestará de manera determinante y de manera no local.<sup>13</sup> “Need, hunger and thirst obtrude with an urgency that determines action” (Lingis, 1998, p.171). El punto principal del tema es tratar de hacer evidente una actitud en la que la ciencia se considera un aparato de producción de tecnologías vacías de significado, el cual se tendrá que construir *ex post facto* a través de reuniones de políticas públicas o discusiones de otra naturaleza. Las ciencias de la complejidad ofrecen, desde el punto de vista de Stengers (tanto en sus escritos de autoría individual como en los realizados en colaboración con Prigogine), uno de los modos más eficaces de situar las prácticas científicas en un terreno dinámico, en el que el primer paso es aceptar que el significado lo permea todo.

El problema al que quiero apuntar aquí es el riesgo de no tener la disposición de invertir los puntos clave de la complejidad, una inversión que creo necesaria. La inversión ocurre en el momento en que la emergencia no se configure como una imposibilidad de explicación a partir de la adición de los elementos que componen el sistema, sino en la imposibilidad de una acción a partir de la adición de las urgencias elementales. También hay una inversión en términos de un control central, pues si bien las ciencias de la complejidad han intentado producir modelos y aplicaciones en los que un mando central no esté presente, hay una centralidad *de facto* de otros tipos, y en distintos niveles: una presencia central de magnitudes que sirven para diagnosticar, desde un nivel inferior, la bondad de ajuste de un estado final deseable, en un nivel superior. Ambos lugares privilegiados (el de las variables predilectas y el del estado último utilitario) se encuentran en oposición a lo que en última instancia es fundamental para pioneros como Prigogine o Stengers, quienes lo expresaron con su voz y con su trayectoria peculiares: la sorpresa inagotable frente a algo que es creativo en sí. La sorpresa, sin embargo, se puede reformular como nuestro reto, lo que problematiza nuestra situación actual: la imposibilidad de conciliar una acción apelando a un sistema total.

La manera más sencilla, y al mismo tiempo la más eficiente, de bloquear las inversiones es olvidar qué tipo de términos son los que se invierten. Lo que presupone la inversión es notar, aunque sea momentáneamente, que los puntos clave de la complejidad no se aplican a explicaciones, sino a la naturaleza misma de lo que se estudiado. Tanto la ausencia de control central como la irreductibilidad de la emergencia no son conceptos que pertenezcan únicamente a las herramientas que hemos fabricado para servir como apoyo para nuestro entendimiento —modelos matemáticos, simulaciones computacionales controladas, colapsos de *big data* en

---

<sup>13</sup> A título personal, como espero haber dejado claro en el texto, considero que la decisión de desplegar un esfuerzo de geoingeniería solar, peor que una irresponsabilidad, es una monopolización indefendible de la responsabilidad.

fragmentos manejables pero idealizados— sino que deben de ser relocalizados en la propia realidad a la cual se interroga y la cual puede responder. Cuando la inversión que presupone el origen de las ciencias de la complejidad se bloquea considerando que la emergencia es únicamente explicativa, se asume de facto que la naturaleza es muda y que un modelo puede hablar en su lugar. Las inversiones son bloqueadas, pues, por una especie de *hybris* que pretende que las descripciones de los modelos tienen la capacidad de hablar en el lugar de lo que se estudia, en vez de funcionar como un acto constante de traducción. En este sentido, no pretendo quitarle realidad a los modos matemáticos ni a los experimentales; más bien, al contrario, creo que esta visión les dota de una realidad nueva, una realidad que sólo es expresable a través de la purificación que las prácticas científicas llevan a cabo. Desde luego, hay manifestaciones matemáticas de estos comportamientos; pero, como lo expresa Robert May (1976) en el artículo fundacional en el que se describe por vez primera el mapa logístico, “aunque la exquisita estructura fina del régimen caótico es matemáticamente fascinante, es en su mayor parte irrelevante para fines prácticos”.

En última instancia, la actitud de tratar de encontrar un todo —de, como se dijo antes, dotar un significado global— está creando una visión que queda orientada totalmente en oposición a una visión ecológica; pues se estaría creando, implícita o explícitamente, una visión de la realidad en la que hay un discurso único que puede dar cuenta completa de ella. Sin importar cuántas *expertises* se necesiten, en cuanto tengamos esta visión de un todo —de un sistema predecible, delimitado exactamente de su contexto— tendríamos una fuente de la cual se desprenden valores: ¿Cuáles son los valores que hacen de este todo un todo? ¿Qué tipo de acciones podemos tomar para obligar al sistema que no pierda su identidad? Estos valores incluso pueden ser expresados como variables —binarias, discretas, o aproximadamente continuas. Esta llamada a evitar la tentación de buscar un sistema total sugiere la manera de acercarse a una mirada orientada a la aditividad o a la cooperación total de disciplinas: tal proyecto es imposible dada la interacción entre prácticas que parece pedir la complejidad. No hay una multidisciplina o interdisciplina a la que podamos obligar a dar reglas de acción y principios éticos sin que por el acto mismo de hacerlo, comencemos a forzar a dicho conjunto de prácticas a “hablar por alguien más”.

La geingeniería señala incansablemente, incluso en su propio nombre, el carácter global del problema, y por tanto se postula como una solución que será aplicada necesariamente a todos, tanto humanos como no humanos. No hay que perder de vista el sentido opuesto de nuestro problema que, en tanto que global, deja entrever la otra cara de la moneda: no es suficiente pensar en una acción de manera egocéntrica. Este egocentrismo toma la forma de bajar la mirada y pensar que la solución a eso es una acción que replique o refleje la acción que dio origen al problema en primer término. El problema al que nos enfrentamos pone en la mesa el carácter trascendente de este tejido que hemos logrado fabricar a lo largo de la historia, un tejido que ha desembocado en lo que Stengers nombra “barbarie”, una actitud que está en riesgo de ser aún más penetrante y polarizante si las opciones

se siguen configurando en el modo de acción-y-reacción, de aproximaciones suficientemente buenas. Si hay algo que podemos tener por seguro es que, incluso de ser posible (y aquí se considera que no lo es), cualquier ofrecimiento de una opción racional y unívoca, en la que un modelo especifique el mejor curso de acción, estará lejos de ser implementada como tal. Está en la naturaleza de la dinámica que nos ha traído hasta este estado de las cosas tomar ventaja, explotar las oportunidades (ver Stengers, 2009, particularmente el capítulo 5).

Es posible que en algún momento futuro la geoingeniería se aplique, en una especie de arco reflejo, a un planeta que no ha tolerado lo que hasta ahora se ha marcado como progreso, como la marca de lo moderno. Es posible, incluso, que este reflejo sea celebrado como la acción que marque el inicio de un “planeta deliberado”, según la expresión de Keith. No tengo ningún reparo en decirlo: en este momento, desde mi posición estrictamente no especialista, el prospecto de una geoingeniería —particularmente de una geoingeniería solar de aerosoles— me parece un despropósito que ignora deliberadamente las lecciones de la ciencia de la complejidad, de la multiplicidad de las maneras que tienen los elementos de un sistema de estar juntos. Aquí me refiero, en efecto, a los posibles puntos de efecto imprevistos que pueden generar esa sorpresa apreciada por Stengers. Esta sorpresa podría ser incluso deseable en otras circunstancias; pero en el caso particular de una intervención dirigida a imponer un significado determinado a un planeta, puede ser el evento que haga recrudecer las asimetrías que son cotidianas en estos momentos. Así, me refiero al posible ingreso de las dinámicas de ese planeta deliberado a un sistema social, político o económico; pero también a la imposición de un efecto en última instancia humano en la sensibilidad de cualquier modo de vida fotosintética; en fin, me refiero en primer término a esas variaciones ilimitadas que se despliegan desde el centro de cualquier evento. También me refiero, sin embargo, al despropósito ontológico de tratar de controlar el clima, una entidad que ejemplifica lo que Morton (2013) ha llamado un *hiperobjeto*: algo tan masivo que resulta incontrolable por los medios que podemos poseer.

No me parece casual que Stengers haya detectado en la climatología una ciencia “de terreno” (Stengers, 1997, libro 6 cap. 2), en la que no es posible una reducción o una purificación a las condiciones del laboratorio; creo que es la consecuencia directa de que el objeto de estudio de esta ciencia sea un hiperobjeto. El estudio del clima es un ejemplo de una práctica en donde no es posible estabilizar todo a la manera de un conocimiento objetivo, porque el diálogo que se tiene con el sistema que delimita la práctica llega inevitablemente a un punto en el que el sistema mismo obliga al practicante a empezar a moverse de maneras distintas —maneras laterales, que no corresponden ni a una reducción ni a una composición de partes. En tanto que sistema complejo, el clima determina nuevos objetos, objetos propios de la práctica misma, y que se expresan a través de atractores, sistemas formales u otras invenciones fisicomatemáticas. Los datos de la climatología son valiosos; pero su valor no radica en aportar una prueba o una justificación a un programa de intervención directa, porque los modelos climatológicos producen un alud de números que se pueden afinar o calibrar de distintas maneras. En las ciencias del

clima esto es, al parecer, moneda corriente. En su dependencia consistente en la traducción de datos a través de modelos, “comienzas a creer que lo que ocurre en tu modelo es lo que ocurre en la realidad, y esto muchas veces no es verdad. . . ”. (Edwards, 2010, p.345)

A pesar de esto, la peor alternativa —eso me parece claro— es tratar de retirar la autonomía de investigación de los programas evidentemente orientados a fundamentar la geoingeniería. A pesar de que dichos programas están tratados por su proponentes como parte de un progreso tecnológico, el modo de imposición y disciplina (como las llamadas de los grupos activistas para detener por completo los experimentos localizados, como los que el grupo de Keith pretende poner en marcha los próximos años) es totalmente contrario a lo que aquí se propone. Sin embargo, creo igualmente necesario no perder de vista el papel que las actividades científicas juegan. Estos experimentos, presentados como inofensivos, están lejos de serlo: buscan, desde luego, fabricar y presentar armas para lograr lo imposible, es decir, presentar una respuesta supuestamente ética acerca de lo que se debe de hacer, lo que Pignarre y Stengers (2005, pp.40–43) llaman una alternativa infernal: “es desafortunado, pero *tenemos que* poner en práctica esta opción porque si no lo hacemos. . . ”. Las alternativas indeseables variarían en cada caso, desde luego, pero es irrelevante; lo que importa es el acorralamiento que elimina cualquier cuestionamiento bajo un marco ético racional. Se necesita, entonces, liberar del peso de la justificación absoluta de estos experimentos “inocuos”, resistir la tentación de adoptar la respuesta que estos experimentos generen como un conocimiento puro, distanciado de la temporalidad, de las prácticas y de la complejidad. Dicha tentación se debe resistir, pues, a diferencia de las prácticas científicas, establecen una red de significados fijos que colapsan los problemas iniciales en soluciones, las ciencias de la complejidad no prometen una respuesta que marque un camino —una cura, una solución a la crisis, una promesa de una intervención feliz, una certeza suficiente de que un *techno-fix* será exitoso. Es en este punto en donde se hace evidente que la complejidad tiene doble filo; en tanto que abreva de principios ontológicos fundamentales, como el concepto discutido arriba de *togetherness*, puede tener una aplicación generalizada. Sin embargo, no quiere decir que las prácticas de la complejidad sean una panacea, puesto que explícitamente rechazan una aplicación totalmente utilitaria, es decir, una aplicación que determina sin lugar a dudas un curso de intervención y estabiliza los criterios de éxito de dicha intervención.

El tipo de propuesta activa que puedo ofrecer aquí es débil y necesariamente incompleta. Empieza, como Tsing (2015) y Morton (2016b) sugieren, con el arte de notar cómo se engranan las relaciones entre mundos no necesariamente humanos, con un respiro y una pausa —de nuevo, de tomar en serio la idea de alentar el pensamiento. Creo (y esta es probablemente la frase más incierta de un capítulo lleno de incertidumbre) que en ese sentido tendría que reivindicarse una posición que es posible expresar a través de otra parábola, aquella del carácter de los lotófagos que retrata Alfred Lord Tennyson (“The Lotos-Eaters”; ver Tennyson, 2014, p.70). El sueño que ocasionan las flores del loto no es un sueño inerte. Al contrario, en



la calma del loto florecen modos de pensamiento distintos, modos especulativos y deliberadamente anti-melancólicos —o al menos, posicionados en contra de esa melancolía instantánea de un pasado idílico. En efecto, los lotófagos viven suspendidos en un estado temporal extraño; aunque están cansados de sus aventuras anteriores, su actitud no es pasiva porque ni siquiera se interesan en seguir el curso “natural” de las cosas. Observan con curiosidad a las generaciones futuras, pero lo que intentan es ser fantasmas para sus descendientes. Los lotófagos repiten como un mantra su deseo de estar solos; pero justo a través de ese deseo, enunciado en coro, hablan de una comunidad más radical que la que se presenta a sí misma como una opción de lograr una unidad planetaria total. Su “togetherness”, en el sentido de Stengers, no es aleatoria pero no pretende ser totalitaria, sino singular. Los lotófagos determinan las correlaciones que establecen entre ellos mismos, rechazando su historia sin negarla.

No estoy seguro, como ya he dicho, si la lotofagia es una opción válida o no; cada vez me parece, de hecho, que es indecible postularlo como un camino que funcione para todos y para toda situación. De hecho, creo que el loto es el ejemplo típico de un *pharmakon*, la figura ambigua que puede ser a la vez veneno y cura. En tanto que no implica una pasividad total, para mí presenta un valor potencial para hacer surgir narrativas distintas que traigan al escenario puntos relevantes de lo que está en juego: los riesgos de una absorción total, los cuales se traslucen en la certidumbre financiera de las propuestas; los riesgos de un colapso del tiempo, en donde las singularidades están tratadas como relativamente irrelevantes; el colapso, de igual manera, de las singularidades locales a cualquier nivel de la complejidad biológica, permitido por una racionalidad institucional científica que corre a contrapelo de las lecciones de las prácticas de la emergencia. Sin embargo, es posible apuntar en direcciones de pensamiento. Requiere incluso más esfuerzo que una *estrategia* de intervención, porque es precisamente la táctica de resistirse a la idea de un liderazgo cierto y proveedor de respuestas cortas y unívocas. No tiene un correlato físico inmediato como el despliegue con tintes militarizados de la geoingeniería, una acción con un fin cerrado. En ese sentido, el pensamiento tendría que portarse menos con la estructura de un artículo científico y más con la forma de una rapsodia: eliminar la necesidad de establecer un objetivo incluso *antes* de comenzar, tomando en cuenta el hecho confirmado por las prácticas científicas: en términos ontológicos, la aproximación a una ley es simplemente un punto de apoyo, entre muchos otros, del pensamiento.

En Magnasanti, la ciudad de la que ha partido la trayectoria centrífuga de este texto, había un único valor de importancia (el tamaño poblacional) el cual, para colmo, tenía desde el inicio una trayectoria definida: crecimiento óptimo en una primera etapa, y equilibrio estable en un máximo. Creo que esa ciudad es un ejemplo valioso, porque subvierte el discurso de orden, predicción, estabilidad y cálculo racional frente a consideraciones de otra naturaleza. Si se toma como experimento, en última instancia lo que es relevante —lo que *importa*— no es haber logrado una condición en la que el juego se ha ganado. Al abrir las compuertas de la complejidad hace su aparición una manera de observar en donde adquieren una impor-

tancia inmensa tanto el objeto (en calidad de interlocutor) como la práctica (como determinante del modo de diálogo). En este sentido, el problema que las ciencias de la complejidad presentan no es el de una narrativa general, pues los fundamentos ontológicos sobre los que Prigogine la ha construido precisamente apuntan en esa dirección, a una generalización (aunque no una totalización). El problema es, más bien, que en tanto que en una inestabilidad constante, la noción de aplicación se vuelve amorfa e inasible. Este carácter amorfo persiste hasta que se acepta que la aplicación sólo tiene sentido a la luz de una manera particular de pensar. La *táctica*<sup>14</sup> que yo podría señalar, en términos vagos y generales, es encontrar una manera de desmontar la falsa dualidad de acción y especulación, mostrando el lado productivo de esta última, con la esperanza que con la disolución de esta dicotomía se disuelvan otras y que esto, por último, nos permita encontrar, *festina lente*, una vía distinta, una vía sin final determinado que evite tanto la parálisis como el despotismo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Asafu-Adjaye, J., et al., 2015. "An Ecomodernist Manifesto". [www.ecomodernism.org](http://www.ecomodernism.org), p.31.
- Cartwright, N., 1983. *How the Laws of Physics Lie*. Oxford: Oxford University Press.
- Certeau, M. de, 1984. *The practice of everyday life*. Los Angeles; London: University of California Press.
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K., et al. (eds.) 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, NY: Cambridge University Press.
- Crutzen, P.J., 2002. The Geology of Mankind. *Nature*, 415, p.2002.
- Crutzen, P., 2006. Albedo Enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 77, pp.211–219.
- Edwards, P.N., 2010. *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Hansen, J., et al., 1992. Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption. *Geophysical Research Letters*, 19(2), pp.215–218.
- Keith, D., 2013. *A Case for Climate Engineering*. Cambridge, Mass.: The MIT Press. "Available at: <http://muse.jhu.edu/books/9780262317788>
- Lingis, A., 1998. *The Imperative*. Bloomington: Indiana University Press.
- May, R., 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261, pp.459–467.
- McInnes, C.R., 2010. Space-based geoengineering: challenges and requirements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224(3), pp.571–580.

<sup>14</sup> Esta distinción entre la noción de *táctica* y la de *estrategia* que aparece en el párrafo anterior proviene de De Certeau (1984).

- Morton, T., 2007. *Ecology without Nature: Rethinking environmental aesthetics*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Morton, T., 2013. *Hyperobjects: philosophy and ecology after the end of the world*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Morton, T., 2016a. *Dark Ecology: for a logic of future coexistence*. New York: Columbia University Press.
- Morton, T., 2016b. "Dream." Theorizing the Contemporary. *Cultural Anthropology* website <https://culanth.org/fieldsights/797-dream>.
- Pignarre, P. & Stengers, I., 2005. *La sorcellerie capitaliste?: Pratiques de désenchantement*. Paris: Éditions La Découverte.
- Prigogine, I. & Stengers, I., 1997. *The end of certainty: Time, chaos and the new laws of nature*. New York: The Free Press.
- Robock, A., 2008. 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. *Bull. Atomic Scientists*, 64, No. 2, 14–18, 59.
- Stengers, I., 1997. *Cosmopolitiques* (7 vols.). Paris: La Découverte / Les empêcheurs de penser en rond.
- Stengers, I., 2004. The challenge of complexity: Unfolding the ethics of science In memorial Ilya Prigogine. *E:CO Emergence: Complexity and Organization*, 6(1–2), pp.92–99.
- Stengers, I., 2005. The cosmopolitical proposal. In B. Latour & P. Weibel, eds. 2005. *Making things public: atmospheres of democracy*. Cambridge, Mass.: MIT Press, pp.994–1003.
- Stengers, I., 2009. *Au temps des catastrophes: résister à la barbarie qui vient*. Paris: Les empêcheurs de penser en rond / La Découverte.
- Stengers, I., 2011. *Thinking With Whitehead: A Free and Wild Creation of Concepts*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Stengers, I., 2014. Gaia, the Urgency to Think (and Feel). *Os mil nomes de Gaia do Antropoceno à Idade da Terra*, Colóquio Internacional, Departamento do Filosofia PUC-Rio and PPGAS do Museu Nacional – UFRJ, 15–19 September 2014, Rio de Janeiro. Disponible en: <https://osmilnomesdegaia.files.wordpress.com/2014/11/isabelle-stengers.pdf> [consultado: 24.abril.2018].
- Tennyson, A. L., 2014. *Tennyson: A Selected Edition*. Edited by Christopher Ricks. London and New York: Routledge.
- Tsing, A., 2014. More-than-Human Sociality: A Call for Critical Description. In: K. Hastrup, ed. 2014. *Anthropology and Nature*. New York: Routledge, pp.27–42.
- Tsing, A.L., 2015. *The mushroom at the end of the World: On the possibility of life in capitalist ruins*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Whitehead, A.N., 1978. *Process and Reality: An Essay in Cosmology*. New York: Free Press.
- Zhang, Z., et al., 2014. Review of geoengineering approaches to mitigating climate change. *Journal of Cleaner Production*, pp.1–10. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.076>
- Žižek, S., 2006. Philosophy, the "unknown knowns," and the public use of reason. *Topoi*, 25(1–2), pp.137–142.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## ¿EXISTE EL ORGANISMO INDIVIDUAL? LA SIMBIOSIS Y LA EMERGENCIA DE NUEVOS INDIVIDUOS

*Oswalth Basurto\**

EN un artículo bastante provocador, titulado “Una visión de la vida simbiótica: nunca fuimos individuos”, Scott Gilbert, Jan Sapp y Alfred Tauber (2012) mencionan una discusión que se llevó a cabo entre Lynn Margulis y Richard Dawkins en 2009, con motivo del “Homenaje a Darwin” en la Universidad de Oxford. Dawkins preguntó por qué habría que traer la simbiosis a la teoría evolutiva:

Tome una historia estándar para unos típicos animales, ahora distribúyalos en una zona y ponga un promontorio, o una isla o algo que ocasione que usted tenga dos distribuciones geográficas. Entonces de cada lado usted tiene diferentes presiones de selección, y un grupo comienza a evolucionar de esa forma, y el otro evoluciona de la otra. ¿Qué hay de malo con ello? Es muy plausible, es económico y es parsimonioso. ¿Porqué querría usted arrastrar la simbiogénesis cuando es poco económica y poco parsimoniosa? A lo cual, Lynn Margulis contestó, porque está ahí. (Dawkins & Margulis, 2009)

Dicho artículo termina con el siguiente enunciado: “para los animales como para las plantas, nunca hubo individuos. Este nuevo paradigma de la biología genera nuevas preguntas y plantea nuevas relaciones entre las diferentes entidades vivientes en la Tierra. Todos somos líquenes” (Gilbert, Sapp & Tauber, 2012, p.336).

En las discusiones sobre niveles de organización o jerarquías biológicas (JB), usualmente se asume que cada peldaño es claramente diferenciable, particularmente en el de los organismos individuales. Es como si cada organismo estuviera aislado de los demás; tanto de la misma especie como de las otras especies. Cuando se habla de cada uno de los peldaños de las JB, a veces es posible que se plantee, de forma marginal o anecdótica, que algunos seres vivos se relacionan con otros a través de relaciones simbióticas más o menos estrechas. Sin embargo, la simbiosis no es un fenómeno aislado o marginal. Es tan importante como las relaciones que ocurren entre el depredador y su presa. Hay una corriente de investigadores que de manera cada vez más enfática señala que es una propiedad esencial de los seres vivos. Todos los seres vivos se encuentran en una red profundamente imbricada de relaciones simbióticas y pareciera que la simbiosis es la esencia misma de la vida. Tanto la biología tradicional como la filosofía de la biología han abordado muy

---

\* Universidad Autónoma de la Ciudad de México. / [oswalth.basurto@uacm.edu.mx](mailto:oswalth.basurto@uacm.edu.mx)

poco las relaciones simbióticas y en particular el impacto que tienen en fenómenos como la adaptación, la reproducción y en la evolución. Por ejemplo, en la década de 1990, había al parecer tan sólo dos mil biólogos en todo el mundo investigando las relaciones simbióticas de manera directa o indirecta (Jeon, 2002).

La simbiosis no sólo está ampliamente distribuida en todos los grupos de organismos, también es la responsable del origen de nuestras células (eucariotas), y quizá de la mayor fuente de variación genética y epigenética a nivel celular (Jeon, 2002).

La definición de simbiosis está a debate y hay algunos que la definen como la relación estrecha y prolongada entre dos o más organismos de diferentes especies, que dura al menos durante el tiempo de vida de alguno de los participantes. El problema es si hay alguno entre los involucrados que obtiene mayor ganancia a expensas de los otros, como en el caso del parasitismo, o si las ganancias son equivalentes para todos. Las innumerables relaciones simbióticas muestran un continuo: del parasitismo, con un costo total a la víctima, a la equivalencia, en que todos salen beneficiados; es decir, del antagonismo absoluto a la cooperación total (Dimijian, 2000; Gerardo, 2015).

Por el contrario, Nardon & Charles (2002) opinan que ni el parasitismo ni las interacciones patógenas pueden incluirse en el concepto de simbiosis, ya que eso depende de la agresividad o neutralidad del tipo de relación. Paradójicamente, mencionan a la especie bacteriana *Wolbachia* como un organismo que no debe de considerarse simbiote, aunque tradicionalmente se le ha consignado como tal, ya que, además, es un importante generador de variación.

*Wolbachia* es una bacteria que tiene la capacidad de infectar no sólo a casi todos los grupos de insectos, sino también a otros artrópodos y algunos nematodos. Lo interesante es que genera alteraciones reproductivas, como incompatibilidad citoplásmica, muerte de machos, feminización de machos y partenogénesis. Sin embargo, se ha convertido en un simbiote obligado en algunas especies de nematodos, por lo que es materia de una intensa investigación, ya que puede generar infertilidad y se podría utilizar como pesticida.

Para otros autores, simbiosis significa la relación entre dos organismos de diferentes especies, en la cual se construyen nuevas estructuras y se desarrollan nuevos metabolismos mediante un vínculo íntimo, que dura un tiempo determinado, y puede formarse constantemente e incluso tener un carácter cíclico (Zook, 2002).

No existen organismos axénicos, es decir, que no generen relaciones simbióticas (Dyer, 1989). Plantear su existencia es prácticamente imposible, y, aunque se podría intentar en el laboratorio, en realidad es muy difícil de lograr. En la actualidad cuando se utilizan organismos multicelulares libres de microorganismos para investigar las relaciones simbióticas que establecen, lo que se ha observado es que presentan un sinnúmero de alteraciones fisiológicas. Por ejemplo, los ratones libres de microorganismos no desarrollan adecuadamente el sistema inmune, no pueden digerir alimentos y la maduración de los tejidos intestinales es deficiente, lo cual incide en un tránsito intestinal lento y menos liberación de serotonina, que a su vez impacta el desarrollo del sistema nervioso. Tienen menor capacidad para

regenerar los tejidos intestinales, y, por ello, se convierten en tejidos muy frágiles; la formación de sus huesos es deficiente; requieren mayor ingesta calórica; muestran alterada la respuesta al estrés, en particular, en el eje glandular formado por el hipotálamo, pituitaria y glándulas adrenales; poseen menor desarrollo neuronal y sináptico; desarrollan mayor ansiedad y tienen respuestas menores al dolor (Sommer & Bäckhed, 2013).

Las relaciones simbióticas aparecen entre todos los organismos y a todos los niveles. Cada vez se conocen más ejemplos de organismos que generan relaciones simbióticas y se ha comenzado a estudiar su grado de estrechez. Como ejemplo están las relaciones entre los peces o calamares de las grandes profundidades, que tienen órganos luminosos, con microorganismos que generan bioluminiscencia, como en *Photoblepharon* o en *Euprymna scolopes*; de los gusanos gigantes vestimentíferos, cuyos tejidos mantienen bacterias quimio-autótrofas; de los corales y sus comunidades de algas y zooxantelas (*Symbiodinium*); de los platelmintos de vida libre asociados a clorofitas; de las micorrizas, rizobios y hongos endocíticos; hasta de los insectos (como las termitas), y de grandes rumiantes, con sus intestinos pletóricos de comunidades sumamente complejas de microorganismos, incluso de reinos diferentes, ya que es posible encontrar comunidades de bacterias, levaduras, protistas, arqueobacterias, etcétera (Dyer, 1989).

Es casi una realidad asumir que no hay ser vivo en el planeta que no dependa fisiológicamente de otro para poder llevar a cabo sus funciones en forma adecuada. Es un hecho que muchos organismos no poseen la maquinaria enzimática para llevar a cabo la síntesis de algunas moléculas, en particular, de los aminoácidos. Un caso extremo es el de algunas cochinillas del género *Planococcus* que (al igual que los áfidos asociados a *Carsonella*) poseen bacteriomas o simbiosomas en los que crece la bacteria *Tremblaya princeps*, en cuyo citoplasma es posible encontrar otra bacteria, llamada (provisionalmente) *Moranella endobia*. Entre los tres llevan a cabo la síntesis de aminoácidos que requieren; es decir, sus genomas se han modificado para realizar el proceso en forma coordinada (Gilbert, 2014).

En muchos casos, la integración entre los organismos simbiosomas es muy estrecha; se piensa que, incluso en los mamíferos, la tercera parte del metaboloma tiene origen microbiano, además de la gran cantidad de actividades fisiológicas involucradas en el desarrollo en las que participa el microbioma. En algunas esponjas, hasta 40 por ciento del volumen del organismo está formado por bacterias, que contribuyen de forma muy importante a su metabolismo. Se ha demostrado, tanto en ratones como en el pez cebra, que el microbioma activa cientos de genes durante el desarrollo, por lo que éste debería considerarse un proceso que depende de un conjunto de señales interespecíficas (Gilbert, Sapp & Tauber, 2012).

A continuación veremos algunos ejemplos de relaciones simbióticas entre diferentes tipos de organismos y qué tan estrechas son dichas relaciones.

## LÍQUENES

Los líquenes (ver figura 1) se forman por la relación simbiótica entre hongos y algas, pero están ubicados taxonómicamente en el grupo de los hongos, ya que la mayor parte de las veces su forma está dada por la del hongo, aunque son completamente diferentes. Los líquenes se pueden encontrar en casi todas las altitudes, incluso a más de siete mil metros de altitud, y hasta a unos 400 km de distancia del Polo Norte. Pueden crecer en las rocas desnudas de los desiertos y en el interior de rocas porosas. Al igual que los tardígrados, se cree que son los únicos organismos capaces de vivir en el espacio exterior sin ningún tipo de protección.



**Figura 1:** Micrografía de corte transversal de líquen en colores artificiales.

Fuente: <http://curlygirl.no.sapo.pt/imagens/corteliquen.jpg>

Se han descrito trece mil quinientas especies de líquenes con base en el hongo, ya que el organismo fotosintético es más común. En aproximadamente doce mil quinientas de ellas (que corresponden a unas cuarenta especies) un alga eucariota realiza la fotosíntesis; mientras que en las mil restantes se trata de cianobacterias. La mitad de los líquenes utilizan como organismo fotosintético al alga *Trebouxia*; aunque se han reportado por lo menos dos especies que no corresponden a estos grupos: las Xanthophyceae (*Heterococcus*) y las Phaeophyceae (*Petroderma*). La presencia de cianobacterias se relaciona con la fijación del nitrógeno. Hay especies de líquenes en las que es posible identificar algas clorofitas tanto como cianobacterias (Friedl & Bhattacharya, 2002).

En los líquenes, los hongos son ascomicetes y, sólo unas cuantas especies, basidiomicetes. En ocasiones, es posible separar el componente fúngico del componente algal, y se pueden cultivar por separado (Bold, Alexopoulos & Delevoryas, 1980). Pero hay algunas especies donde es imposible, pues las hifas del hongo penetran el cuerpo del alga hasta las membranas internas de los cloroplastos. En tales casos y a diferencia de lo que muchos biólogos creen, Stephenson (2010) argumen-



ta que se trata de la relación entre un parásito (el hongo) y su hospedero, ya que en muchas ocasiones el alga muere debido a dicha penetración. Sin embargo, puesto que el alga se reproduce mucho más rápido, permite que la asociación se mantenga (Stephenson, 2010). Se trata entonces de un parasitismo controlado, aunque esto se pondría en duda si se descubriera que efectivamente hay comunicación entre ambos organismos.

El hecho más intrigante de la simbiosis encontrado en los líquenes es que si uno cultiva el alga por un lado y por otro el hongo, nunca desarrollan algo que remotamente se parezca a la estructura que aparece cuando están juntos. Además, la forma del líquen depende básicamente de las especies que lo constituyen, quizá gracias a procesos de señalización entre los actores (Nardon & Charles, 2002). Al parecer, el hongo posee los genes que originan la estructura característica del líquen, pero permanecen inactivos si no se presenta el organismo fotosintético (Dimijian, 2000).

En el caso de los líquenes no es posible definir qué es un organismo individual, ya que en realidad no hay una unidad morfológica. Se trata de un conjunto de hifas que forman el talo en cuyo interior se desarrollan los organismos fotosintéticos:

Los líquenes son un reto para nuestro concepto de individualidad. ¿El líquen es por sí mismo un organismo individual o está compuesto por dos especies? ¿Lo vemos como uno o como dos organismos? Los dos compañeros pueden separarse y sobrevivir en ambientes controlados. Incluso a los líquenes les damos nombres científicos, dejándonos llevar por nuestro sesgo hacia la individualidad. (Dimijian, 2000)

En todos estos ejemplos la relación simbiótica tiene un elevado valor adaptativo para los participantes; pero no hay forma de ubicar a los líquenes en las JB. No forman individuos, pero tampoco son colonias o poblaciones. No hay peldaños para estructuras u organismos formados por individuos de dos o más especies. En los libros sobre hongos, los líquenes aparecen casi como algo anecdótico, aunque son sumamente comunes. Les hemos asignado nombres científicos, como si se tratara de especies, pero lo único que esto ha hecho es enrarecer el ambiente. Por ejemplo, en el género del líquen *Usnea*, dependiendo del tipo de definición de especie que se utilice, se puede pasar de 61 a 140 especies en Europa. Una perspectiva muy estrecha de los caracteres morfológicos ha generado tal confusión entre los especialistas que por el momento muchos se niegan a trabajar con este género. Muchas de las especies se establecieron con base en la separación de un solo carácter (Clerc, 1998).

Otro caso es el de la especie *Dictyonema glabratum*, también conocida como *Cora pavonia*. Este líquen formado por hongos basidiomicetes es característico de ecosistemas tropicales de Centro y Sudamérica. Funciona como un fertilizante del suelo, ya que lleva a cabo la fijación del nitrógeno. Se trata de un líquen que, hasta hace poco, se pensó era una sola especie. Hoy, gracias a estudios sumamente minuciosos, el grupo de R. Lücking y M. Dal-Forno ha encontrado que se trata de al menos 126 especies, pero, de acuerdo con sus cálculos, es probable que se trate de por lo menos 452 (Lücking, et al., 2014). Esto ilustra por qué los líquenes no hay forma

de identificarlos como individuos y tampoco tienen cabida en ninguno de los pedáneos de las JB. Aunque se intente asignarles nombres de especies, en realidad la falta de consenso hace que sea un grupo con una alta inestabilidad taxonómica. Por lo que no hay forma de definir un individuo o algún tipo de población.

#### MICORRIZAS Y LA RIZOSFERA

El papel que juegan las micorrizas en el ambiente es fundamental. Se trata de la infección que algunos hongos llevan a cabo en las raíces de las plantas, formando un microambiente que recibe el nombre de rizosfera. En la rizosfera ocurre una serie de relaciones simbióticas de muy diversa índole, en las que al parecer todos salen ganando. Es posible encontrar, además de la interacción entre un hongo y las raíces de la planta, bacterias fijadoras de nitrógeno, como *Rhizobium*. La bacteria *Pseudomonas* es la más común en la rizosfera y es la que facilita que se establezca la relación entre el hongo y la planta. *Agrobacterium* y *Pseudomonas* juegan un papel fundamental al solubilizar el fósforo para que pueda ser absorbido por las hifas del hongo, que lo pone a disposición de la planta (figura 2<sup>1</sup> de Philippot, Raaijmakers, Lemenceau & van der Putten, 2013; Reyes Jaramillo, 2011).

Las micorrizas son comunes a 95 por ciento de las plantas y no sólo se relacionan con las plantas con flores, sino también con helechos y musgos. Hay diferentes tipos de micorrizas, dependiendo de la relación que se trate, pero las más importantes son las endomicorrizas o micorrizas arbusculares, que se caracterizan porque las hifas del hongo penetran hasta las células de la raíz de las plantas formando lo que se conoce como arbuscúlos que son los órganos de intercambio de nutrientes (Aguilera Gómez, et al., 2007).

Las micorrizas se forman con hongos que son simbióticos estrictos, es decir, que sólo se desarrollan adecuadamente en presencia de las raíces de las plantas. Se trata del orden de los Glomales que incluso se ha independizado taxonómicamente (para algunos autores) del grupo de los Ascomicetos y de los Basidiomicetos (Guerra Sierra, 2008).

En la micorriza la planta se beneficia de diversas formas. Ya que no puede aprovechar entre 95 y 99 por ciento del fósforo del suelo, pues forma precipitados, el hongo lo hace soluble para que lo pueda absorber la planta. Además, la extensión de las hifas genera un incremento en la zona de absorción de agua de la planta, con lo que incrementa la zona de exploración de la planta-hongo aumentando el volumen del suelo que pueden aprovechar. Por otro lado, la planta aporta al hongo carbohidratos y otros productos de la fotosíntesis de los que se alimenta. En muchas ocasiones el micelio del hongo se extiende más allá de las raíces de la planta y forma otra micorriza con otra planta, incluso de otra especie. Esto ha planteado la pregunta de si no existirá comunicación molecular entre las plantas (Dimijian, 2000).

---

<sup>1</sup> La rizosfera es una zona delgada del suelo que rodea y es influenciada por las raíces de las plantas. El esquema referido muestra imágenes ampliadas de la rizosfera, que contiene bacterias saprofitas y hongos; incluso hongos de micorriza arbuscular.

La micorriza juega un papel protector de las raíces de la planta. Esto ocurre sobre todo en suelos contaminados por metales pesados donde el hongo inmoviliza dichos metales en la raíz y evita su traslocación a otras partes de la planta, lo cual a su vez detiene el flujo de metales a lo largo de las redes tróficas. Por tanto, la micorriza protege a la planta de posible estrés hídrico, controla y regula el desarrollo de organismos patógenos y facilita la tolerancia a la presencia de metales pesados (Guerra Sierra, 2008).

La importancia de las micorrizas es muy grande; se piensa que los primeros en colonizar la corteza terrestre fueron los hongos, quienes después favorecieron que las plantas también la colonizaran (Guerra Sierra, 2008). A primera vista, se podría pensar que las micorrizas evolucionaron a partir de una infección del hongo parásito sobre las raíces de las plantas, pero algunas evidencias señalan que quizá lo que ocurrió fue precisamente lo contrario. Se sabe que en algunas fases del desarrollo de las plantas (gametofito) no se lleva a cabo la fotosíntesis, por lo que se habría desarrollado a partir de los nutrientes que le aportara el hongo (Aguilera Gómez, et al., 2007; Reyes Jaramillo, 2011).

Es importante decir que no todas las plantas generan micorrizas e incluso algunas secretan sustancias para que las esporas de los hongos no germinen, como ocurre en la familia de las Capparales. En dichos casos la planta secreta sustancias, por ejemplo, isotiocianatos, nitrilos y tiocianatos. La baja actividad fúngica se relaciona básicamente con plantas que viven en climas extremos o en ambientes inundados como los manglares (Aguilera Gómez, et al., 2007).

Las micorrizas también son muy importantes porque no permiten la erosión de los suelos al formar agregados de arena o partículas del suelo gracias al micelio fúngico. La rizosfera es mucho más que la relación simbiótica de hongos y plantas. Se trata de comunidades muy complejas donde las bacterias también juegan un papel muy importante. En la rizosfera de *Avena fatua*, por ejemplo, es posible detectar hasta casi dos mil especies diferentes, la mayoría de los grupos de las firmicutes o de las actinobacterias. La formación de la rizosfera es un proceso que comienza con el tipo de suelo, el cual se podría decir que es el semillero de los organismos que conformarán la rizosfera. Posteriormente, el lugar preciso de desarrollo también juega un papel fundamental. Finalmente, la especie de la planta y su acervo genético son los que establecen quiénes jugarán un rol en la formación (¿desarrollo?) de la rizosfera. Todo depende en gran medida de los metabolitos que libere la planta.

En primer lugar, las raíces de las plantas liberan azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos y mucopolisacáridos, para que sirvan de alimento a los organismos involucrados, que en ocasiones pueden constituir hasta 25 por ciento de los depósitos de carbón de las plantas. Pero también liberan flavonoides para atraer cierto tipo de bacterias, promover la germinación de las esporas de los hongos, e incluso intervenir en la señal de quorum (*quorum sensing*, QS) de las biopelículas bacterianas.

Las bacterias juegan un papel tan importante en el desarrollo de la rizosfera que el maíz, por ejemplo, almacena algunas de ellas en sus semillas para facilitar su desarrollo. Todo parece indicar que el microbioma de las plantas puede transmi-

tirse a la siguiente generación, lo cual es relevante porque la rizosfera es la primera línea de defensa de la planta.

La rizosfera depende en gran medida de las plantas que la conforman. A mayor diversidad de plantas, mayor diversidad en metabolitos y mayor biodiversidad; lo cual a su vez se traduce en un sistema de “comunicación” muy complejo. Los hongos también pueden secretar sustancias que la planta usa para ahuyentar a los herbívoros (Philippot, Raaijmakers, Lemenceau & van der Putten, 2013).

Las complejas relaciones que ocurren bajo el suelo ejercen una muy importante influencia en el desarrollo de las cadenas tróficas de arriba (en la filosfera). De la misma forma, lo que ocurre en la filosfera afecta directamente la rizosfera. Se ha visto que si un predador ataca una planta, la rizosfera acelera la producción de ciertos metabolitos (glucosinolatos), que tendrán un efecto tóxico en los predadores (Philippot, Raaijmakers, Lemenceau & van der Putten, 2013).

Es difícil pensar que una planta es un organismo individual; en realidad se trata de una comunidad compleja que interactúa con una gran cantidad de organismos. Además del hongo, están involucrados insectos, anélidos, nematodos, bacterias, protistas, etc. Todo parece indicar que la comunicación entre ellos genera procesos sinérgicos muy complejos que los mantienen formando relaciones sumamente estrechas. De tal forma que es muy difícil pensar que una especie evolucione de manera independiente de las demás. Este tipo de relaciones esenciales para la vida no puede incorporarse a las JB. Cuando un investigador estudia determinada planta tiene que dar un enorme salto conceptual o epistemológico para asegurar que se trata de un organismo individual. No hay, en estos casos, posibilidad de una ontología basada en organismos individuales.

#### LAS RELACIONES SIMBIÓTICAS ENTRE TERMITAS

Todas las termitas se alimentan de lignocelulosa, el principal componente de la pared celular de las plantas leñosas. Las termitas la consumen en forma de madera viva o en algún estado de descomposición. La digestión que llevan a cabo se considera el proceso más eficiente de descomposición de madera que hay en la naturaleza, incluso mejor que el de los rumiantes. Para digerir la celulosa, las termitas poseen un microbioma muy complejo en el que participan protistas flagelados, bacterias, levaduras e incluso metanógenas (König, et al., 2006). Las termitas no sobreviven sin su microbioma, si se les retira siguen comiendo madera, pero no la pueden digerir y mueren de hambre (Brune, 2014). Se estima que la mitad del peso de una termita está formada por su microbioma y se han descrito 450 especies distintas de flagelados en sus intestinos (Brune & Stingl, 2006).

El sistema digestivo de las termitas se divide en intestino anterior, intestino medio e intestino posterior. La región posterior, la más compleja y diversificada en funciones, es donde se llevan a cabo las relaciones simbióticas entre diversos organismos. En cada especie de termita el intestino posterior está adaptado de forma que responde a las necesidades del nicho que ocupa y a la relación con su microbioma. En dicho intestino se generan microhábitats específicos para ciertos

miembros de un microbioma altamente organizado, pues los organismos no se distribuyen al azar (Brune & Stingl, 2006).

La región posterior del intestino de las termitas genera un ambiente anaeróbico o con muy poco oxígeno, donde los flagelados como *Trichonympha*, *Calonympha*, *Tricerocomitus* y *Mixotricha paradoxa* establecen relaciones simbióticas con bacterias (básicamente espiroquetas) y metanobacterias para procesar la madera, de forma que se genere acetato (y otros ácidos grasos de cadena corta) y se liberen hidrógeno y metano. Las bacterias pueden encontrarse como endosimbiontes dentro de los flagelados; adherirse a la superficie de los flagelados en invaginaciones muy profundas; formar biopelículas o agregados microbianos; y adherirse a la superficie epitelial del intestino.

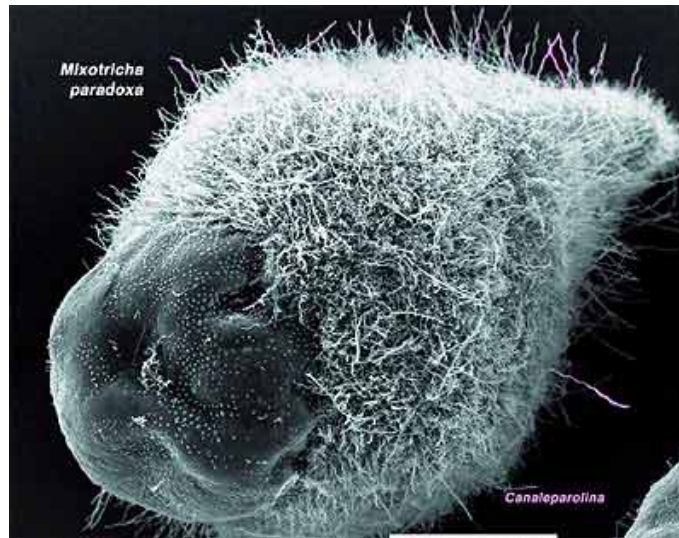
El citoplasma es el lugar donde más bacterias hay. Las reacciones enzimáticas poseen un elevado grado de complejidad y no se han descubierto todas, porque el microbioma de cada especie de termitas es diferente e incluso hay diferencias metabólicas entre cada clase (Brune & Stingl, 2006).

Algunas que generan procesos de ectosimbiosis con hongos, como el género *Termitomyces* (basidiomiceto), se alimentan de madera que no terminan de digerir. Las heces de esta digestión se utilizan para que se desarrolle el hongo. Las obreras recogen partes del hongo, esporas, e incluso más heces, lo mezclan y alimentan a la colonia.

Un problema que enfrentan las termitas es que la madera es muy pobre en nitrógeno, por lo que poseen mecanismos muy eficientes para aprovecharlo al máximo. Aquí las bacterias simbiotas juegan un papel fundamental, porque no permiten que el ácido úrico, resultado del metabolismo de la termita, salga del cuerpo, sino que lo convierten en vitaminas y aminoácidos que pueda aprovechar de nuevo el hospedero. Además, el nitrógeno se pasa de generación en generación, a través de trofalaxis proctodélica (secreciones que son compartidas ano-boca), de tal forma que no se desperdicia casi nada. En el intestino de algunas termitas también hay bacterias fijadoras de nitrógeno (Brune, 2014). Por tanto, las relaciones simbióticas y su elevado nivel de integración son fundamentales para las termitas y para cada uno de los organismos involucrados. Se ha dicho incluso que la parte posterior del intestino de las termitas es en realidad un micro-ecosistema.

*Mastotermes darwiniensis*, una termita gigante que vive en colonias, en el norte de Australia, es la termita más primitiva que se conoce. Al parecer, es la única sobreviviente de muchas especies que estuvieron distribuidas mundialmente. Se considera una plaga formidable y en la actualidad se han abandonado muchos cultivos vegetales, sobre todo de hortalizas, porque es muy difícil erradicarla. Este organismo es muy similar a las cucarachas, y está fuertemente emparentada con ellas. Se alimenta básicamente de celulosa y tiene en su sistema digestivo un organismo que ha sido nombrado la "bestia de cinco genoma" (Margulis & Sagan, 2001): *Mixotricha paradoxa*, que tiene la apariencia de un protista ciliado, con forma de pera, tiene unos 500  $\mu\text{m}$  de largo por 250  $\mu\text{m}$  de diámetro (fig. 2).

Dentro de ella conviven aproximadamente 250 mil espiroquetas (*Treponema spirrochetes*) que cumplen la función de undulipodios; una gran cantidad de bacterias



**Figura 2:** Micrografía de *Mixotricha paradoxa*.  
Fuente: León Cazares, n.d., correspondiente a la fig. 8.

que tienen las mismas funciones que las mitocondrias; unas 200 bacterias en forma de espiroquetas llamadas *Canaleporina darwiniensis*, y aproximadamente 250 mil bacterias en forma de bacilo. En este caso, pareciera que el individuo es cada ejemplar de *Mixotricha paradoxa*, pero no es tan sencillo si uno se pregunta por los organismos que forman las asociaciones con ella. Las espiroquetas y algunos bacilos están perfectamente ordenados en la membrana celular de *Mixotricha paradoxa*, y son los que le dan movimiento. Aún no se conoce la forma en la que este conjunto de organismos se comunica, pero el movimiento es altamente coordinado (König, et al., 2006).

Las termitas son un claro ejemplo de la importancia de las relaciones simbióticas: cada uno de estos organismos está altamente integrado en un conjunto de ellas, sumamente complejas y sin dilucidar del todo. ¿Cuál es el lugar de las termitas en las JB? Si se toma una termita, ¿se trata de algo similar a una célula, un tejido, un órgano, un organismo individual o más a un ecosistema? Y, en el caso del termitero, ¿tenemos un organismo individual o, por el contrario, se trata de un ecosistema? Entonces, el ecosistema que contenga varios termiteros, ¿a qué tipo de organización responde? Sin embargo, lo que ocurre a las termitas, también le ocurre a todos los participantes: *Termytomices*, *Trichonympha*, *Calonympha*, *Tricerocornitus*, *Mixotricha paradoxa*, *Treponema spirochetes*, *Canaleporina darwiniensis*, etc.

## EL MICROBIOMA HUMANO

El microbioma humano se refiere al enorme conjunto de bacterias que pueblan el cuerpo, principalmente la piel, todo el sistema digestivo y las áreas genitales, pero que se concentra principalmente en el colon. El número de células bacterianas del cuerpo humano es unas diez veces mayor a las del hospedero (Ackerman, 2012). Pero, si se considera el número de genes, entonces el factor es de 150 (Sankar, et al., 2015; Matsen IV, 2015). Algunas investigaciones sobre secuenciación metagenómica han demostrado que el intestino de cada persona ha estado en contacto con al menos unas 150 a 160 especies de bacterias diferentes (Rodríguez, et al., 2015; Lozupone, et al., 2015).

El microbioma humano se encuentra principalmente en el colon y está formado por bacterias, algunas arqueobacterias, eucariotas (como levaduras) y virus. Se considera que sólo se ha caracterizado treinta por ciento del microbioma, por lo que aún falta mucho por descubrir con todo y que es un área en la que se está llevando a cabo mucha investigación pública y privada. Además de que el microbioma cambia con base en el origen geográfico, la edad, la dieta, la ingesta crónica o no de antibióticos, etcétera. Los representantes más importantes del microbioma son las bacterias y en particular Firmicutes, Bacteroidetes, Actinobacteria, Cyanobacteria, Fusobacteria y Verrucomicrobia. La distribución de estos organismos a lo largo del todo el tubo digestivo depende de las condiciones, por lo que no es uniforme y varía dependiendo de la zona en la que se encuentren. Las bacterias pueden pasar de cien a mil por mililitro en el estómago, a billones por mililitro en el colon. Hay que subrayar que la región en donde menos se ha estudiado el microbioma es la del intestino delgado (Lozupone, et al., 2015).

El microbioma se establece por el tipo de nacimiento (cesárea o parto natural), el tipo de dieta (leche materna u otra) y otros elementos ecológicos, entre los que se incluye, de manera muy importante, el que el infante tenga contacto con heces propias, de otros miembros de la familia, e incluso de animales, ya que las heces pueden llegar a contener hasta cien mil millones de células por gramo (de Vos, 2015). Usualmente se estabiliza a la edad de los tres años, y así se puede mantener por algún tiempo. Este proceso de estabilización es muy importante porque cuando ocurre que alguna especie comienza a ser dominante (por ejemplo, *Lactobacillus reuterii*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*) por alguna razón medioambiental, con respecto a otra que deja de serlo (*L. casei*, *L. paracasei*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus plantarum*) se desarrolla alguna enfermedad (Sankar, et al., 2015).

La estabilidad y la capacidad de resiliencia del microbioma puede estar comprometida por el uso indiscriminado de antibióticos, infecciones bacterianas, estilos de vida, cirugías, dietas a largo plazo y la relación que establecen las mucinas<sup>2</sup> con las bacterias del colon (Rodríguez, et al., 2015). Muchas enfermedades asociadas al microbioma en poblaciones de migrantes se presentan a partir de la dieta del

---

<sup>2</sup> Las mucinas son el conjunto de proteínas que forman una capa de moco en el sistema digestivo. Se han reconocido 22 de ellas y, según la preponderancia de cada una, es el tipo de bacterias que colonizan determinado tejido.

nuevo ambiente, no de la dieta de origen. Aún es materia de discusión la forma en que inciden las tradiciones o la dieta a largo plazo, en particular de los ancianos (Lozupone, et al., 2015).

Los organismos que integran el microbioma del colon se distribuyen en biopelículas o *biofilms* (ambientes anaeróbicos y resistentes a estresores ambientales) en donde cada bacteria tendrá su propio estado metabólico. Estos biofilms se pueden adherir tanto a trozos de fibra vegetal, a gránulos de almidón u otro tipo de restos de fibras de colágeno que se encuentren en el colon, y en cada una la composición del biofilm será diferente (Xu & Gordon, 2003). Estos biofilms se adhieren a las células intestinales con las que establecen comunicación a partir de diferentes tipos de metabolitos. También se vinculan a las mucinas generando un sistema altamente dinámico, dado que la mucosa intestinal está creciendo constantemente y está vinculada a las especies de bacterias involucradas (de Vos, 2015).

<i>Funciones que desempeña el microbioma en el cuerpo humano</i>
1. Juega un papel fundamental en la absorción de los nutrientes en el intestino.
2. Dificulta el desarrollo de infecciones.
3. Las propiedades que desarrolla la capa de mucosidad del intestino depende del tipo de bacterias que interactúan con el hospedero.
4. Maduración del sistema inmune: Induce el desarrollo de estructuras linfáticas como los parches de Peyer, además de modular la diferenciación de las células.
5. Lleva a cabo la regulación de la secreción de mediadores del sistema inmune.
6. Expande la capacidad de procesamiento bioquímico.
7. Facilita el metabolismo xenobiótico.
8. Lleva a cabo la síntesis de metabolitos básicos como vitaminas.
9. Proporciona los elementos necesarios para el control de la proliferación celular.
10. Lleva a cabo el control del desarrollo del intestino o de otros órganos influyendo en la angiogénesis.
11. Facilita la modulación de la permeabilidad en el tracto gastrintestinal.
12. Homeostasis del tejido óseo.
13. Modula el dolor, la inflamación y evita el desarrollo de carcinogénesis.
14. Está involucrado en el desarrollo o no de obesidad por parte del hospedero.
15. Está involucrado en la regulación del comportamiento, llevando a cabo disminución o incremento de ansiedad, lo cual a su vez establece una relación directa en la interacción con el depredador.
16. Regula la conectividad sináptica.

**Tabla 1:** Fuente: Sommer & Bäckhed (2013).

El microbioma humano juega un papel fundamental en la adaptación al medio ambiente ya que hay una muy estrecha relación entre los microorganismos y el hospedero. Por ejemplo, el microbioma permite la maduración del sistema inmune, protege en contra de agentes patógenos, libera energía y moléculas como vitaminas del alimento, fermenta algunos de los carbohidratos que no se pueden digerir. Las enfermedades asociadas a problemas en el microbioma son tan diversas como obesidad, diabetes tipo 2, colon irritable, enfermedades autoinmunes, asma, piedras en el riñón, periodontitis, psoriasis e incluso depresión y esquizo-



frenia (Morgan, Segata & Huttenhower, 2013; Xu & Knight, 2015). La relación es tan estrecha que en la tabla 1 se puede ver una lista de los procesos en los que interviene el microbioma humano.

El nivel de individuo u organismo es el nivel en el que se integran la mayor parte de las teorías de las ciencias médicas y biológicas. Durante mucho tiempo se asumió que era la unidad individual, pero hoy ya no podemos ignorar que la fisiología (y no sabemos hasta qué punto su comportamiento) está mediada por su microbioma. Las personas han dejado de ser individuos para convertirse en estructuras complejas como los ecosistemas. Los metazoarios han dejado de ser las “islas fisiológicas” de antaño y, por el contrario, en realidad se trata de holobiontes. El holobionte no tiene cabida en ninguna de las JB. No hay forma de integrarlo, lo cual es sumamente paradójico porque, en realidad, el individuo que antes fue el centro de integración de las JB, no puede ahora estar en ninguna de ellas.

#### EL INDIVIDUO COMO HOLOBIONTE: SU CONSTRUCCIÓN A TRAVÉS DE LA SINTROFÍA

La sintrofia se refiere a la capacidad de los microorganismos de degradar una sustancia a lo largo de una cadena de metabolitos, dependiendo del tipo de metabolismo que lleven a cabo. Un ejemplo de esto es la degradación metanogénica de los compuestos orgánicos para liberar metano y bióxido de carbono. Lo que un organismo desecha es lo que el siguiente utiliza para su propio metabolismo. Cada uno vive de los productos de desecho del vecino; así, diversos microorganismos de diferentes especies forman una cadena metabólica: de esta manera se construye el holobionte (Dolfing, 2014).

Este tipo de acoplamientos metabólicos son muy comunes en la degradación de compuestos cíclicos de carbón con nitrógeno, azufre, etcétera. Un ejemplo de este tipo de asociaciones es la que presentan *Methanobacillus omelianski*, quien fermenta el alcohol para producir acetato e hidrógeno, mientras que *Methanobacterium bryantii*, utiliza el hidrógeno liberado para reducir el bióxido de carbono a metano (Morris, et al., 2013). Por tanto, la sintrofia es un tipo de relación simbiótica en la que los organismos cooperan, particularmente en ambientes pobres en oxígeno, como ocurre con el microbioma intestinal humano y el de las termitas.

La forma en que para López-García y Moreira (2002) se habría construido la célula eucariota parte de una sintrofia entre metanógenas y células proteobacterianas en ambientes pobres en oxígeno. La relación fue cada vez más estrecha, hasta que las membranas de las células dejaron de separarlas y hubo intercambio de citoplasmas. Poco a poco, las características de las metanógenas se irían perdiendo. Posteriormente, con otro tipo de sintrofia se llevaría a cabo el reclutamiento de las células que darían origen a las mitocondrias (López-García & Moreira, 2002).

Aunque el origen de la célula eucariota no se ha esclarecido, se sabe que la sintrofia ha jugado un papel muy importante en el desarrollo de los microbiomas de infinidad de organismos entre los que se ubica el ser humano. La sintrofia es un mecanismo que utilizan también los líquenes y las micorrizas.

Si ampliamos un poco nuestra visión, en realidad, todos en el planeta están involucrados en los ciclos biogeoquímicos como autótrofos o heterótrofos. Por tanto, la sintrofia se encuentra en el corazón de la vida misma. Es una propiedad esencial de los seres vivos y debería dejar de tener un papel anecdótico en la biología para incorporarse en las discusiones sobre la naturaleza de la vida. Tampoco la filosofía de la biología ha dado cuenta de ella.

Las relaciones simbióticas, en la mayoría de los casos, cada vez se hacen más estrechas a través de la sintrofia, hasta el punto en el que los organismos pierden su individualidad morfológica (como en los líquenes) e incluso genética. En este sentido pareciera que la idea de un organismo individual autónomo e independiente se desvanece.

La noción de holobionte (el conjunto formado por un organismo multicelular y todos sus organismos asociados) se convierte en un reto para las JB, por lo que la percepción de lo que es un organismo individual se vería modificada. Esto tiene diversas implicaciones que juegan un papel decisivo en la forma en la que percibimos a los seres vivos. Por ejemplo, es claro que los organismos no poseen homogeneidad genética y que la noción de genoma debería reformularse por la de hologenoma.

#### A MANERA DE CONCLUSIÓN

En los estudios sobre el desarrollo (por ejemplo) de los metazoarios será importante tomar en cuenta el papel que desempeñan las comunidades bacterianas, lo cual a su vez nos cuestiona sobre lo que es propio o ajeno desde el punto de vista inmunológico. Por todo esto, quizá el holobionte es lo que debería de ser considerado como la unidad de selección (Gilbert, 2014).

El proceso de adaptación biológica no sólo ocurre entonces con respecto al medio ambiente físico, sino también con respecto a los organismos involucrados; es decir, si dos organismos han establecido relaciones simbióticas a lo largo del tiempo, ambos desarrollarán estrategias adaptativas para la presencia del otro. Esto implica que coevolucionarán, lo cual reforzará el proceso adaptativo (Dimijian, 2000).

Zilber-Rosenberg & Rosenberg (2008) proponen que la unidad de selección evolutiva debería ser el hologenoma. La evolución del holobionte estaría dada por la modificación genética de cualquiera de los organismos que lo integran.

El problema con esta perspectiva es que en todo momento sugiere que el holobionte es un metazoario o una planta superior; pero la diversidad de organismos es mayor. Por su parte, Booth (2014) asegura que la teoría de la evolución debería de asumir que la unidad de selección es el holobionte. Situación que plantea el problema de que no es posible conocer el linaje de cada uno de los organismos que integran al holobionte, por lo que se requieren modelos con pluralismo y más complejos.

La teoría de la evolución intenta explicar la vida, y no sólo los organismos pluricelulares. No hay que olvidar que la mayor parte de la biomasa del planeta está

formada por microorganismos que son los que han conquistado la mayor cantidad de hábitats y nichos. Llevan a cabo un sinnúmero de destrezas enzimáticas; su metabolismo es mucho más diverso que el de los organismos pluricelulares, e incluso llevan a cabo muchos de los procesos metabólicos de estos últimos (Duncan, et al., 2013).

Tradicionalmente, en las tareas de conservación de los ecosistemas se han establecido especies denominadas clave. Se trata de especies que tienen un efecto desproporcionado en el ecosistema, independientemente de su biomasa o su abundancia. Algunos ejemplos son la estrella de mar *Pisasterk*, la nutria *Enhydra lutris*, y el castor canadiense. Sin embargo, ¿qué pasaría si los biólogos se preocuparan más en cuidar a las especies de microorganismos y en particular las relaciones simbióticas? Por ejemplo, los corales juegan un papel decisivo en la construcción de ecosistemas marinos, pero lo decisivo es la relación simbiótica que establecen con el dinoflagelado *Symbiodinium*, sin el cual los depósitos de calcio y, por consiguiente, la construcción de arrecifes, se verían sumamente disminuidos. Este dinoflagelado llega a fijar 900 gramos de carbón por metro cuadrado al año en forma de carbonatos. De esta manera, los arrecifes fijan alrededor de cien millones de toneladas de carbón cada año. Se sabe que un coral sano es aquél que posee las relaciones simbióticas más robustas, no aquél que tiene una mayor cantidad de individuos (Zook, 2002).

Otros ejemplos son los líquenes y las micorrizas. Los líquenes llegan a constituir hasta ocho por ciento de la flora total del planeta y juegan un papel fundamental en la fijación del nitrógeno en la tundra y en el bosque lluvioso tropical. Además, son alimento de organismos que, como *Rangifer tarandus* (reno), bajo ciertas circunstancias, sólo encuentran líquenes como sustento.

Se cree que las micorrizas constituyen el porcentaje más alto de biomasa en cualquier hectárea de bosque. Por lo que se asume que lo que genera la distribución de las plantas es su capacidad para generar micorrizas desde hace al menos unos 400 millones de años, lo cual indica que sin micorrizas seguramente el desarrollo de las plantas se vería fuertemente limitado. Como nota al margen, podríamos mencionar que hasta el momento no se conocen esfuerzos de conservación que involucren a las micorrizas o al orden de los hongos Glomales (Zook, 2002).

Como ya se señaló, la simbiosis es una propiedad esencial de los seres vivos con todo y que muchas veces se desdeña su papel en los procesos evolutivos o ecológicos:

La invasión de la tierra por las plantas y todas sus consecuencias fue posible gracias a la simbiosis entre hongos y algas. La base de la pirámide trófica en los ecosistemas terrestres es la celulosa, cuya utilización depende de la simbiosis entre los animales y las bacterias. El papel de los virus como ingenieros genéticos naturales apenas ha sido investigado. El rechazar esto como insignificante en contraste con las adaptaciones menores que son numéricamente dominantes, y son las que proveen el sustrato para el pensamiento neodarwinista es una proeza enorme de anti-intelectualismo. (Reid, 1989, p.1138)

La simbiosis como una propiedad fundamental y esencial de los seres vivos ocasiona que se desdibuje la categoría de organismo individual. Tanto la biología como la filosofía de la biología requieren voltear su mirada hacia las relaciones simbióticas. Cada vez hay más investigaciones, pero aún falta mucho por hacer. Quizás en este tipo de procesos encontremos algunas soluciones a problemas como la obesidad o la conservación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ackerman, J., 2012. El ecosistema microbiano. *Investigación y ciencia*, Agosto, pp.16–23.
- Aguilera, L., Olalde, V., Arriaga, R. & Contreras, R., 2007. Micorrizas arbusculares. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), pp.300–306.
- Bold, H., Alexopoulos, C. & Delevoryas, T. 1980. *Morphology of Plants and Fungi*. 4th ed. New York: Harper & Row.
- Booth, A., 2014. Symbiosis, selection, and individuality. *Biol Philos*, 29(5), pp.657–673.
- Brune, A., 2014. Symbiotic digestion of lignocellulose in termite guts. *Nature Reviews in Microbiology*, 12(2), pp.168–180.
- Brune, A. & Stingl, U., 2006. Prokaryotic symbionts of termite gut flagellates: phylogenetic and metabolic implications of a tripartite symbiosis. *Progress in Molecular and Subcellular Biology*, 41, pp.39–60.
- Clerc, P., 1998. Species Concepts in the genus *Usnea* (Lichenized Ascomycetes). *Lichenologist*, 30(4-5), pp.321–340.
- Dawkins, R. & Margulis, L., 2009. *Homage to Darwin. A debate on evolution* (part 3), (Voices from Oxford in collaboration with University of Massachusetts – AMHERST). [video online] Disponible en: <https://vimeo.com/51768267> [consultado: 10.abril.2015].
- de Vos, W., 2015. Microbial biofilms and the human intestinal microbiome. *NPJ Biofilms and Microbiomes*, 1(15005), pp.1–3. doi:10.1038/npjbiofilms.2015.5.
- Dimijian, G., 2000. Evolving together: the biology of symbiosis, part 1. *Proc (Bayl Univ Med Cent)*, 13(3), pp.217–226.
- Dolfing, J., 2014. Syntrophy in microbial fuel cells. *ISME Journal*, 8(1), pp.4–5.
- Dyer, B., 1989. Symbiosis and Organismal Boundaries. *Amer. Zool.*, 29(3), pp.1085–1093.
- Friedl, T. & Bhattacharya, D., 2002. Origin and evolution of green lichen algae. In: Seckbach, J. (ed.), *Symbiosis: Mechanisms and Model Systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp.341–357.
- Gerardo, N., 2015. Harnessing evolution to elucidate the consequences of symbiosis. *PLoS Biol*, 13(2), e1002066. doi:10.1371/journal.pbio.1002066.
- Gilbert, S., 2014. Symbiosis as the way of eukaryotic life: the dependent co-origination of the body. *J. Biosci.*, 39(2), pp.201–209.
- Gilbert, S., Sapp, J. & Tauber, A., 2012. A symbiotic view of life: we have never been individuals. *The Quarterly Review of Biology*, 87(4), pp.325–341.
- Guerra Sierra, B., 2008. Micorriza arbuscular. Recurso microbiológico de la agricultura sostenible. *Tecnología en marcha*, 21(1), pp.191–201.
- Jeon, K.W., 2002. Foreword. In: Seckbach, J. (ed.), *Symbiosis: Mechanisms and Model Systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p.xiii.
- König, H., et al., 2006. Bacterial ectosymbionts which confer motility: *Mixotricha paradoxa* from the intestine of the australian termite *Mastotermes darwiniensis*. In: Overmann, J. (ed.), *Molecular Basis of Symbiosis*. Berlin: Springer Verlag. pp.77–96.

- León Cazares, J.M., n.d. *Estudios sobre el origen y evolucion de los sistemas celulares*. [consultado: 20.feb.2019].
- López-García, P. & Moreira, D., 2002. The syntrophy hypothesis for the origin of eukaryotes. In: Seckbach, J. (ed.), *Symbiosis: Mechanisms and Model Systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp.131–146.
- Lozupone, C., et al., 2015. Diversity, stability and resilience of the human gut microbiota. *Nature*, 489(7415), pp.220–230.
- Lücking, R., Dal-Forno, M., et al., 2014. A single macrolichen constitutes hundreds of unrecognized species. *PNAS*. doi:10.1073/pnas.1403517111.
- Margulis, L. & Sagan, D., 2001. The beast with five genomes. *Natural History*, 110(5), pp.38–41. Disponible: [http://www.naturalhistorymag.com/htmlsite/0601/0601\\_feature.html](http://www.naturalhistorymag.com/htmlsite/0601/0601_feature.html) [consultado: 23.mayo.2014]
- Matsen IV, F., 2015. Phylogenetics and the human microbiome. *Syst. Biol.*, 64(1), pp.e26–e41.
- Morgan, X., Segata, N. & Huttenhower, C., 2013. Biodiversity and functional genomics in the human microbiome. *Trends in Genetics*, 29(1), pp.51–58.
- Morris, B., et al., 2013. Microbial syntrophy: interaction for the common good. *FEMS Microbio Rev*, 37(3), pp.384–406.
- Nardon, P. & Charles, H., 2002. Morphological aspects of symbiosis. In: Seckbach, J. (ed.), *Symbiosis: Mechanisms and Model Systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp.13–44.
- Philippot, L., Raaijmakers, J., Lemenceau, P. & van der Putten, W., 2013. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11(11), pp.789–799. doi:10.1038/nrmicro3109.
- Reid, R., 1989. The Unwhole Organism. *American Zoologist*, 29(3), pp.1133–1140.
- Reyes Jaramillo, I., 2011. La micorriza arbuscular (MA) centro de la rizósfera: comunidad microbiológica dinámica del suelo. *ContactoS*, 81, pp.17–23.
- Rodríguez, J.M., et al., 2015. The composition of the gut microbiota throughout life, with an emphasis on early life. *Microbial Ecology in Health and Disease*, 26, pp.1–17. doi: 10.3402/mehd.v26.26050.
- Sankar, S., et al., 2015. The human gut microbiome, a taxonomic conundrum. *Systematics and Applied Microbiology*, 38(4), pp.276–286.
- Sommer, F. & Bäckhed, F., 2013. The gut microbiota — masters of host development and physiology. *Nature Reviews Microbiology*, 11(4), pp.227–238.
- Stephenson, S., 2010. *The Kingdom Fungi: The biology of mushrooms, molds, and lichens*. Timber Press.
- Xu, J. & Gordon, J., 2003. Honor thy symbionts. *PNAS*, 100(18), pp.10452–10459.
- Xu, Z. & Knight, R., 2015. Dietary effects on human gut microbiome diversity. *British Journal of Nutrition*, 113(1), pp.S1–S5.
- Zilber-Rosenberg, I. & Rosenberg, E., 2008. Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution. *FEMS Microbiol Rev*, 32(5), pp.723–35.
- Zook, D., 2002. Prioritizing symbiosis to sustain biodiversity: Are symbionts keystone species? In: Seckbach, J. (ed.), *Symbiosis: Mechanisms and Model Systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp.3–12.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## BIOCOMPLEJIDAD: EL DESAFÍO TRANSDISCIPLINARIO DE LAS NATURALEZAS-CULTURAS

Octavio Valadez-Blanco\*

El orden, la uniformidad, la simetría parecen más bien cosas de la muerte. La vida es desorden, es lucha, es crítica, es desacuerdo, es hervidero de pasiones. De ese caos sale la belleza; de esa confusión sale la ciencia; de la crítica, del choque, del desorden, del hervidero de pasiones surgen radiantes como ascuas, pero grandes como soles, la verdad y la libertad. La discordia, he ahí el grande agente creador que obra en la naturaleza.

Ricardo Flores Magón

*Regeneración*, 29 de octubre de 1910

\* \* \*

### INTRODUCCIÓN

Lo complejo marca un asombro, una insuficiencia explicativa: la crisis de nuestros conocimientos sobre la vida. No se resuelve el problema elucidando la secuencia de un genoma, tampoco se agota su fenomenología en los tratados fisiológicos, ni en los estudios ecológicos. La vida se desborda de los marcos teóricos con la cual hemos querido definirla, modelarla, predecirla y controlarla. Esta complejidad se vuelve más cercana y angustiante cuando el problema biológico deja de ser sólo el objeto lejano de una ciencia natural, y se vuelve la vida del sujeto encarnado en un conflicto social, el desafío cotidiano de ser mortal en una civilización contradictoria.

Pero la complejidad no es sólo un sustantivo o un adjetivo, sino un discurso que en las últimas décadas se ha convertido en una red de categorías y supuestos que buscan transformar la forma y el contenido de nuestros conocimientos sobre el cosmos: de las entidades a los procesos; de las partes a los sistemas; de los mecanismos a las propiedades emergentes; de las causalidades proporcionales a las causalidades no lineales; de los sistemas homogéneos y fácilmente modelables a los sistemas heterogéneos y alejados de las condiciones ideales. En suma, una apertura a las anomalías de nuestros modelos, a la incertidumbre, a la diferencia y a la contingencia que han quedado ocultas en las simplificaciones de la ciencia

---

\* Becario del Programa de Becas Posdoctorales de la UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas, asesorado por el Dr. Luis Vargas Guadarrama. / hoktavius@yahoo.com.mx

y su modernidad. La complejidad es entonces un discurso que acuerpa lenguajes, prácticas e itinerarios de intervención.

En la física, por ejemplo, los sistemas complejos son localizados en el nivel mesoscópico del universo, donde las grandes leyes de lo micro y de lo macroscópico se derrumban frente a sistemas que se mueven en los terrenos de lo impredecible, lo caótico, lo abierto, lo novedoso, es decir, de la vida y de la sociedad.

La complejidad deja de ser entonces la trivial limitación de nuestras capacidades cognitivas, y se vuelve desafíos explicativos, e.g. entender el desarrollo de los organismos multicelulares; exigencias específicas de resolución de conflictos, e.g. violencia y conflictos socioambientales; prevención o cura de padecimientos y enfermedades emergentes, entre muchos otros. Los crecientes institutos centrados en el estudio de la complejidad y de los sistemas complejos se vuelven espacios que prometen dar alternativas para responder a estas preguntas y desafíos, que se ramifican en los campos de la física, la biología, la sociología y el desarrollo de múltiples tecnologías. Si bien el pensamiento complejo puede rastrear desde mediados del siglo XX (Emmeche, 1997) es ahora cuando las ciencias naturales parecen tener las herramientas conceptuales y técnicas para poder entender el carácter no lineal, caótico y frustrado de los sistemas biológicos y sociales (Kauffman, 1996). Para la física, los sistemas complejos son estudiados con un aparato matemático formal y semiformal que puedan dar cuenta de su carácter dinámico y auto-organizativo (Érdi, 2008).

Bajo esta perspectiva contemporánea, la “biocomplejidad” puede entenderse como la rama biológica de estos discursos, esto es, el campo de investigaciones centradas en la aplicación e investigación de los organismos y sus relaciones como sistemas complejos. La biocomplejidad sería entonces las estructuras, los patrones y las dinámicas auto-organizadas de la vida, que pueden ser modelados por estas herramientas formales.

Sin embargo, ¿qué pasa con la complejidad que aparece ante el etnobotánico, y que sin incluir necesariamente modelos formales, puede explicar dinámicas entre comunidades y procesos de domesticación, por ejemplo? ¿Qué agrega la biocomplejidad a lo que la biología y otros saberes sobre la vida han dicho en sus múltiples ramificaciones?, ¿cuál es la novedad en los modelos, las prácticas y las aplicaciones que han nacido desde diversos conocimientos y prácticas sobre la vida?

En los siguientes apartados mostraré una propuesta crítica y transdisciplinaria de la biocomplejidad. Mi objetivo es mostrar que la biocomplejidad es un contenido ontológico fluido y relacionado de la vida, y que la forma de su conocimiento (su epistemología) tendrá que ser transdisciplinaria, esto es, una convergencia de múltiples voces, sujetos y agencias. En mis supuestos, la biocomplejidad no es reducible a la aplicación de modelos sistémicos para una teoría de los seres vivos, sino que debe ser entendida como el carácter multifacético de la vida, que incluye no sólo a los objetos de la biología, sino también a las diversas subjetividades y los diferentes mundos bioculturales.



Para poder caracterizar esta visión general de la biocomplejidad, en el primer apartado presento algunos elementos clave para desambiguar la discusión en torno a la complejidad, con la cual puedo ubicar las implicaciones epistémicas, ontológicas y técnicas del discurso; en un segundo momento expondré un esquema que nos permita interpretar los discursos sobre complejidad, en dos direcciones: la complejidad en sentido *formal*, caracterizada por los modelos de la física de los sistemas complejos y de metodologías matemáticas ancladas en dinámicas no lineales; en segundo lugar, la complejidad en *sentido histórico*, identificada con una crítica filosófica e histórica a la razón moderna y sus repercusiones civilizatorias. Finalmente, usaré estas distinciones para unificar el desafío transdisciplinario con la biocomplejidad, es decir, la necesidad de gestar una red transdisciplinaria de afectados y expertos, de la mano de un discurso centrado en las interacciones y conflictos entre naturalezas-culturas, objetos y sujetos, normal-patológico, ser y deber ser.

#### DE LA BIOCOPLEJIDAD DEL OBJETO A LA BIOCOPLEJIDAD DE LOS SUJETOS

En fenomenología, la distinción entre el cuerpo-que-tengo y el cuerpo-que-soy permite recordar que la pregunta y el conocimiento objetivo sólo adquieren su sentido en función de la vida que las posibilita y en el mundo cultural en que se inscriben (Merleau-Ponty and Cabanes, 1997). La sangre, por ejemplo, no es sólo un líquido acuoso que transporta células y metabolitos, sino también representa la vulnerabilidad de los cuerpos, las posibilidades diversas de exponer nuestro interior, de abrir nuestra frontera corporal. Bajo esta perspectiva la vida es el objeto de las ciencias biológicas, i.e. una diversidad de estructuras celulares y relaciones ecológicas; pero también es el contenido y la forma de nuestro propio existir como sujetos: seres culturales o biográficos que lidian con una cotidianidad, contra desafíos y conflictos propios de su contexto y de su localización geopolítica.

Este doble carácter de la vida, de ser el objeto de estudio y el contenido de nuestra subjetividad, emerge ante situaciones en que nos descubrimos como seres encarnados y mortales, por ejemplo, cuando sentimos y padecemos la vulnerabilidad de nuestro propio cuerpo. El cuerpo-objeto, descrito como estructuras físicas y procesos bioquímicos y celulares, se vuelve un cuerpo-padecido y descrito en función de una experiencia vivida. Así, la vida no sólo es el contenido del conocimiento de la biocomplejidad, sino también la forma de este conocimiento: desde estructuras cognitivas fijadas en los procesos evolutivos, hasta una gama de expresiones culturales fijadas en los procesos históricos.

Las diferencias entre ciencias sociales, ciencias biológicas y humanidades, separaron estas dimensiones: para las ciencias de la vida se trata de *explicar* los patrones y las estructuras generales de la diversidad y adaptación biológica; mientras que para las ciencias sociales y las humanidades importa *reconocer* la diversidad de experiencias y formas de vida, es decir, sería el lado bio-etno-gráfico, donde tendríamos no una naturaleza general, sino una diversidad de voces, expresio-

nes y gritos que hablan desde o por las diferentes formas de ser y tejer relaciones ecológicas y políticas.

Si la complejidad expresa un contenido interconectado del cosmos, el prefijo *bios*, quiere reintegrar este doble carácter de la vida: desde el carácter termodinámicamente abierto, auto-organizado, no lineal, y crítico de los sistemas vivos, hasta los conflictos ecológicos y planetarios, donde se exige la inclusión de otras relaciones, procesos y relaciones no acotables al mundo natural.

Traer la complejidad de lo social y lo cultural como un tema de la vida, y llevar ésta al ámbito simbólico y material de lo cultural, exige una noción de biocomplejidad que pueda asumir el carácter político de toda abstracción, esto es, que la manera en que se modela la vida y la sociedad depende del lugar desde el que se estudia, vive, padece y explica la realidad biológica-social (Haraway, 1988). Es por esto que la biocomplejidad requiere una perspectiva crítica e histórica, con la cual podamos abrir debates no sólo sobre los modelos y sus adecuaciones empíricas, sino también sobre los fines y horizontes sociales donde se inscriben estos discursos (Kourany, 2003). Lo que se juega no es sólo la certeza de los modelos sobre los organismos, sino también la evaluación de los riesgos, la crítica de las violencias, y las implicaciones ecológicas de las biotecnologías (González Casanova, 2008).

Para poder hilar estas preguntas quiero situar mi investigación en términos de la biocomplejidad como objeto, como sujeto y, finalmente, como padecimiento, o con un analogía del cuerpo: el cuerpo objeto-biológico, el cuerpo-histórico-vivido, el cuerpo-padecido y el cuerpo-composta. En el cuerpo-objeto, la vida se inscribe en la taxonomía natural que establece partes y sistemas con marcos de partición propios de la biología, la física o la medicina. Con el cuerpo-sujeto, se abren las posibilidades de experiencias vitales en función de las marcas que los cuerpos adquieren en un entramado simbólico y material. El cuerpo-padecido enfatiza no sólo el carácter mortal, sino la experiencia que trastoca la neutralidad de una visión pasiva ante la vida y ante la muerte. Con estas distinciones quiero reiterar que toda biocomplejidad es un intento teórico y político por reconectar las separaciones perniciosas que las ciencias y tecnologías dominantes han implementado sobre los seres vivos del planeta. Y es que el prefijo *bios* indica también la mortalidad de lo viviente y con ello la responsabilidad respecto al valor de lo vivo y de lo muerto.

Uno de los primeros desafíos es el de clarificar mejor los términos: la complejidad remite a veces al objeto empírico, otras a una cualidad del mundo real que escapa a todo modelo y otras veces a los conocimientos novedosos para lidiar con las relaciones de lo real. Esta ambigüedad es propia del uso coloquial del término, y por ello en el siguiente apartado desarrollaré una primera caracterización de las teorías y discursos que suscriben un pensamiento o una ciencia de la complejidad.

#### LA BIOCOMPLEJIDAD EPISTÉMICA, ONTOLÓGICA Y TECNOLÓGICA

Mucho se ha hablado de la raíz griega que conforma la palabra complejidad: ésta proviene del término *complexus* que significa entrelazado, y se refiere a aquello que no puede recluirse ni definirse en sus partes aisladas. No se tiene que ser ex-

perto en complejidad para distinguirnos a nosotros mismos como objetos-sujetos complejos, tejidos en múltiples determinaciones: somos organismos multicelulares, materia, sujetos de una cultura, formas corporales, lenguajes específicos, etc. Sin embargo, si algo queda ambiguo en el uso coloquial de lo complejo como adjetivo y sustantivo, es la distinción entre lo epistemológico, o la manera en que conocemos el mundo y, por otro lado, lo que la realidad es, o sea, el tema ontológico.

Toda epistemología presupone ciertas ontologías y toma diferentes compromisos sobre el contenido de verdad de sus modelos o leyes. Por su parte, la ontología exige dar cuenta de cómo tenemos acceso a las entidades, procesos o estructuras de lo real. Aunque el nexo parece obvio, a lo largo del siglo XX se abrieron continuos debates entre la *forma* del conocimiento y el *contenido* del mismo (Rheinberger, 2010), de los cuales me importa recuperar dos posiciones: por un lado, aquella que identifica al conocimiento científico con lo real (realismo), y, por el otro, aquellas tesis que lo colocan como una construcción cultural, carente de un lugar privilegiado para un acceso a lo real (constructivismo).

La tensión tiene múltiples matices, y aunque es claro que una posición realista supone la posibilidad de conocer la realidad material, ella tendrá que dar cuenta de las críticas históricas que muestran que las verdades científicas sobre dicha realidad han cambiado con el tiempo, e incluso han sido incompatibles entre ellas (Ferraris, 2014); por su parte, una versión constructivista que afirma el carácter lingüístico e histórico de toda verdad, se verá también interpelada por las implicaciones políticas y ecológicas que puede traer consigo una posición escéptica en torno a los contenidos bioéticos, por ejemplo, relacionados con el cambio climático (Berger y Luckmann, 1968).

Desde diversas tradiciones de pensamiento occidental (humanianas, fenomenológicas o analíticas) se ha dado énfasis a las cuestiones epistemológicas y teóricas, manteniendo lo relacionado al ámbito ontológico en la marginalidad, o reduciéndolo a aspectos metafísicos donde la ciencia y la filosofía prefieren guardar silencio (Bhaskar, et al., 2010). Sin embargo, en las últimas décadas han emergido diversos esfuerzos por recuperar la cuestión ontológica, sin caer en realismos ingenuos o idealismos trascendentales. De hecho, como veremos más adelante, muchos de los discursos sobre complejidad buscan ubicarse en puntos medios entre una versión universalista y naturalista de la complejidad, y aquella que enfatiza los sesgos y constreñimientos culturales de toda ontología.

Traigo estas consideraciones filosóficas por la importancia que tienen para distinguir qué tipo de compromisos epistémicos y ontológicos asumen cada discurso sobre la complejidad de la vida y la sociedad, así como la manera en que recuperan o no, las críticas que se han hecho contra las identidades y las diferencias entre la realidad y su conocimiento (Dussel, 1999). Con estas categorías podemos entender mejor algunas de las definiciones que se han intentado hacer, por ejemplo, cuando se habla de complejidad descriptiva o epistémica (Van de Vijver, Van Speybroeck & Vandevyvere, 2003), relacionada a las múltiples maneras de describir un mismo fenómeno; complejidad ontológica (Mitchell, 2003), relacionada a la diversidad de

entidades y procesos que ocurren en lo real, o incluso complejidad tecnológica, que se refiere a las limitaciones técnicas de prever los efectos de alguna intervención (Sassen, 2014).

Así, cuando la complejidad explica una nueva manera de pensar los fenómenos, de incluir abstracciones otrora eliminadas, estamos ante una versión *epistémica* de la complejidad; si el énfasis se pone sobre las entidades y estructuras, así como en las aplicaciones intencionales, se afirma una versión *ontológica* de la complejidad la cual presupone que el carácter interconectado de nuestras abstracciones tienen un correlato con la realidad.

Estas relaciones entre conocimientos-realidad-técnicas, constituyen uno de los ejes más importantes de la discusión sobre la verdad, la validez y la factibilidad de los discursos sobre el mundo físico-biológico y las sociedades humanas (Habermas, 2002). La importancia de estas distinciones deriva de las implicaciones que tiene el postular, por ejemplo, la identidad entre un pensamiento racista, sexista o economicista con la realidad natural y social, es decir, se trata de un debate que se abre cuando queremos poner relaciones lineales y unívocas entre los contenidos de los conocimientos, la forma en que éstos se gestan, y los usos éticos que se hacen de ellos (Valadez and Guerrero, 2014).

Al agregar el prefijo 'bio' al sustantivo *complejidad*, estamos asumiendo compromisos en estos tres dominios: el epistémico, como formas de conocer la vida, el ontológico, como las entidades y procesos de lo vivo, y el técnico, como las posibilidades de intervención sobre lo vivo. El prefijo indica un modo de conocimiento, realidad y técnica, que comparten una diversidad de entidades y procesos vitales que incluyen la ontología de la cultura, los sujetos y las instituciones.

Bajo estas consideraciones propongo distinguir por lo menos tres nociones básicas de biocomplejidad, en función del tipo de compromisos y racionalidades que las soportan:

- i) biocomplejidad como una posición epistémica, es decir, como postulación de *modelos y explicaciones* que se hacen de los datos empíricos recabados por una diversidad de ciencias y saberes sobre la vida;
- ii) biocomplejidad como una tesis ontológica que enfatiza *el carácter interconectado, no lineal y fluido de las entidades y procesos* de la vida, incluyendo la vida humana y la sociedad.
- iii) biocomplejidad como *desafíos prácticos de solución* de problemas de la vida.

Cuando la biocomplejidad se colapsa en una noción biológica o física de la vida, se pierden de vista estas tensiones y diferencias que existen en torno a los conocimientos de lo vivo. Por ejemplo, muchos científicos asumen un compromiso débil con la realidad de sus modelos biológicos, sea un proceso evolutivo o bien un mecanismo molecular, y entran en conflicto con aquellos que postulan, por ejemplo, la irreductibilidad de los sistemas a sus partes o abstracciones (Winther, 2006). Otros sostienen que las metodologías empíricas que permiten dilucidar estructuras de la

naturaleza pueden resistir las intenciones y construcciones sociales de los modelos y con ello dar cuenta de estructuras invariantes de lo real (Giere, 2004).

Entre la epistemología, la ontología y la técnica sobre la vida, la biocomplejidad se expresa de manera diferente, ya sea como nuevos modelos y explicaciones empíricas, como superación de dicotomías naturaleza-cultura, objeto-sujeto, y como desafío político en conflictos de intervenciones científicas. Un rasgo característico de estos momentos es que la biocomplejidad nace ante algún tipo de crisis, de insuficiencia o negatividad: crisis de los modelos reduccionistas y explicaciones hiperidealizadas, dificultades de los presupuestos dicotómicos sobre la realidad de los seres vivos culturales como nuestra especie o recesión de los modelos de intervención que violentan o excluyen las voces de todos los involucrados.

Al igual que los discursos generales sobre complejidad, la biocomplejidad es entonces una respuesta que quiere superar estas insuficiencias o crisis, y dar alternativas para una comprensión de la vida, más allá de las categorías y modelos de una sola disciplina. En el siguiente apartado ubico estas respuestas en dos grandes movimientos: uno que responde a una crisis general de los presupuestos de la razón moderna, y otro que responde a la crisis de los reduccionismos epistémicos y ontológicos en la física y la biología.

#### LA BIOCOPLEJIDAD: ENTRE LA CRÍTICA A LA RAZÓN MODERNA Y LA EMERGENCIA DE MODELOS NO IDEALIZADOS

Decía Platón que para la creación de una República uno de los pasos fundamentales era plantear una mitología fundacional, es decir, legitimar el nuevo orden a los nuevos ciudadanos, en su caso a los niños, con una nueva poesía y mitología que superara la cosmogonía anterior. Se trataba de una *paideia*, es decir, de una cultura que requiere ser educada e institucionalizada. De manera análoga, considero que hoy vemos gestarse una narrativa fundacional para la República de las Ciencias de la Complejidad, una que parte del reconocimiento de una realidad y diversidad físico, biológica y social que no había podido ser explicada o intervenida con las metodologías, principios y categorías de las ciencias reduccionistas (Laughlin, et al., 2000). La complejidad sería, de este modo, un nuevo orden. Pero, ¿cuál es la novedad histórica e institucional de la complejidad y de sus ciencias?, ¿qué nuevos principios se juegan y qué crisis pretenden superarse?

En el apartado anterior he mostrado que una desambiguación del término biocomplejidad pasa por distinguir sus supuestos epistémicos, ontológicos y tecnológicos. En este apartado quiero hacer una interpretación crítica de las diversas narrativas en torno a la complejidad. Considero que pese a su carácter polisémico es posible diferenciar por lo menos dos trayectorias científicas sobre la complejidad: una que la concibe en sentido amplio (a), y cuya explicación plantea una revolución en diversas tradiciones filosóficas, y otra que puede situarse en el marco de las así llamadas ciencias de la complejidad (b), las cuales recuperan una narrativa más centrada en los descubrimientos y avances científicos no reduccionistas.

### a) Complejidad en sentido amplio

Los discursos sobre complejidad en sentido amplio tienen en común que nacen como una respuesta a la crisis de la razón moderna, misma que se plantea en varios sentidos: a) como una insuficiencia explicativa del método analítico sobre los sistemas complejos de lo real-natural, b) una reificación de la ontología que el mecanicismo postuló sobre el mundo, c) la ideología dualista que puso a la naturaleza-cuerpo al servicio del capitalismo industrial, y d) como un modelo cultural y de civilización donde se instituye y estructura la capitalización de la naturaleza y la vida humana en pos del modelo económico y político de la modernidad. Este tipo de discursos no suelen partir de problemas o fenómenos específicos a resolver o explicar, sino que integran estas insuficiencias en una crítica general a los paradigmas, estilos de vida y *modus vivendi*. Sus horizontes y estrategias también son amplios y generales, es decir, postulan la necesidad y viabilidad de una transformación de sistemas conceptuales o prácticos, tanto en las metodologías científicas como en las relaciones entre la ciencia y la sociedad.

Debido a esta pretensión y esta perspectiva tan amplia, las mediaciones y estrategias para formular sus críticas y establecer algunas alternativas suelen ser opacas, muy diversas y en algunos casos divergentes.

En estos discursos podemos ubicar a dos perspectivas relevantes: la de Edgar Morin y la de Levins-Lewontin. Para Morin la complejidad es una apuesta para la gestación transdisciplinaria de una nueva racionalidad que supere el racionalismo dicotómico, aquel que quiso evadir lo contingente, los conflictos y las diversidades (Morin, 1998).

Por su parte, Levins y Lewontin apuestan a un enfoque dialéctico general frente a la realidad, donde las abstracciones deben verse como históricamente contingentes, y donde el conflicto y la contradicción deben ser re-situados no sólo en términos de nuevas categorías o metodologías epistemológicas, sino también en la lucha por superar, en una lucha social, las contradicciones ontológicas de la sociedad, como lo es la que existe entre el capital y el trabajo (Lewontin and Levins, 2007).

Los sistemas biológicos y sociales forman parte medular de ambas visiones, pero sólo en el caso de Levins y Lewontin adquieren contenidos precisos en ejemplos paradigmáticos como la constitución de nichos ecológicos donde existe una relación dialéctica entre el ambiente y el organismo (Oyama, Griffiths & Gray, 2003).

En función de la visión de estos autores, podemos afirmar que los planteamientos generales oscilan entre una complejidad metodológica, que apela a nuevas condiciones epistémicas para una nueva ontología (E. Morin), y aquellos que formulan una complejidad dialéctica, donde la comprensión se articula con la transformación de las condiciones sociales donde se gesta el conocimiento científico (Levins-Lewontin).

El horizonte explicativo y técnico de la complejidad en sentido amplio se plantea como una comprensión de las propiedades de los sistemas naturales y sociales, en tanto procesos cuantitativo-cualitativos, los cuales se encuentran en constante movimiento y donde las totalidades-sistemas y partes-subdominios-niveles, no

tienen una frontera ontológicamente discernible. Para alcanzar este horizonte se formulan una serie de conceptos y metodologías que intentan superar, de manera crítica, las diversas dicotomías, al reconocer la anterioridad epistémica del mundo intersubjetivo: “nuestra cultura habla en nosotros”, y al mismo tiempo reconocer la preeminencia ontológica de nuestra naturaleza compleja: “nuestra vida es condición de posibilidad de toda cultura”. Se busca con esto superar los falsos dualismos, dicotomías, dilemas o disyunciones que el pensamiento idealizó: todo-parte, sujeto-objeto, orden-caos, naturaleza-cultura, normal-patológico, razón-emoción, entre otros.

En resumen, podemos decir que el discurso amplio sobre la complejidad parte de un posicionamiento crítico de los modos generales de vida-pensamiento de la modernidad (Morin) capitalista (Levins), y a partir de esta crítica postula la necesidad de una transformación o reformulación estructural de la razón, la ciencia moderna y la civilización que emanan de ellos.

### b) Complejidad como ciencias de la complejidad

Por su parte, las ciencias de la complejidad representan lo que denomino complejidad en sentido formal. En su genealogía, estas ciencias se inscriben en un horizonte de explicación de problemas físicos, biológicos y sociales, donde se pone en consideración no sólo las relaciones entre partes (propias de esquemas mecanicistas), sino también las relaciones y procesos no lineales entre los sistemas y sus partes. En estas ciencias se incorporan también críticas y planteamientos generales a la ciencia moderna, pero sus puntos de partida suelen ser las ciencias formales y físicas, y su relación con teorías más generales como la cibernética, la teoría de sistemas, las dinámicas no lineales, entre otras (Martínez-Mekler y Cocho, 1998).

El punto de partida de estas ciencias es la incapacidad de los reduccionismos metodológicos, epistemológicos y ontológicos para explicar y modelar las propiedades emergentes de los sistemas físicos, biológicos y sociales y sus interacciones (Atlan, 1993). De aquí que estas ciencias se proponen no sólo formular una crítica, sino diseñar nuevos modelos, categorías y metodologías empíricas que expliquen los principios, mecanismos o causas de los comportamientos sistémicos de la naturaleza y la sociedad. Aquí podemos ubicar los estudios sobre sistemas complejos en la física, sobre los sistemas en desarrollo en la biología, o los sistemas auto-poieticos en la sociología.

La categoría central es la de sistema complejo, la cual se plantea a veces confusamente como una nueva perspectiva epistémica, descriptiva de los sistemas físicos, biológicos y sociales, o bien como una nueva ontología revelada por la superación de las idealizaciones reduccionistas basadas en sistemas de pocos cuerpos o relaciones (Mitchell, 2011).

Y aunque la complejidad y su explicación adquiere diferentes significados para las ciencias físicas y biológicas, las tesis empíricas suelen coincidir en la física de los sistemas complejos y los estudios sobre dinámicas no lineales en matemáticas, tanto para sistemas biológicos (Kauffman, 1990), como sociales (Wallerstein, 2005).

De hecho, la exigencia de modelos formales-computacionales en la física y en las matemáticas pareciera haberse extrapolado a muchas áreas de las ciencias de la complejidad, a tal punto que difícilmente podrían entenderse estas ciencias sin ese aparato formal que se ha construido en los últimos años.

Pienso sobre todo en la biología sistémica y teórica, las cuales han incorporado estos formalismos o categorías de la física y las matemáticas, ya sea como metodologías y técnicas de investigación que amplían las escalas de las investigaciones moleculares (por ejemplo los modelos de redes complejas), o bien como aparatos formales que permiten comprender los procesos auto-organizativos y estructurales de los sistemas vivos (redes booleanas, atractores, etc.) (Barabási and Oltvai, 2004; Goodwin, 2001).

A diferencia de las perspectivas generales, las ciencias de la complejidad no nacen como crítica de procesos o dinámicas históricas, sino más bien a partir del estudio de propiedades o procesos sistémicos que no habían podido ser comprendidos con las metodologías centradas en el análisis y las relaciones mecanicistas-lineales entre partes.

### c) La biocomplejidad: desafío empírico e histórico

La biocomplejidad puede a su vez abordarse desde ambas perspectivas: en la versión ampliada la vida sería el ejemplo paradigmático del modo en que la razón moderna de corte capitalista ordenó el mundo vivo en función de recursos por extraer, explotar, mercantilizar (Leff, 2004). Por el otro lado, tendríamos una biocomplejidad que busca expresarse en modelos formales y semiformales que recuperen la apertura termodinámica, la auto-organización, las propiedades emergentes y los diversos niveles de organización que los sistemas biológicos reproducen (Mitchell, 2003).

La biocomplejidad situada entre estos horizontes de investigación quiere evitar dos extremos perniciosos del discurso en torno a los sistemas vivos: 1) el excepcionalismo humano que puede suponerse en nuestras perspectivas de estudio para justificar o explicar nuestra jerarquía, y poder, sobre alteridades “no-humanas” que comparten el planeta con nuestra especie, con lo cual, por ejemplo, podríamos capitalizar a la “naturaleza” como mero recurso económico (Haraway, 2016); y 2) alejarse de un naturalismo ingenuo que aplanan las ontologías y borra las diferencias de mundos que existen entre los cuerpos y pueblos que habitan ecosistemas, en aras de mostrar una visión más objetiva y descriptiva de lo que ocurre (Tsing, 2015).

Si las ciencias biológicas se han encargado de entender la ontología de los seres vivos, la biocomplejidad, en la versión formal, está más cercana de los contenidos de la medicina y de la biomedicina: no es sólo la complejidad de lo normal, sino de las continuas anomalías y padecimientos de cuerpos en contextos contradictorios o violentos. Desde enfermedades complejas hasta la complejidad ecológica del calentamiento global, la biocomplejidad incluye ontologías dependientes de situaciones, pero también de marcas corporales, de contenidos singulares: no es lo



mismo tener cáncer de mama a los 30 años y en Sierra Leona, que en Noruega o en algún país de alto desarrollo humano; no es lo mismo padecer de cambio climático habitando las zonas sin acceso al agua potable que desde los territorios abastecidos de todas las tecnologías de la comodidad. La biocomplejidad lidia entonces con procesos generales, invariantes a una diversidad de condiciones, pero en su estrecha tensión con los procesos y condiciones singulares. La enfermedad no es sólo la anomalía fisiológica, sino también el rasgo biológico de la injusticia estructural, no es el acaecimiento de una naturaleza depredadora sobre los cuerpos, sino la diversidad de luchas contradictorias por habitar el planeta desde diversas jerarquías corporales (en la dinámica de los sistemas bioculturales no es lo mismo ser blanco que negro, niño que adulto, obeso que delgado). La biocomplejidad exige posicionamientos éticos y políticos frente a las crisis, con preguntas del tipo: ¿cuáles son las mejores explicaciones?, ¿cuáles las mejores propuestas para resolver padecimientos planetarios? Si las ciencias de la naturaleza pretendían eludir la polémica de lo cultural y abocarse sólo a conocimientos *de hecho*, separados de toda discusión normativa, la biocomplejidad exige superar la distinción entre juicio de valor y juicio de hecho, sobre todo cuando el conocimiento se remite al sufrimiento o a la violencia, cuanto lo que se quiere modelar son naturalezas-culturas gobernadas por la lógica de la explotación y extracción de ganancias de la vida humana y no humana (Faden and Shebaya, 2016; Giere, 1993).

Biocomplejidad indica así el carácter polémico, conflictivo, irresoluto de la vida, pero además es el desbordamiento del río ontológico con respecto a los límites disciplinares y naturalistas.

Una metáfora que permite entender mejor la ontología de la biocomplejidad es la del cyborg, categoría propuesta por D. Haraway (1991) en su célebre *Manifiesto cyborg*. La idea fundamental es que el cyborg es una figura de la ciencia ficción que plantea seres que son mitad máquinas, mitad organismos, y que constituyen las nuevas formas de escenarios futuristas; de manera análoga, la ontología de la ciencia de la vida debe lidiar cada vez más con una naturaleza cyborg, esto es, con seres vivos-transformados culturalmente, seres que aún sin ser humanos han sido alterados en sus relaciones con nuestra especie.<sup>1</sup> La vida ya no puede ser analizada sólo como parte de una historia evolutiva natural, no-antropogénica, porque el planeta entero ha sido transformado e intervenido a tal grado que la vida ya tiene la marca de procesos emanados de modelos dominantes de civilización. La biocomplejidad debe lidiar entonces con seres vivos que han sido marcados por las culturas, y con culturas que forman parte de redes ecológicas: desde la biota que habita los cuerpos de nuestra especie, hasta las relaciones de co-domesticación con otras especies como el caballo, el perro o el maíz (Moore, 2016).

La propuesta de Haraway es una mirada feminista que quiere recuperar las críticas del constructivismo epistemológico, cuando éste critica los sesgos y abu-

<sup>1</sup> Para Haraway el cyborg es una especie de mito que busca evadir la síntesis de una dicotomía y más bien afirmar la multiplicidad que ella genera. Somos máquinas, constructos, y al mismo tiempo somos también organismos, objetos vivos. Somos cyborg y esta palabra no define, sino problematiza y cuestiona las fronteras de aquellos discursos, incluso los feministas, que buscan reivindicar algún tipo de naturaleza o unidad perdida.

sos de los conocimientos y tecnologías dominantes, pero también quiere plantear una aproximación empírica y científica de la complejidad de la vida, que pueda ser estudiada, explicada y aplicada en luchas y transformaciones más justas e igualitarias. Se trata de una perspectiva que, sin ponerse esta bandera de complejidad, puede ya plantear el desafío de la vida como contenido diverso y polémico de la transdisciplina.

Esta visión polémica y situada de la vida, que incluye a su dimensión socio-histórica, se convierte en el territorio por antonomasia de la complejidad en sentido histórico, i.e. la cultura en el entramado de la vida; y la que se acota al sentido formal de los modelos de los sistemas complejos: la filogenia, la ontogenia y la ecología de los organismos. Pero el encuentro de ambas complejidades no nace de la curiosidad epistémica, sino del derrumbe de diversas dicotomías sobre el contenido de la vida. En el último apartado contrastaré algunas de estas distinciones sobre un caso ejemplar: la biocomplejidad del cáncer.

#### LA BIOCOMPLEJIDAD COMO CRÍTICA Y HORIZONTE DE TRANSFORMACIÓN

Hasta ahora he hablado de la complejidad en términos muy abstractos. Como objeto asociado a entidades y procesos reales, como conocimiento asociado a modelos y discursos generales. Siguiendo la analogía, hasta ahora podríamos hablar de la biocomplejidad del cuerpo objeto, y cómo ésta se relaciona con un sujeto encarnado, es decir, con el cuerpo que somos también. Pero esta biocomplejidad pareciera estudiarse o explicarse como una realidad natural, poco cercana a las contradicciones mundanas en que nos movemos las personas y cuerpos concretos.

¿Dónde empieza y termina la biocomplejidad?, ¿cómo se delimitan sus causalidades y sus impactos locales y globales? La dificultad metodológica para responder estas preguntas indica ya que la ontología de la biocomplejidad es difusa, y su epistemología exige no sólo datos y modelos cuantitativos, sino metodologías que puedan diferenciar la red de nichos ecológicos y políticos habitados y padecidos. La biocomplejidad plantea al menos dos desafíos metodológicos: el primero es el de poner al nicho académico como parte de la red de entidades y procesos, lo que implica no sólo un diálogo entre disciplinas al interior del campo universitario, sino una interacción con saberes y prácticas sobre la vida, que se gestan y desarrollan en otras racionalidades y perspectivas.

Traer a la biocomplejidad los temas ecológicos, políticos y económicos, requiere desocultar y criticar los excesos tanto de las versiones naturalistas, como de las constructivistas que quieren dar cuenta de la complejidad de la vida. La biocomplejidad incluye al sujeto de investigación y, por lo tanto, quita el lugar idealizado del sujeto universal sin cuerpo y sin historia que podría fundamentar una versión segura del mundo objetivo (Haraway, 1988). Bajo esta consideración metodológica, la ética del trabajo académico no es reducible al buen gesto del académico comprometido con el ambiente o con su sociedad, sino como una responsabilidad primordial, desde la cual emana la crítica a la violencia de los dualismos entre sujeto y

objeto, teoría y práctica, conocimiento básico y aplicado, explicar e intervenir, racionalidad epistémica y racionalidad estratégica, entre otros.

A manera de ejemplo, en los siguientes apartados me pondré a mí mismo y mi historia como un punto de partida y un espacio de preguntas que recorren el sentido de la biocomplejidad en una etapa histórica como la que estamos. Se trata entonces de traer no sólo el cuerpo objeto y el cuerpo-vivido, sino las inquietudes, las dudas y las vicisitudes que inspiran el trabajo de comprensión de nuestras propias vidas.

### a) Ciencias de la biocomplejidad: de la curiosidad al compromiso académico

Hace varios años, cuando estudiaba la carrera de Investigación Biomédica Básica, la educación que recibía se basaba en el éxito que ha tenido la biología molecular para explicar muchos de los mecanismos que subyacen en los fenómenos biológicos. La célula era el gran todo que teníamos que explicar, y las partes moleculares eran casi infinitas, y con intrincadas redes de interacción, regulación y transformación.

El problema celular era tan basto que el programa de mi carrera ya no incluía temas de evolución, ni mucho menos problemas sociales. Eran los principios del siglo XXI y en el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM se vivía con fuerza el paradigma celular y molecular no sólo de la célula, sino de los organismos y de las enfermedades. La complejidad se expresaba como desafíos técnicos, computacionales: ¿cómo realizar experimentos moleculares en escalas genómicas?, ¿cómo modelar la interacción de miles de moléculas, de cinéticas de reacción, de procesos biomecánicos, que nos permitieran entender el funcionamiento de la célula?

Era tal la importancia del conocimiento celular que los libros de patología de ese entonces planteaban las enfermedades, en última instancia, como alteraciones en las dinámicas celulares, esto es: hiperplasias, neoplasias, displasias y metaplasias; es decir, modificaciones en los ciclos celulares, los procesos de diferenciación y las respuestas celulares (Kumar, Fausto & Abbas, 2004).

Mi reacción ante esta educación centrada en las bases moleculares de la vida fue casi inmediatamente de rechazo. No tenía que ser experto para intuir que la visión genética y celular de los organismos era un reduccionismo difícil de sostener ante la complejidad de los procesos supracelulares (Hanahan and Weinberg, 2000). Aunado a esto, si la biomedicina pretendía ser la explicación científica de las enfermedades, entonces era evidente que faltaba la realidad social de los pacientes, es decir, los ambientes y contextos donde las enfermedades cobraban su realidad.

Aunque mi vocación científica se había inspirado de las narrativas de descubrimientos médicos, como el de Pasteur y otros referentes biomédicos, éstas se veían contrastadas con las experiencias que se vivían en los institutos de Investigaciones Biomédicas, en el de Fisiología Celular y en la Facultad de Medicina de la UNAM, donde las preguntas científicas difícilmente provenían de una realidad social y

testimonial, de los niños enfermos de rabia, cáncer o cólera, sino de contribuciones abstractas a los conocimientos especializados de cada disciplina: la necesidad social se había abstraído, dejando a la ciencia como una pregunta básica, no preocupada por su aplicación.

Por diversos motivos, intelectuales y autobiográficos, mi pregunta comenzó a dirigirse hacia la complejidad del cáncer. Por ello, siguiendo mis intuiciones y aprovechando las grietas institucionales, pude salirme de los enfoques biomédicos e irme hacia otros espacios de formación académica. En primer lugar me fui al Instituto de Ecología de la UNAM, en un intento por recuperar el ambiente en mis modelos sobre el cáncer, si bien la perspectiva ecológica no se aterrizó en mi investigación, sí fue el tiempo donde mis presupuestos sobre la ciencia se vieron cimbrados ante un espacio de investigación biológica, y la pregunta histórica y evolutiva no podía soslayarse. Al siguiente año me introduje más formalmente en la biología matemática, en específico, en redes complejas (que en ese entonces eran el gran *boom* en los modelos), donde la interacción molecular no tenía que seguir un proceso heterorganizativo, sino que seguía reglas y estructuras de interacción universales (redes libres de escala) (Barabási and Oltvai, 2004). Fue en este periodo que comencé a recuperar las visiones estructuralistas de D'Arcy Thompson (Miramontes y Gutiérrez, 2002), Goodwin (2001), Waddington (1968) y, por supuesto, de Germinal Cocho (2017), con los cuales el problema de la vida no tenía que ser reducido a mecanismos moleculares intracelulares, sino también a principios de auto-organización colectiva, como sistemas abiertos y con dinámicas no lineales. Pasé del circuito integrado de la célula, a la red compleja de la expresión genómica; de los procesos guiados unidireccionalmente del DNA a una visión dialéctica de la relación entre organismos y ambiente; de las causas lineales a los sistemas dinámicos, es decir, la complejidad se tradujo como una ontología ampliada a otros niveles de organización, una epistemología estructuralista (no centrada en caracterización del mecanismo) y, finalmente, en una visión más sistémica de las propiedades de los sistemas biológicos y sociales.

El cáncer dejaba de ser un proceso genético causado por la mutación de uno o más genes, y se volvía mejor un proceso ontogénico, es decir, la continua transformación de los tejidos por procesos genéticos, pero también biomecánicos y bioquímicos (como el de tensegridad celular) (Valadez, 2018). La visión dialéctica de la complejidad me permitía abrir mis horizontes hacia los estudios sobre evo-devo, o la evolución de las formas y desarrollos de los organismos.

Bajo este paradigma el cáncer podía ser descrito como una enfermedad compleja; en primer lugar, por ser un proceso celular e histológico de dinámicas en tensión y carentes de controles unidireccionales, y, en segundo lugar, por la diversidad de factores ambientales no descritos bajo un enfoque disciplinar (Valadez, 2016).

En los últimos diez años he sido testigo del crecimiento de este enfoque sistémico, no sólo en el campo de la biomedicina y la física, sino también en estudios sobre los sistemas sociales y civilizatorios. Sin embargo, también he sido testigo del nacimiento de tensiones interdisciplinarias sobre la pertinencia y alcance de los nuevos

modelos para sustituir o, en su caso, para extender los modelos reduccionistas: ¿cuáles son los principales cambios en los modelos y las explicaciones?, ¿cómo las ciencias de la complejidad pueden ayudar a generar explicaciones y salidas alternativas? Estas preguntas me hicieron dirigir mi investigación, no sólo a los datos de los modelos, sino a sus supuestos epistémicos y ontológicos, pero sobre todo a los fines ocultos de su sentido social e histórico. Las ciencias del cáncer llevaban ya la marca de una visión de los cuerpos humanos y no humanos, de las interacciones sociales, y de la manera de intervenir sobre los ambientes.

### b) De lo singular a lo genérico: la biocomplejidad como contenido de la transdisciplina

¿Cómo articular los contenidos cuasi universales de una ciencia de la complejidad, los detalles ultraspecializados de las ciencias moleculares, y agregar los sesgos y las estructuras sociales donde los conocimientos se gestan? Estas preguntas me sitúan en el campo filosófico, pero también en el campo de mundos de la vida, es decir, de contextos específicos donde la complejidad debe traducirse.

Es en la crítica de los supuestos del conocimiento científico donde la complejidad adquiere su verdadera dimensión revolucionaria: comienza a volverse una voluntad de cambio en la manera de modelar e intervenir sobre la vida. En mi caso, pueden ubicarse al menos cuatro momentos de este giro hacia lo complejo: el primero fue reconocer que mis preguntas científicas y biomédicas tenían que ver con un ejercicio de autocomprensión de mi propia corporalidad, y con ello de los sujetos encarnados que son el contenido de toda medicina. El segundo momento era el de reconocer que la complejidad no sólo estaba guiada por la pregunta biológica, sino por la responsabilidad ética, una empatía radical con el afectado de alguna crisis, la necesidad de una respuesta ante el padecimiento del cáncer. En un tercer momento me fui clarificando que la complejidad que me interesaba tenía que ver también con mi vocación transformadora, con un querer incidir en los desafíos de mi mundo inmediato contradictorio, y no ser sólo la hormiguita académica que es aplastada por las estructuras civilizatorias. Sufrir la violencia de la pobreza, de la represión, padecer la deficiencia de los sistemas de salud, iba nutriendo mi propio aparato crítico. Poco a poco me fui situando en mi propia pregunta, de tal modo que no era ya sólo la pregunta interesante sobre el cáncer, sino una pregunta cercana y relacionada con el tejido de naturalezas y culturas que conforman un objeto, y muchos sujetos que el cáncer evoca. Los discursos generales sobre complejidad, no están separados de este tipo de historias, sino que se nutren de un continuo movimiento al interior de los campos disciplinares.

LA BIOCOMPLEJIDAD Y LA TRANSDISCIPLINA:  
RESPONSABILIDAD, CRÍTICA Y ALTERNATIVAS  
CONTRA LA CRISIS PLANETARIA

La biocomplejidad es un conflicto continuo sobre nuestro conocer y nuestro experimentar la vida. Nace desde las ruinas de expectativas fallidas, de promesas incumplidas, y de amenazas crecientes respecto a nuestras vidas y de otros seres, no sólo de límites cognitivos. La biocomplejidad emerge entre muros disciplinares derrumbados de la caída de ontologías y epistemologías, de la necesidad de respuestas y soluciones, finalmente de la guerra por la facticidad, por el qué hacer sobre problemas concretos.

Tanto la complejidad en sentido histórico, como la formal, convergen en la necesidad de incluir una visión dialéctica o relacional sobre las propiedades de los sistemas vivos, así como en la incorporación de las contingencias, los contextos y las especificidades que las generalidades han abstraído. En este sentido, se trata de una convergencia en generalidades que se bifurca en especificidades y en desafíos situados, como el del cáncer, o el de la relación entre naturalezas y culturas.

Un problema como el cáncer refleja bien este encuentro de múltiples visiones sobre los organismos multicelulares, sobre las relaciones ecológicas y sociales, así como las diversas ingenierías de intervención biomédica. El cáncer expresa una biocomplejidad que puede entenderse justo como un contenido fluido que va atravesando diversos campos disciplinares, diversas miradas, y diversos sentidos, pero que al final parece regresar siempre a la responsabilidad ética para con la mortalidad de los cuerpos, es decir, al cuerpo que lo padece. Esta fluidez y evanescencia del contenido exige un recurso transdisciplinario: abrir las fronteras o enfrentar los conflictos que impiden, por ejemplo, reconocer el carácter económico y político de la complejidad del cáncer, asociado no sólo a las políticas de intervención, sino a la expansión de estilos de vida y de transformaciones perniciosas sobre los ecosistemas.

La responsabilidad es quizás el elemento más transdisciplinario de la biocomplejidad, porque es quien impulsa, y nos hace llevar los contenidos vitales a los diversos campos de investigación e intervención, para recuperar y evaluar aquellas mediaciones que permitan dignificar la vida de los afectados. Sin esta responsabilidad, y sin la crítica continua de los discursos y prácticas sobre la complejidad biológica o social, se corre el riesgo de instituir nuevas formas de pensamiento que ocultan, justifican o naturalizan las contradicciones que son producidas socialmente, o lo que teóricos como Boaventura de Sousa (2009) llaman epistemologías de la ceguera, ocultamientos violentos. En este sentido la biocomplejidad es un contenido que exige también un pensamiento crítico<sup>2</sup> y activo contra la violencia que

---

<sup>2</sup> Considero necesario comenzar a usar adjetivos que nos permitan distinguir el tipo de ciencias que estamos pretendiendo construir, en específico: propongo que defendamos una complejidad crítica y responsable, una complejidad que asume una apertura hacia la diferencia, porque nace, en nuestro caso, del reconocimiento que nosotros somos los otros de un discurso dominante, global, un discurso que pretende decir cómo debemos vivir, pensar, sentir nuestro cuerpo, o lo que teóricos como Foucault han llamado el biopoder.

producen los diversos conocimientos y tecnologías que quieren controlar o administrar la vida humana y no humana. Pero también es un discurso que quiere ser positividad, esto es, la biocomplejidad frente a las crisis de los modelos de conocimiento y tecnología dominantes es también una respuesta para construir alternativas, para gestar una forma ética, no antropocéntrica, pero factible de convivir en este planeta finito (Valadez, 2015).

Este plano de la factibilidad de alternativas frente a las amenazas y las violencias contra la vida en el planeta, nos permite recordar que la biocomplejidad, como contenido de una estrategia transdisciplinaria, implica también una diversidad de actores y racionalidades no reducibles a la racionalidad epistémica, sino que abarca también una racionalidad técnica que requiere una habilidad para construir e implementar mediaciones, estratégica, que sepa moverse en territorios en disputa, y, por supuesto, una racionalidad prudencial que permita consensuar en las diferentes voces y cuerpos que conforman el mundo vivo (Casanueva, 2011).

En resumen, la biocomplejidad puede entenderse como contenidos vitales que han cimbrado mundos simbólicos y materiales, territorios definidos y gobernados por disciplinas. Bajo esta perspectiva, la biocomplejidad es la ontología padecida y multifacética de la vida, una continua ruptura con las fronteras disciplinares, y un campo de conflictos de vida por resolver. Incluir en el tema de la vida la forma social e histórica hace que la biocomplejidad deje de ser sólo la vida natural para volverse la vida cotidiana, deja de ser sólo la biología de otros seres, para volverse la biomedicina de los padecimientos; deja de ser una mirada neutral de la vida, para volverse una lucha política por la inclusión de los afectados. La transdisciplina es la red por donde la biocomplejidad puede entenderse, es la forma plural en que el contenido de la vida puede cuidarse de una manera más responsable.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Atlan, H., 1993. *Enlightenment to Enlightenment: Intercritique of Science and Myth*. Translated from the French by L. J. Schramm. Albany: State University of New York Press.
- Barabási, A.L. & Oltvai, Z.N., 2004. Network biology: understanding the cell's functional organization. *Nat Rev Genet*, 5(2), pp.101–113. doi:10.1038/nrg1272.
- Berger, P.L. y Luckmann, T., 1968. *La construcción social de la realidad*. Buenos Aires: Amorrortu.
- Bhaskar, R., Frank, C., Høyer, K.G., Naess, P. & Parker, J. (eds.), 2010. *Interdisciplinarity and Climate Change: Transforming Knowledge and Practice for Our Global Future*. London: Routledge.
- Casanueva, M., 2011. Tres aspectos de la racionalidad científica. En: Pérez Ransanz, A.R., Velasco Gómez, A. (coords.), *Racionalidad en ciencia y tecnología: nuevas perspectivas iberoamericanas*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. pp.109–118.
- Cocho, G., 2017. *Ciencia-Humanismo-Sociedad. De los sistemas complejos a la imaginación heterodoxa*. [e-book] CDMX: CopIt-arXives y EditoraC3. Disponible en el sitio: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>
- Dussel, E.D., 1999. *Posmodernidad y transmodernidad: diálogos con la filosofía de Gianni Vattimo*. Puebla: Universidad Iberoamericana, Plantel Golfo Centro / ITESO.

- Emmeche, C., 1997. Aspects of complexity in life and science. *J. Philos.*, 59, pp.41–68.
- Érdi, P., 2008. *Complexity Explained*. Berlin: Springer Verlag.
- Faden, R. and Shebaya, S., 2016. Public Health Ethics. In: Zalta, E.N. (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. [online] Disponible en: <https://plato.stanford.edu/entries/publichealth-ethics/> [consultado: 4.octubre.2018].
- Ferraris, M., 2014. *Manifesto of New Realism*. Translated by Sarah De Sanctis; foreword by Graham Harman. Albany: State University of New York Press.
- Giere, R.N., 1993. Science and Technology Studies: Prospects for an Enlightened Postmodern Synthesis. *Sci. Technol. & Hum. Values*, 18, pp.102–112.
- Giere, R.N., 2004. How Models Are Used to Represent Reality. *Philos. Sci.*, 71, pp.742–752.
- González Casanova, P., 2008. El capitalismo organizado: Entre el orden y el caos. *Desacatos*, 28, pp.165–172. doi:10.29340/28.527.
- Goodwin, B., 2001. *How the leopard changed its spots. The evolution of complexity*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Habermas, J., 2002. *Verdad y justificación: Ensayos filosóficos*. Madrid: Trotta.
- Hanahan, D. & Weinberg, R. A., 2000. The hallmarks of cancer. *Cell*, 100(1), pp.57–70.
- Haraway, D., 1988. Situated Knowledges: The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective. *Fem. Stud.*, 14(3), pp.575–599. doi:10.2307/3178066.
- Haraway, D., 1991. *Simians, Cyborgs, and Women: The Reinvention of Nature*. New York: Routledge.
- Haraway, D.J., 2016. *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene*. Durham: Duke University Press Books.
- Kauffman, S.A., 1990. The Sciences of Complexity and “Origins of Order.” *PSA Proc. Bienn. Meet. Philos. Sci. Assoc.*, 1990(2), pp.299–322.
- Kauffman, S., 1996. *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford University Press.
- Kourany, J.A., 2003. A philosophy of science for the twenty-first century. *Philos. Sci.*, 70(1), pp.1–14.
- Kumar, V., Fausto, N. & Abbas, A., 2004. *Robbins & Cotran Pathologic Basis of Disease*. 7th ed. Saunders.
- Laughlin, R.B., Pines, D., Schmalian, J., Stojkovic, B.P. & Wolynes, P., 2000. The middle way. *PNAS*, 97(1), pp.32–37.
- Leff, E., 2004. *Racionalidad ambiental. La rapropiación social de la naturaleza*. México: Siglo XXI Editores.
- Lewontin, R. and Levins, R., 2007. *Biology Under the Influence: Dialectical Essays on Ecology, Agriculture, and Health*. New York: Monthly Review Press.
- Martínez-Mekler, G. y Cocho, G., 1998. Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad. En: De la Peña, L. (coord.), *Ciencias de la materia: Génesis y evolución de sus conceptos fundamentales*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI.
- Merleau-Ponty, M. and Cabanes, J., 1997. *Fenomenología de la percepción*. Barcelona: Ediciones Península.
- Miramontes, P. y Gutiérrez, J.L., 2002. El origen de las formas vivas: de Geoffroy Saint-Hilaire a D’Arcy Thompson. En: Sánchez, F., Miramontes, P. y Gutiérrez, J. L. (co-ords.), 2002. *Clásicos de la biología matemática*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI.
- Mitchell, S.D., 2003. *Biological Complexity and Integrative Pluralism*. Cambridge University Press.



- Mitchell, M., 2011. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.
- Moore, J.W. (ed), 2016. *Anthropocene or Capitalocene?: Nature, History, and the Crisis of Capitalism*. Oakland: PM Press.
- Morin, E., 1998. *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona: Gedisa.
- Oyama, S., Griffiths, P.E. & Gray, R.D. (eds.), 2003. *Cycles of Contingency: Developmental Systems and Evolution*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Rheinberger, H.-J., 2010. *An Epistemology of the Concrete: Twentieth-Century Histories of Life*. Durham: Duke University Press Books.
- Sassen, S., 2014. *Expulsions: Brutality and Complexity in the Global Economy*, Cambridge, MA: Belknap Press.
- Sousa Santos, B. de, 2009. *Una epistemología del sur: la reinención del conocimiento y la emancipación social*. México: CLACSO y Siglo XXI.
- Tsing, A.L., 2015. *The Mushroom at the End of the World: On the Possibility of Life in Capitalist Ruins*. Princeton University Press.
- Valadez Blanco, E.O., 2015. *Complejidad y transdisciplinariedad: teoría y práctica del cáncer como enfermedad compleja*. Tesis de doctorado en Filosofía de la Ciencia, UNAM.
- Valadez-Blanco, O., 2016. Abstractions, parts, and explanations in cancer sciences. *Sci. Stud.*, 14(1), pp.231–254.
- Valadez Blanco, E.O., 2018. Cáncer: naturaleza, cultura y complejidad. Elementos para un enfoque transdisciplinario de la enfermedad. [e-book] CDMX: CopIt-arXives. Disponible en: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>
- Valadez-Blanco, O. y Guerrero Mc Manus, F., 2014. Biología, reificación y transdisciplina: Hacia una visión crítica de las ontologías y los conflictos científicos. *Metatheoria – Rev. Filos. e Hist. Cienc.*, 5(1), pp.113–126.
- Waddington, C.H. (ed.), 1968. *Towards a theoretical biology: An IUBS Symposium*. Edinburgh University Press.
- Van de Vijver, G., Van Speybroeck, L. & Vandevyvere, W., 2003. Reflecting on complexity of biological systems: Kant and beyond? *Acta Biotheor.*, 51(2), pp.101–140.
- Wallerstein, I.M., 2005. *Análisis de sistemas-mundo: una introducción*. México: Siglo XXI Editores.
- Winther, R.G., 2006. On the dangers of making scientific models ontologically independent: Taking Richard Levins' warnings seriously. *Biol. Philos.*, 21(5), pp.703–724.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD SON CIENCIAS DE LA VIDA

Carlos Eduardo Maldonado\*

### INTRODUCCIÓN

Las ciencias de la complejidad constituyen un fenómeno apasionante, reciente y creciente de investigación. No cabe decir, en manera alguna, que la ciencia de punta son las ciencias de la complejidad; pero sí puede afirmarse sin recatos que lo mejor de la ciencia de punta (*spearhead science*) sí pasa por las ciencias de la complejidad. Dicho de manera puntual, se trata de ese grupo de ciencias, disciplinas, métodos, lenguajes, enfoques y metodologías que tienen en común el rechazo del reduccionismo y del determinismo, el recelo de la ciencia de tipo lineal, en fin, el reconocimiento de la no linealidad. De manera fuerte y precisa, se trata del estudio no simple y llanamente de fenómenos, sistemas y comportamientos complejos, sino, mucho mejor, caracterizados por complejidad *creciente*.

El origen de las ciencias de la complejidad ha sido presentado en varias oportunidades (Waldrop, 1993; Lewin, 1994; Gleick, 2008). Hoy es ya un lugar común el reconocimiento de que se ocupan de fenómenos, sistemas y comportamientos caracterizados por propiedades y atributos tales como: fluctuaciones, turbulencias, inestabilidades, no linealidad, emergencia, auto-organización, sinergias, percolación, redes libres de escala, y varios más (Barabási, 2003; Barrat, Barthélemy & Vespignani, 2008). Este reconocimiento fue el resultado de las primeras contribuciones al estudio de la complejidad, provenientes principalmente de la física, la química, las matemáticas, las ciencias de la computación y la biología.

Muy pronto, alrededor del año 2000, aproximadamente, se hizo evidente sin embargo, que desde cualquier punto de vista los sistemas de mayor complejidad son los sistemas sociales (Scott, 2007; Mitchell, 2009; Byrne & Callaghan, 2014), *latu sensu*; esto es, los sistemas sociales naturales, los sistemas sociales artificiales y los sistemas sociales humanos. A la fecha, el grueso del trabajo e investigación en complejidad son los sistemas sociales; pero, al mismo tiempo, los retos y desafíos se han vuelto mayores.

No obstante lo anterior, con este texto me propongo defender una tesis, a saber: las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida (aunque lo contrario no pueda

---

\* Profesor titular, Facultad de Medicina, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia. / maldonadocarlos@unbosque.edu.co

afirmarse necesariamente). En efecto, desde casi cualquier punto de vista razonable, el fenómeno de máxima complejidad posible son los sistemas vivos –la vida. Así, la tesis enunciada quiere significar que las ciencias de la complejidad tienen por objeto, esto es, por finalidad, comprender la vida, explicarla, y, por tanto, por derivación, afirmarla, hacerla posible de tantas maneras como quepa imaginar.

Como se hace evidente, consiguientemente, en las ciencias de la complejidad no hay una carga más teórica que práctica (o al revés), y ambas se implican recíproca y necesariamente. Los imperativos de este grupo de ciencias son tanto científicos como éticos. Este rasgo es algo que difícilmente puede decirse del panorama científico en general en el mundo –en las que aún predominan las discusiones y los énfasis teóricos y los prácticos o éticos, los filosóficos o los científicos, o también, los explicativos y comprensivos y los de aplicación y experimentación. En el curso de este texto iré mostrando las dos cargas en zig-zag.

En cualquier caso, intuitiva, conceptual, categorial, imaginativa, heurísticamente, la vida es el fenómeno de máxima complejidad conocida, o de máxima complejidad posible. La vida tal y como la conocemos, y la vida-tal-y-como-podría-ser posible. Este última distinción se encuentra en el núcleo mismo de las investigaciones en el que se cruzan la biología y la ecología, las ciencias de la computación, las ciencias sociales y humanas y la vida artificial.

La tesis enunciada se soporta en cuatro argumentos, así: en primer lugar, se elabora un contraste entre los orígenes de las ciencias de la complejidad y la heurística o la filosofía de las mismas. Este contraste ha pasado obliterado usualmente en la bibliografía. Sobre esta base, el segundo argumento afirma que es indispensable una comprensión básica de la vida o de los sistemas vivos, y esta comprensión consiste en el hecho de que no existe absolutamente ningún componente material o hylético que permita distinguir la vida de la no-vida. El tercer argumento sostiene que el estudio de la vida y de los sistemas vivos tiene un grado al mismo tiempo de generalidad y de singularidad que todos los otros fenómenos –físicos y demás– carecen. Se hace, naturalmente, la justificación de este argumento. Finalmente, el cuarto argumento afirma que ciencias de la complejidad son ciencias de la vida pero lo contrario no puede afirmarse de la misma manera. Al final se extraen algunas conclusiones.

#### 1. EL ORIGEN Y LA FILOSOFÍA DE LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD: UN CONTRASTE

Las ciencias de la complejidad nacen a partir del grupo de ciencias más prestigiosas, con mayores desarrollos sólidos y presupuesto: la física, la biología, la química, las ciencias de la computación y las matemáticas. Esto ha sido reconocido ya por diversos autores (Pagels, 1991). En este sentido, durante mucho tiempo, incluso hasta la fecha, el lenguaje de las ciencias de la complejidad ha sido marcadamente fisicalista, o biológico, o matemático y demás. Conceptos, aproximaciones, enfoques tales como transiciones de fase de primer orden y de segundo orden, redes

catalíticas y autocatalíticas, distinción entre una máquina de Turing (TM, por su sigla en inglés) y otros tipos de máquinas (o-TM, U-TM, y otras), percolación, grafos e hipergrafos, redes libres de escala y leyes de potencia, por ejemplo, son algunos ejemplos conspicuos y bien conocidos del lenguaje que permea y hace posible los estudios sobre los fenómenos de complejidad creciente (Strogatz, 2003; Watts, 2004). La lista se puede ampliar a voluntad sin ninguna dificultad.

Esta característica tiene dos retos enormes: de un lado, da la impresión de que existiría un cierto cientificismo entre los estudiosos e investigadores de la complejidad. Otros aspectos, dimensiones y realidades como el arte, la literatura, la estética y la música, por ejemplo, quedarían por fuera del ámbito de las “ciencias de la complejidad”. Una crítica sobre este primer aspecto puede encontrarse en (Casti, 1998; Maldonado, 2016b).

Al mismo tiempo, de otra parte, esta impresión podría hacer pensar que cuando se dirige la mirada, por ejemplo, hacia las ciencias de la salud, las ciencias de la vida o las ciencias sociales y humanas, el mismo tipo de lenguaje, métodos, enfoques y explicaciones serían de uso obligatorio. Se olvida, de esta suerte, que la atmósfera de la complejidad, si cabe decirlo así, es la interdisciplinariedad; esto es, el cruce y retroalimentación recíproca de ciencias, enfoques, disciplinas y tradiciones diferentes pero que confluyen en el interés o la necesidad por comprender y explicar la complejidad.

A fin de evitar generalizaciones, quisiera aquí concentrarme en un caso particular. Se trata del caso, apasionante y muy reciente, del diálogo o las contribuciones entre historia y complejidad, un fenómeno que no ha sido atendido, para nada, por parte de los complejólogos de primera generación (Prigogine, Pines, Anderson, Arrow, Kauffmann, Gell-Mann, Holland, y muchos más).

La historia y la historiografía en sus relaciones con la complejidad ponen de manifiesto que pensar la historia consiste en pensar el cuadro amplio (*big picture*) de los acontecimientos y fenómenos de la historia, que no se reducen a los aspectos estrictamente históricos e historiográficos. La historia profunda (*deep history*), la gran historia (*big history*) y la historia total (*histoire totale*), son los tres ejes que definen el sentido de la historia en el sentido de la complejidad. Así, climatología y geología, genética y teoría de la evolución, cosmología y astrofísica confluyen con los campos habituales de la economía, la sociología, la historia y la filosofía. El lenguaje deja de ser el de un solo grupo de ciencias, para incorporar a diferentes familias de ciencias (Schryock and Lord Smail, 2011; Christian, 2005; Morris, 2016).

A pesar de lo anterior, está claro que la física, la química, la biología, las matemáticas, la biología y las ciencias de la computación han sentado ampliamente todas las bases y fundamentos –semánticos, metodológicos, heurísticos– para el estudio de la complejidad (Cowan, Pines & Meltzer, 1999). El cuadro 1 ofrece un panorama de los conceptos, métodos y características de los sistemas complejos.

Pues bien, podemos afirmar, sin ambages que el cuadro 1 condensa lo que podemos denominar el estado normal del estudio y trabajo en las ciencias de la complejidad. Dicho en términos más fuertes y directos, esta es la normalidad en com-

Ciencias o Disciplinas	Conceptos	Métodos	Heurística
Física	Transiciones de fase (de primero y de segundo orden) Fenómenos de percolación Concepto de información Efecto Zenón Comportamientos cuánticos	Física estadística	Búsqueda de elementos simples y leyes fundamentales
Química	Redes catalíticas y autocatalíticas Estructuras conservativas y estructuras disipativas		Estudio de redes catalíticas Recientemente, trabajo en escalas microscópicas (micro escalares)
Biología	Emergencia Autoorganización Jerarquías de complejidad Equilibrios puntuados Metabolismo y metabolización Aprendizaje y Adaptación	Evolución Genética Biología de sistemas Enfoque Evo-Devo, y Eco-Evo-Devo	Trabajo con base en largas series de tiempo, y también procesos (más) acelerados de evolución
Matemáticas	Mapas cuadráticos Redes complejas, Leyes de potencia Problemas P vs NP Grafos e hipergrafos	Diversos métodos analíticos (teorema KAM, constantes de Lyapunov, y muchos más)	Distinción entre matemáticas de sistemas continuos y matemáticas de sistemas discretos
Ciencias de la Computación	Lenguaje booleano Máquina(s) de Turing Arquitectura de Von Neumann Hypercomputación	Métodos y procedimientos algorítmicos	Sistemas bioinspirados Computación y sistemas vivos

**Cuadro 1:** El panorama de las ciencias de la complejidad *modo normal*. Nota: Existen varios conceptos y métodos que no son exclusivos de una sola ciencia o disciplina. Elaboración del autor.

plejidad.<sup>1</sup> Naturalmente, el cuadro 1 no pretende ser exhaustivo, pero sí mostrar una visión general o una tendencia en el estudio de la complejidad.

Tal es el caso que cuando se funda el que quizás es el más prestigioso o el más popular de los centros e institutos de complejidad, el Instituto Santa Fe (SFI), en Nuevo México, nace inmediatamente el programa de encontrar las leyes últimas constitutivas de la complejidad, y, al mismo tiempo, nace el propio concepto de “ciencias de la complejidad”. Es imposible trabajar hoy en día en complejidad sin pasar por el modelamiento y la simulación; y al mismo tiempo, en otro plano, es imposible trabajar complejidad, asimismo, sin atravesar por el estudio de la ciencia de grandes bases de datos (*Big-Data Science*).

Basta una mirada cuidadosa a lo mejor de la bibliografía sobre ciencias de la complejidad para verificar la validez de aquello a lo que apunta el cuadro 1. Pero lo mismo puede afirmarse sin dificultad para la mayoría de centros e institutos dedicados al estudio de la complejidad. No en última instancia, particularmente

<sup>1</sup> Como se aprecia, hay en el fondo un eco kuhniiano en la distinción entre ciencia normal y ciencia revolucionaria (o nuevos paradigmas). Hoy en día, gracias al crecimiento de la masa crítica en complejidad, ya existe algo así como una complejidad normal. Véase el tuit de xyz, Wikipedia, Handbooks, etc.

por parte de quienes se introducen apenas en las ciencias de la complejidad, se ha desarrollado una *jerga* propia. Es la *jerga* de la comunidad de los complejólogos, y de manera generalizada, esa *jerga* es predominantemente fisicalista, matemática o computacional.

Pues bien, quisiera decirlo de manera franca y directa: pareciera que existiera una tendencia fisicalista entre los complejólogos –cuya mejor expresión sería la afirmación según la cual en la base de la complejidad existen leyes simples; aun cuando jamás se ha llegado a explicitar dichas leyes–; o bien, pareciera que existiera un cientificismo que no permite superar el llamado crítico de C.P. Snow acerca de la dos culturas (2012); o acaso, incluso, a pesar del llamado de Brockman acerca de la emergencia de una “tercera cultura” (1991). Una asimetría entre artes y humanidades, de un lado, y ciencias, de otro, pareciera no haberse resuelto jamás, con la ayuda de las ciencias de la complejidad.

Como se aprecia sin dificultad, el origen de las ciencias de la complejidad marca su destino hasta hace muy poco tiempo, y muy ampliamente en la comunidad –que ya va siendo relativamente normal– de complejólogos. Sin embargo, la filosofía de las ciencias de la complejidad permanece, si cabe decirlo, en otro plano. Se trata del esfuerzo sincero y denodado por llevar a cabo síntesis –algo que, a decir verdad, no ha terminado de madurar completamente; la mayoría de trabajos en esta área siguen siendo minimalistas, técnicos, ampliamente aplicados y experimentales–. Han existido numerosos llamados a trabajar en la filosofía de las ciencias de la complejidad (Rescher, 1998; Mitchell, 2003), y este llamado consiste en aspectos como los siguientes:

- *Elaborar síntesis amplias, fuertes y móviles.* A nivel gráfico, el mapa de la complejidad elaborado por B. Castellani, y ampliamente conocido por los complejólogos.<sup>2</sup> La dificultad estriba en que a nivel teórico o conceptual un mapa semejante aún queda como un deseo o un indicador, sencillamente.
- *Establecer los principios (fundamentales) de la complejidad.* La dificultad estriba en que estos principios fueron entendidos como la búsqueda de las leyes últimas constitutivas de la complejidad que, se asumió siempre, deben ser elementales. Este llamado puede ser visto como el *leitmotiv* de la fundación del Instituto Santa Fe. Al cabo, esta búsqueda nunca logró su cometido, y con el tiempo, los investigadores vinculados en torno al SFI dejaron de hablar o de mencionar lo que podemos idóneamente llamar los principios de la complejidad.
- *A título metodológico, la complejidad se funda en la interdisciplinariedad.* Este rasgo es suficientemente conocido, y, sin embargo, se impone una observación puntual. Bien entendida, la interdisciplinariedad consiste en el trabajo entre grupos de familias de ciencias y disciplinas y no simplemente el trabajo al interior de una misma familia de disciplinas y ciencias. La verdadera

<sup>2</sup> Una versión, para el año 2018, puede ser la siguiente: <https://twitter.com/complexcase/status/950749146713133057>

interdisciplinariedad no es, por ejemplo con referencia a las ciencias de la salud, cuando un epidemiólogo trabaja con un clínico, un traumatólogo, un inmunólogo y una enfermera. Asimismo, tampoco existe interdisciplinariedad al interior de las ciencias sociales y humanas por el hecho de que trabajen mancomunadamente un historiador, un antropólogo, un filósofo, un economista y un politólogo, por ejemplo. Finalmente, a título ilustrativo, no hay interdisciplinariedad por el simple hecho de que trabajen en equipo un físico, un geólogo, una matemática, un biólogo y una experta en computación o un estadístico. La verdadera interdisciplinariedad es cruzada entre familias de ciencias.

Observemos, para concluir provisoriamente esta primera sección, que los sistemas vivos exhiben todas las características, globalmente, que todos los sistemas –físicos, químicos, biológico, y demás–, poseen. Pero, *adicionalmente*, los sistemas vivos poseen propiedades y atributos que los sistemas físicos, químicos y demás, *en cuanto tales*, no poseen. Quisiera mencionar un rasgo singular: notablemente, los sistemas vivos procesan información en términos no-algorítmicos. Volveré sobre esta idea a continuación.

## 2. QUÉ SON Y QUÉ HACEN LOS SISTEMAS VIVOS

La forma tradicional como los sistemas vivos han sido comprendidos o explicados es a partir de los componentes o estructuras de los mismos, generalmente físico-químicos. Dicho de manera puntual, el problema de base consiste en la “definición” de lo que es la vida. Así, la vida sería un atributo específico que podría ser traducido en términos de termodinámica, la capacidad de reproducción, el conjunto de funciones metabólicas, la capacidad de autonomía y otros caracteres, y también como la complementación de estos mismos atributos entre sí (Bedau and Cleland, 2010). Esta es, ampliamente, la dirección principal de trabajo en torno a la comprensión y explicación de lo que son los sistemas vivos. En esta dirección participan, con aportes propios, biólogos y médicos, científicos de la computación y filósofos, químicos y matemáticos, entre otros.

No obstante lo anterior, los sistemas vivos pueden ser comprendidos en otra dirección, así: los sistemas vivos son *lo que hacen*, no tanto aquello de lo cual están compuestos. Si esta idea es plausible, entonces la mirada debe dirigirse hacia el tipo de cosas que hacen los sistemas vivos y que otros fenómenos y sistemas *no* hacen –en el planeta, en el universo.

He defendido la idea según la cual los sistemas vivos procesan información, y la procesan de una manera que no es posible asimilar a ninguna clase de máquina o de sistemas en el universo. El procesamiento de información es, a decir verdad, una comprensión computacional de la vida. Ahora bien, esta idea exige dos precisiones puntuales. Más exactamente, los sistemas vivos procesan información de manera no-algorítmica (Maldonado & Gómez Cruz, 2015).

Computar significa sencillamente procesar información. Desde este punto de vista, computar no quiere decir, en manera alguna, así como analizar, pensar, co-



nocer o algo semejante. Puede decirse que la metáfora de nuestra época es la de la computación, como la manera más adecuada, a los tiempos que corren, para entender procesos, estructuras, dinámicas. No en última instancia, cabe recordar aquí una idea de base en biología: la función determina la estructura.

En efecto, el computador, o mejor, la computación sirve como metáfora o símbolo para la ciencia en general en nuestra época. Así, por ejemplo, se ha sostenido explícitamente que el universo es un gran computador (Lloyd, 2007; Hey & Pápay, 2014); son varias las fuentes que apuntan en esta misma dirección.<sup>3</sup>

De otra parte, al mismo tiempo, el procesamiento de la información puede ser adecuadamente entendido, gracias a la medicina o a la biología, como la metabolización. En este sentido, metabolizar significa transformar una cosa en otra. Exactamente en esta dirección, procesar información no significa simplemente leer el universo y el medio ambiente, sino, mucho mejor, leer el entorno y entonces, consiguientemente, transformarlo. La información misma consiste en el procesamiento de la misma, de tal suerte que no existe información antes del procesamiento, y tampoco después.

Pues bien, decir que los sistemas vivos procesan información significa que tanto leen e interpretan el medio ambiente como que transforman el medio ambiente al cual se adaptan. Sólo que este procesamiento de información no debe ser asimilado, en absoluto, a una máquina de Turing (Maldonado, 2017b). Dicho de manera clara y directa: los sistemas vivos no procesan números y funciones. Cuando el procesamiento de la información es idóneo, adecuado o bien efectuado, transforma a los sistemas vivos en más sistemas vivos. De lo contrario, pone a los sistemas vivos en peligro. Procesar información es para los sistemas vivos un asunto de vida o muerte.

En este sentido, se ha sostenido que el procesamiento de información por parte de los sistemas vivos puede ser llamado como *hipercomputación biológica*, justamente para designar que los sistemas vivos procesan información de forma no lineal, en paralelo, en multinivel, de manera distribuida, y en términos de no-localidad. Nada semejante a una máquina de Turing, en ningún sentido.

Los sistemas vivos se adaptan incesantemente al medioambiente y al mismo tiempo modifican el entorno al cual se adaptan. Esto es, los sistemas vivos viven en paisajes rugosos adaptativos (*rugged adaptive landscapes*), y lo que observamos en la naturaleza son procesos permanentemente inacabados de co-evolución. Mucho mejor, y más radicalmente, la vida en general puede ser vista como una vasta red o trama de cooperación, antes que de selección y competencia. Esta idea ha dado lugar a la teoría del origen cooperativo de la vida (Nowak, 2011; Wilson, 2012). El concepto que mejor sirve para explicar esta situación es el de *eusocialidad* (*eusociality*). La vida, en una palabra, es un vasto sistema de cooperación, mutualismo y comensalismo, antes que de selección y depredación. No en última instancia, los sistemas vivos son holobiontes.

---

<sup>3</sup> Ver, por ejemplo: [Are we living in a computer simulation?](#), [Is the Universe a Simulation?](#) y [The Universe as a Computer](#).

Digámoslo en otras palabras, desde otra perspectiva. No existe absolutamente ningún componente material, ontológico o hylético (*hylé*, en griego), que permita distinguir la vida de la no-vida. Asimismo, no existe absolutamente ninguna línea demarcatoria fija, bien establecida, que permita separar la vida de la no-vida, o también, la vida del medio ambiente, o incluso, asimismo, los factores bióticos de los abióticos.

El alfabeto de la totalidad del universo conocido y por conocer ha sido plenamente identificado –hasta la fecha–. Se compone de 118 letras: es la tabla de elementos químicos. La diferencia entre un animal y una silla, entre una planta y un balón cualquiera, entre un ser humano y un esfero determinado, o también entre una bacteria cualquiera y un vidrio o ventana, es únicamente una diferencia de tres tipos: o bien de grados (o gradientes), cualitativa, o de organización. Un elemento, por ejemplo, tiene más molibdeno que el otro, uno tiene más einsteniano que otro, uno tiene más litio que otro, y así sucesivamente. O bien, inversamente, uno tiene menos potasio que otro, tiene menos francio que otro, en fin, menos sodio que otro.

En el lenguaje de la química, lo anterior puede decirse, igualmente, en el sentido de que en un caso existen enlaces débiles, en otro enlaces dobles, en otro más enlaces covalentes, y así sucesivamente, como es conocido. La química sienta las bases para el alfabeto del universo, del mundo, de la realidad. Las diferencias entre los elementos de la naturaleza y del mundo son solamente diferencias de organización, de grados o cualitativas: nunca materiales u ontológicas. Como se aprecia, se produce aquí una fuerte inflexión con respecto a toda la historia anterior y frente a las comprensiones estándar de la vida.

La idea del “metabolismo primero” (*metabolism first*) ha venido a arrojar luces sugestivas con respecto al conjunto de teorías acerca de los orígenes de la vida. La vida crea las condiciones de posibilidad para su aparición y emergencia: no existen condiciones iniciales antes de que aparezca la vida, y acaso, entonces, diferentes a la vida misma. Los sistemas vivos aparecen en el universo ya con ciertos grados de complejidad, y no a partir de elementos simples que agregativa o composicionalmente darían origen a la vida.

La complejidad aparece ya compleja, pero se va haciendo, posteriormente, de complejidad creciente. Este es el núcleo mismo del estudio de los sistemas complejos. Pensar en complejidad significa, en otras palabras, pensar en términos de síntesis, y no ya solamente de forma analítica y agregativa.

Como se comprende, los sistemas vivos pueden ser comprendidos, en contraste con toda la tradición, no simplemente a partir de los componentes que los estructuran, sino, mucho mejor, en términos de lo que hacen. Los componentes no son, finalmente, muy diferentes del resto del universo. La vida forma parte del universo mismo, pero se expresa como una cualidad diferente del mismo. Esta cualidad es precisamente el hecho de que los sistemas vivos transforman el entorno abiótico, la entropía, en más vida. Los sistemas vivos responden a un entorno que cada vez comprendemos mejor en sus inicios, pero es, definitivamente, un acontecimiento singular –no un fenómeno que se ajuste a leyes, que son, por definición, de carácter general.

Así, por ejemplo, los sistemas vivos modifican el CO<sub>2</sub> para permitir un balance de oxígeno conveniente que haga posible la vida misma. En términos básicos, las relaciones pueden plantearse en los siguientes términos. El Sol se caracteriza porque transforma fuerza gravitacional en energía electromagnética. Esa energía llega a Gaia, como fuente primera, y en Gaia las plantas transforman la energía electromagnética en energía química (Volk, 1998); es la fotosíntesis. A su vez, las plantas y los seres humanos transforman la energía química en energía cinética. Pues bien, de manera más amplia, los sistemas vivos transforman la energía cinética en energía potencial.

De esta suerte, no solamente la entropía del universo se reduce produciéndose así formas y sistemas complejos, sino, al mismo tiempo, los sistemas vivos transforman la entropía en condiciones para el sostenimiento y creación de nuevas formas de vida. Esta es la historia de la evolución.

En otras palabras, los sistemas vivos “degradan” la entropía del Sol, y ese proceso puede ser idóneamente comprendido como el proceso a través del cual los sistemas vivos procesan información: del universo, del Sol, del planeta mismo, de sí mismos, de sus entornos y sus relaciones, en fin, incluso, de sus propias posibilidades o potencialidades (Chaisson, 2000). Sólo que todo este proceso acontece de forma no-teleológica. Algo que ya quedara sólidamente establecido a partir de Darwin.

Esto significa que los sistemas vivos procesan la energía libre y la transforman sentando las condiciones de posibilidad de su propia existencia, pero todo ello tiene lugar de forma no finalista; la evolución es el proceso mediante el cual, precisamente a través de paisajes rugosos adaptativos, los sistemas vivos se van haciendo posibles a sí mismos *a cada paso*. La vida es un acontecimiento no-teleológico que sabe de sí misma y de su entorno, en cada momento. En otras palabras, los sistemas vivos son un “programa” incompresible –a la manera de Turing–, y más exactamente indecidible. Se trata de una magnífica aporía, los sistemas vivos son sistemas de complejidad creciente, intratables (en el sentido de problemas intratables), que, sin embargo, se hacen posibles a sí mismos, de manera incesante, indefinida. En esto consiste la complejidad.

Los procesos de metabolización, de reproducción, los procesos termodinámicos en toda la línea de la palabra, y el procesamiento de información son acontecimientos que definen a los sistemas vivos de manera radical, exactamente así: como *procesos*, y no como *estados*. La vida es lo que hace de sí misma y en la forma en que lo hace, modificando, incluso, hasta cierto punto, los componentes mismos de que está estructurada. La consecuencia filosófica es de una radicalidad sin igual: los sistemas vivos son un devenir (Heráclito), y no ser (Parménides). Es en y a través del devenir que, en algún momento, los sistemas vivos llegan a ser alguna forma o estructura o comportamiento determinados.

## 3. LA VIDA, UN EVENTO RARO

Las ciencias de la vida, la biología, pero también los sistemas sociales y humanos tratan de singularidades, de excepciones, no de fenómenos y acaeceres universales y necesarios; que es y fue la lectura tradicional en ciencia y en la cultura.

En efecto, la preeminencia –lógica, metodológica, heurística y semántica– del fisicalismo, hizo creer siempre que la ciencia se ocupaba de fenómenos universales, generales, y experimentalmente reproducibles.

Pues bien, es una característica propia de las ciencias de la complejidad *latu sensu*, reconocer que la contingencia, el azar o la casualidad forman parte inextricable del universo y de la realidad. Las cosas no existen y no suceden según leyes y siempre necesariamente. Adicionalmente, hay fenómenos que tienen lugar aleatoriamente y son emergentes; no suceden causalmente.

Mencionemos, de manera caprichosa algunos ejemplos: solamente una vez en la historia del universo emergió la vida en la forma en que la conocemos, hace alrededor de 4,500 millones años, y nunca antes o después hemos sabido que la vida haya aparecido de la forma en que tuvo lugar; una sola vez en la vida hubo una revolución como la 1789 o la de 1917 y nunca jamás ha vuelto a suceder una revolución semejante; una sola vez en la historia se descubrió un continente de la forma como tuvo lugar en 1492, y nunca antes ni después ha sucedido un acontecimiento semejante. Los ejemplos pueden multiplicarse a voluntad. Y precisamente porque fueron acontecimientos singulares e irrepetibles implican complejidad.

En la misma dirección, una sola vez, hasta donde sabemos, un universo se originó hace aproximadamente 14 mil millones de años de la forma como este universo (o en rigor: esta región del universo) nació, a partir del fenómeno de supersimetría, y ha tenido la evolución que conocemos hasta la fecha. Es un hecho reconocido abiertamente que se trata de una singularidad. En la misma dirección, el estudio de los cuerpos o fenómenos más simples del universo, los agujeros negros, arrojan luces maravillosas acerca de las singularidades que se encuentran en el centro de cada galaxia. El estudio de los agujeros negros constituye uno de los vértices de la cosmología y la astrofísica. Análogamente, en un plano diferente, la pasión que genera entre los matemáticos el estudio de la función zeta de Riemann muestra claramente que los números primos –los ladrillos de los números y del universo–, en realidad, constituyen singularidades cuyo patrón escapa aún a las mejores mentes de la humanidad.

La idea de base aquí es que el estudio de la complejidad consiste en el estudio de singularidades, excepciones, acontecimientos únicos e irrepetibles. Ahora bien, cuando existen grupos de fenómenos excepcionales hablamos entonces de patrones (*patterns*). Así, por ejemplo, el caos nace a partir de la meteorología, que es la ciencia que se ocupa de la predicción del tiempo, y que pone de manifiesto que el caos implica la impredecibilidad; más exactamente la impredecibilidad a mediano y a largo plazo (Lorenz, 2000; Ruelle, 1995). La mariposa de Lorenz significa exactamente eso: nadie se baña dos veces en el mismo río (Heráclito); esto es, pequeños cambios imperceptibles tienen consecuencias enormes e impredecibles de

tal suerte que ningún fenómeno hace dos veces la misma trayectoria. A su vez, la termodinámica del no-equilibrio establece que los sistemas complejos existen en el filo del caos o, lo que es equivalente, lejos del equilibrio. En fin, la historia y las características de las ciencias de la complejidad son conocidas y han sido narradas en varias oportunidades.

Pues bien, existe un concepto preciso para designar las singularidades, los acontecimientos contingentes, en fin, las excepciones. Se trata del concepto de eventos raros (Maldonado, 2016b). Los fenómenos, sistemas y comportamientos complejos son eventos raros, literalmente.

Un evento raro es aquel que, por ejemplo en términos de su traducción estadística, puede ser entendida como una cola larga, y que es el objeto de estudio de la teoría de la teoría del valor extremo. Aunque hay que decir que otras estrategias y alternativas existen para el estudio de los eventos raros, tales como las lógicas no-clásicas, la lógica de contrafácticos, el estudio de la contingencia en general, y claro, las ciencias de la complejidad.

El estudio de los sistemas vivos implica, si cabe decirlo así, el estudio de la climatología (Acot, 2005) –esto es, la ciencia de esos fenómenos esencialmente variables inestables que es el clima, un fenómeno de largo alcance que se cruza con la geología–, tanto como el estudio de la evolución y el desarrollo (enfoque *evo-devo*). Una manera puntual en que puede traducirse esta doble implicación es como el estudio de la epigenética (Jablonka & Lamb, 2004; Moore, 2015). Esta idea quiere simple y llanamente subrayar el reconocimiento expreso de que no hay dos cosas: naturaleza y cultura, sino una sola.

En ciencias de la salud, en general, el modelo imperante hasta la fecha ha sido la epidemiología, que sirve de base para los estudios y afirmaciones acerca de epidemias, pandemias, morbilidad y mortalidad.<sup>4</sup> El modelo epidemiológico en general responde a criterios de tipo fisicalista y por tanto universalista. Como es sabido, varios movimientos se están produciendo que apuntan en otras direcciones. Así, por ejemplo, la medicina transpersonal, que puede ser entendida como el estudio del paciente en términos de su genómica, transcriptómica, glucómica y demás. De esta suerte, la biología de sistemas permite un estudio personalizado, individual, más integrado y singular en cada caso.

En términos humanos, cabe decir sensatamente que la diferencia en el universo la establece el individuo. Es indudable que la estadística en general, y más ampliamente la mecánica estadística ha hecho contribuciones importantes a la historia del conocimiento y de la investigación. Pero es igualmente cierto que cada vez más el énfasis se desplaza hacia el estudio de fenómenos particulares, singulares, digámoslo de manera puntual, excepcionales. Esta constituye, sin ninguna duda, la punta de la investigación en general en el mundo.

<sup>4</sup> Al cabo, la medicina y las ciencias de la salud sólo han sabido de enfermedad, y nunca, plenamente, hasta la fecha, de salud. Una derivación de este trabajo consiste en el reconocimiento de que las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida, y entonces, traducido al lenguaje de la medicina y de las ciencias de la salud, se trata de una inflexión fundamental en la mirada: debemos poder pensar en salud, y no ya en enfermedad; ni siquiera, quisiera mencionarlo, de pasada, en el continuo salud-enfermedad. Pero este es el tema de otro texto que queda para otro momento y lugar.

El descubrimiento de los eventos raros constituye una ganancia en la historia de la ciencia en general, análoga al descubrimiento de la incertidumbre, a comienzos del siglo XX. No hemos perdido, en absoluto, las certezas y verdades que alguna vez ganamos o conquistamos. Lo que sucede es que, *adicionalmente*, hemos hecho el aprendizaje de la incertidumbre. Huelga decir que las incertidumbres son intrínsecas a la naturaleza, y no tiene, entonces, en absoluto, ninguna connotación psicológica, emocional o cognitiva.

De esta suerte, puede decirse que el vector general del conocimiento –esto es, de la historia de la ciencia, de la filosofía y de la cultura en general– consiste en el tránsito de lo general a lo particular; esto es, de estudios, intereses y enfoques centrados en procesos de generalización y universalización, hacia el reconocimiento de fenómenos, procesos y comportamientos singulares y particulares. Hasta llegar, explícitamente, al reconocimiento de los eventos raros.

La vida: un fenómeno raro, basado en un componente altamente frágil (el carbono), con raíces en un gas extraño en el universo y altamente explosivo (el oxígeno), cuya característica fundamental es la biodiversidad –esto es, el carácter irreplicable de las formas (morfología), en fin, un acontecimiento que se ha recuperado a sí mismo, contra todos los datos estadísticos, a lo largo de cinco extinciones masivas, varias de ellas de un valor altamente crítico.

Podemos afirmar sin ambages que lo que hace a la vida es el hecho de que siendo ella misma un fenómeno físico, no se agota ni se reduce a la física, y por el contrario, se define por su negación incesante de las leyes físicas –neguentropía (Schrödinger), estructuras disipativas (Prigogine)–. Los sistemas vivos resuelven problemas de altísima complejidad como si fueran elementales (plegamiento de proteínas, producción de antígenos, adaptación a medios inhóspitos).

Los extremófilos constituyen acaso el plano más desafiante de las leyes de la física. Es prácticamente imposible girar la mirada en el planeta y no encontrar vida; *à la limite*, lo mismo puede decirse casi del sistema solar mismo. Un evento raro y discreto que se afirma a sí mismo como posible contra todas las apariencias e imposibilidades estadísticas. Un acontecimiento apasionante desde cualquier punto de vista. Los extremófilos, esa familia que se encuentra vecina a los casos más extremos y apasionantes: los virus (viroma), las bacterias (bacterioma), los microbios, los parásitos, los hongos. ¿Cabe aquí mencionar que la biomasa de las bacterias es bastante mayor que la de los seres humanos?

Mientras que la física sienta las bases del reloj biológico (ritmos circadianos, metabolización, fisiología, y otros aspectos), la biología se define por el esfuerzo por arrancarle tiempo a la naturaleza física. Y lo logra, muy notablemente, en el caso de la adaptación en general, y en el caso de los seres humanos, como la ampliación de las esperanzas y las expectativas de vida. Los seres humanos, que de entrada forman parte de un género con ciclos cortos de vida, ha logrado gracias a la cultura en general, a la ciencia y a la tecnología, ganar una vida de más de lo que originariamente podría haberse pensado (Rosnay, 1993).

Como se aprecia sin dificultad, los sistemas vivos sientan y modifican al mismo tiempo las condiciones de posibilidad de su propia existencia. Ningún campo es

tan sugestivo y provocador al mismo tiempo como el estudio de las bacterias. Al cabo, hemos llegado a hacer el aprendizaje que los seres humanos (aunque no exclusivamente ellos) son holobiontes: por cada célula viva existen por lo menos diez bacterias (microbiomas) en el organismo humano. Tenemos mucho más en común con la naturaleza que de específico de los seres humanos.

Desde prácticamente cualquier punto de vista los sistemas vivos en general son excepciones, eventos raros. La expresión acaso más gruesa de su existencia es el hecho de que en la escala planetaria, el metabolismo global de los seres vivos modifica profundamente la composición de la atmósfera terrestre, de tal suerte que no existen condiciones anteriores a la aparición y surgimiento de la vida, sino, en su misma evolución, los sistemas vivos van adaptando las condiciones para que sean propicias, ellos mismos se adaptan a las presiones del medioambiente y del clima, y modifican a la vez la composición de la atmósfera terrestre a escala global.

Naturalmente que el clima no existe per se; existen, además, los microclimas. En cualquier caso, los biotopos resultan como un proceso inacabado, incesante de adaptación y de modificaciones que van haciendo posible el más apasionante, el más inverosímil, el más extraño de los todos los fenómenos en el universo: la vida misma — en su diversidad (genética, natural y cultural) (Holland, 1995; 1998).

#### 4. ¿EN QUÉ SENTIDO PUEDE DECIRSE QUE LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD SON CIENCIAS DE LA VIDA?

El estudio de la complejidad ha sido tradicionalmente considerado como el estudio de todos aquellos fenómenos, sistemas y comportamientos que no se explican ni pueden manejarse en los marcos de una campana de Gauss (o en otros términos: curva de Bell, distribuciones normales, ley de grandes números). La idea es clara. En contraste, se ha sostenido (Bak, 1996) que los sistemas complejos exhiben rasgos o propiedades de una ley de potencia.

En otras palabras, los sistemas de complejidad creciente han sido identificados por una serie de atributos muy específicos, a saber: inestabilidades, fluctuaciones, turbulencias, perturbaciones, la presencia de aleatoriedad, incertidumbre, no linealidad, emergencia, auto-organización, redes libres de escala, percolación, irrupciones (*bursts*) (Barabási, 2011), distribuciones en términos de leyes de potencia, criticalidad auto-organizada, y varios más. Manifiestamente, se trata de fenómenos, sistemas y comportamientos que no son reductibles en ninguna acepción de la palabra (irreductibilidad), son no-deterministas, en fin, no se explican con base en matrices, vectores, promedios, medias, medianas y otros rasgos semejantes.

Podría resumirse esta serie de características sosteniendo que los sistemas complejos son esencialmente impredecibles. Más exactamente, son predecibles tan sólo a corto plazo, y cuanto más inmediatamente tanto más predecibles son; pero a mediano y a largo plazo se caracterizan justamente por inestabilidades e impredecibilidad. La física estadística —que es una herramienta muy apreciada por parte de la ciencia normal o estándar—, resulta inadecuada para la comprensión y explicación de los sistemas vivos.

Precisamente en este sentido, nuevos lenguajes, nuevas metáforas, nuevas metodologías, nuevos enfoques, ciencias y disciplinas han emergido y se han transformado radicalmente, dedicadas a la tarea de comprender esta clase de fenómenos, sistemas y comportamientos. Las ciencias de la complejidad son, en toda la línea de la palabra, ciencia de punta (*spearhead science*), ciencia revolucionaria (Kuhn, 1992).

Las ciencias de la complejidad forman parte de un grupo de ciencias recientes que no tienen *objeto* –a diferencia de toda la ciencia clásica o moderna, la cual se caracterizaba porque tenía un objeto propio (en cada caso), un método, un lenguaje, una tradición, y demás. Más exactamente, las ciencias de la complejidad son ciencias como síntesis (Couloubaritsis, 2014), y se definen, si cabe la expresión, a partir de problemas de frontera. Un problema se dice que es de frontera cuando convoca a varias tradiciones científicas o disciplinarias, o bien, igualmente, cuando diferentes tradiciones, métodos y lenguajes confluyen en un problema de base común.

Pues bien, desde casi cualquier punto de vista –conceptual, categorial, fenomenológico, y otros–, los más complejos de todos los sistemas imaginables o cognoscibles son los sistemas vivos. Cabe entonces adelantar una tesis de carga al mismo tiempo científica y filosófica: las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida. Esta tesis exige una elucidación cuidadosa.

Contemporáneamente con la emergencia de las ciencias de la complejidad nacen otros grupos de ciencias con un espíritu semejante. Se trata, por ejemplo, de las ciencias de la tierra, las ciencias del espacio, las ciencias de la salud, las ciencias de materiales, en fin, precisamente, las ciencias de la vida. Las fronteras entre estos grupos de ciencias son difusas, permeables, movedizas.

De manera atávica, particularmente en el contexto anglosajón, las ciencias de la vida están fuertemente vinculadas a las ciencias de la salud, a las ciencias biológicas, al estudio de las enfermedades y el tratamiento de los pacientes.<sup>5</sup> No puede afirmarse con igual validez que lo contrario sea cierto: es decir, que las ciencias de la vida sean ciencias de la complejidad. La razón estriba en el carácter disciplinar como se conciben a las ciencias de la vida, y en un fuerte sesgo de una filosofía reduccionista o determinista. Ampliamente, el determinismo y el reduccionismo son paradigmas vigentes y hegemónicos en la ciencia y la cultura. En este sentido, son ciencia normal y corresponden a la mejor tradicional de la ciencia clásica o moderna.

Las ciencias de la complejidad tienen consigo el más apasionante, difícil y raro de todos los fenómenos imaginables. La vida no es una propiedad material del universo, sino una forma de organización de la materia, de la energía y de la información, una cualidad de la propia materia, energía e información que, sin embargo, no se deja reducir a cualquiera de las tres expresiones físicas.

---

<sup>5</sup> Un ejemplo conspicuo al respecto es la revista *Life Sciences* del grupo Elsevier: <https://www.journals.elsevier.com/life-sciences>. En el contexto francófono, o en el marco de la lengua y la cultura alemanas la situación no es muy diferente. Una mirada desprevenida a la web es suficiente para comprobar esta idea.



Podríamos decir que la vida como un *programa de investigación* surge apenas en 1942 con el bello de texto de E. Schrödinger, *¿Qué es la vida?* (Schrödinger, 2000). Naturalmente que la palabra “vida” ya existía mucho antes. Pero, no es cierto lo que sí sostiene con razón en el marco del nominalismo U. Eco (2010), que “en el nombre de la rosa está la rosa”. En la palabra *vida* no había aparecido aún, hasta Schrödinger, la vida como un programa de investigación. Omitiendo deliberadamente aquí el logro de Watson y de Crick en 1953, en la tradición de Schrödinger cabe identificar varios hitos o pasos, así: Monod (2015), Jacob (2015), Prigogine y Stengers (1983), Maturana y Varela (1998), Solé y Goodwin (2000), y muchos más hasta llegar, notablemente a Kauffman (1995; 2000).

En cualquier caso, se trata de una tradición que apenas si supera los sesenta años, o algo así, a la fecha. Y sin embargo, son apasionantes los logros y alcances que se han conseguido.

Las ciencias de la complejidad se ocupan de fenómenos alta y crecientemente contraintuitivos. Más exactamente, la “vida” no es algo que se ve, en el sentido natural de la percepción. Ciertamente vemos cadenas de péptidos, diferentes clases de RNA, el propio DNA, y otras instancias, por encima y por debajo de la célula. Es exactamente en este sentido que sostenemos que la vida no se reduce a propiedades físico-químicas, por ejemplo. La vida es un fenómeno que no vemos, sino que lo *concebimos*; si cabe, lo *imaginamos* a cada instante.

Podemos traducir esta idea en los siguientes términos. La enfermedad es algo que vemos (en última instancia, las ciencias de la salud, la medicina y las ciencias de la vida descansan, desde este punto de vista en la patología). Es ulteriormente en la patología en donde, literalmente, se ve la enfermedad. Por el contrario, la salud no es algo que propiamente se vea; se la adivina, se la intuye, se la concibe, si se nos permite esta aproximación.

Digámoslo de forma franca y directa: las ciencias de la complejidad nos ayudan enormemente a pensar lo impensado en la historia de las ciencias de la salud y de las ciencias de la vida: la salud. Estas siempre han pensado únicamente (la) enfermedad: epidemias, pandemias, contagio, morbilidad, mortalidad, y demás. Mientras que la enfermedad es un fenómeno determinado y que hay que determinar, salud es esencialmente indeterminada, abierta. Si apenas llevamos algo más de sesenta años o algo así pensando la vida, llevamos en verdad mucho menos tiempo tratando de pensar (la) salud. La forma tradicional y normal ha sido en términos de “determinantes de la salud” (sic).

Sólo que salud es un caso particular, apasionante y definitivamente significativo de vida. Pero la vida implica incertidumbre, indeterminación, fluctuación, inestabilidades, cambios súbitos, imprevistos e irreversibles, y demás rasgos y atributos propios de los sistemas complejos.

Como se aprecia sin dificultad, las ciencias de la complejidad implican la formación o el desarrollo de una estructura mental.

Hay varias formas de comprender a esta estructura mental, además de lo que se ha dicho hasta el momento:

- Desde el punto de vista metodológico, el estudio de los sistemas vivos no se reduce a una heurística determinada; mucho mejor aun, un rasgo distintivo de las ciencias de la complejidad –acaso único– es el recurso a metaheurísticas (Doerner, et al., 2007). Dicho de manera puntual: se trata de la identificación de problemas exactos con vista en el trabajo en espacios de solución, en la búsqueda de soluciones aproximadas. Como es sabido en la investigación de punta, las soluciones aproximadas son bastante más precisas y óptimas que las soluciones exactas.
- Desde el punto de vista lógico, los sistemas complejos no pueden ya trabajarse, en absoluto, con base en la lógica formal clásica –que es la lógica simbólica, la lógica matemática, la lógica de predicados o la lógica proposicional; cuatro maneras diferentes de apuntar en una sola y misma dirección–. En efecto, la lógica formal clásica es bivalente, y las dinámicas, las estructuras, los comportamientos y las características de los sistemas vivos no pueden reducirse a una estructura mental de bivalencia (1 o 0). Exactamente en este sentido las lógicas no-clásicas<sup>6</sup> resultan de inmensa ayuda en la comprensión de la complejidad (Maldonado, 2017a). A pesar de que, *grosso modo*, hasta la fecha, ni los complejólogos le han puesto atención a las lógicas no-clásicas, ni en general la comunidad de lógicos se interesa en la complejidad.
- De manera muy significativa, la complejidad implica un nuevo tipo de relación con la naturaleza, lo cual, como se observa con facilidad, implica una transformación radical de la estructura mental (y efectiva y emocional, desde luego). Mientras que el modo tradicional de relación con la naturaleza fue en términos de medios a fin, en el que los seres humanos se situaban a sí mismos como externos y superiores a la naturaleza, las ciencias de la complejidad, mucho mejor, el problema de la vida y los sistemas vivos, plantean una transformación radical: la vida no es algo ajeno y distinto a los sistemas abióticos mismos. No existe absolutamente ninguna línea demarcatoria entre sistemas bióticos y abióticos: ambos constituyen un *continuum* vago. La naturaleza emerge como la base de cualquier valor, idea y posibilidad, y éstos se remiten a ella como a la fuente de sentido y significación. Simple: cualquier pelea del ser humano con la naturaleza (= competencia, competitividad, lucha por los recursos naturales, etc.), la lleva perdida el ser humano.
- Desde el punto de vista de la organización del conocimiento, las ciencias de la complejidad permiten y demandan al mismo tiempo otras estructuras y dinámicas diferentes a las habidas tradicionalmente, hasta la fecha. Nuevos conocimientos dan lugar a nuevas formas de organización social del conocimiento. Si la ciencia clásica surge de la mano de las universidades, las nuevas

<sup>6</sup> Ejemplos de lógicas no-clásicas son: la lógica difusa, la lógica polivalente, la lógica modal, la lógica multimodal, la lógica del tiempo, las lógicas paraconsistentes, la lógica de contrafácticos, la lógica cuántica, la lógica doxástica y la lógica epistémica, la lógica dinámica, la lógica de la ficción, la lógica erótica, la lógica alética, y varias más.

ciencias surgen, adicionalmente, en otros espacios alternativos: centros e institutos de investigación, vínculo entre la universidad, el sector privado, la sociedad civil y el sector público, en formas perfectamente horizontales de cooperación. La fenomenología al respecto es reciente, pero altamente sugestiva.

- Desde el punto de vista semántico, nuevos conceptos, nuevas categorías, pero también nuevas metáforas y símiles emergen y se acuñan con la intención de aprehender idóneamente los nuevos fenómenos, sistemas y comportamientos que tenemos ante nosotros, con nosotros. Es constante la aparición de nuevas expresiones que combinan muy bien lógica y metodología por un lado, y tropología (esto es, metáforas, símiles, sinécdoques, metonimias, y otras figuras literarias) por el otro. Los neófitos en el estudio de la complejidad son particularmente sensibles a esta circunstancia. Deben aprender nuevos lenguajes, nuevos términos, en fin, una nueva estructura mental.
- El modelamiento y la simulación constituyen la forma más acabada de las nuevas revoluciones científicas y tecnológicas en curso. Hoy por hoy es prácticamente imposible trabajar en investigación de punta al margen del dominio de lenguajes de programación y la incorporación de modelamientos y simulaciones. La apariencia pudiera dar la sensación de que se trataría aquí de un reduccionismo computacional (o informacional). Sin embargo, el aprendizaje de lenguajes de programación constituye un rasgo estructural –por ejemplo, generacional– que permite establecer un contraste en ciencia clásica y ciencia de punta. Esta afirmación llega hasta tal punto que, por ejemplo, es cada vez más difícil hacer ciencia e investigación de punta al margen de la ciencia de grandes bases de datos; la analítica de datos, por ejemplo. Y esto es así, aunque la ciencia de grandes bases de datos no tiene nada que ver con complejidad.

Estas caracterizaciones de las nuevas estructuras mentales que implican las ciencias de la complejidad no quieren ser exhaustivas, pero sí apuntan en una dirección precisa que permite ver contrastes, matices, gradientes, en fin, forma y dinámicas novedosas y diferentes de las tradicionales.

## 5. CONCLUSIONES

Este texto ha avanzado una tesis fuerte. Las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida. Se han aportado argumentos, señalamientos, indicios, pruebas, evidencias de distinto grado y modo. La buena ciencia no se hace con base en la construcción de consensos y acuerdos. Por el contrario, la buena ciencia consiste en desplazar el foco de la mirada, sugerir inflexiones y pliegues, en mostrar intersticios y rizomas, si cabe la expresión.

La masa crítica de las ciencias de la complejidad es creciente. Cada vez más eventos académicos, publicaciones, revistas y libros aparecen en el mundo. Existen

magníficos vectores en las redes sociales dedicados enteramente a la complejidad (redes complejas, inteligencia artificial, vida artificial, y otros). No existe prácticamente ninguna gran universidad en el mundo que no tenga ya grupos de investigación dedicados a la complejidad, y se han creado estudios de posgrado a niveles diferentes, así como centros e institutos de diversa índole dedicados al tema. Pero es igualmente cierto que las ciencias de la complejidad son aún ciencia alternativa, disidente, marginal. La ciencia normal predomina ampliamente, la financiación de la investigación está muy ampliamente dedicada a ella, en fin, los currículos en todos los niveles de la educación abundan en disciplinariedad, determinismo, reduccionismo, linealidad, la búsqueda de máximos, el trabajo con óptimos, etc.

Nos encontramos, según parece, en medio de una auténtica revolución científica, actualmente. ¿Vale recordar con Kuhn (1992; capítulo décimo) que toda revolución científica es también una revolución política? Lo que es evidente es que en las revoluciones, algunas veces, algunos, con las razones equivocadas están en el bando correcto; y en otras ocasiones, otros, con las razones correctas están en el bando equivocado. Desiderativamente debería ser posible que quienes están con las razones correctas estén en el bando correcto. Pero esto se dice fácilmente. Hay fuertes dinámicas sociales que complican enormemente la situación.

Cada época desarrolla la ciencia que puede, y cada época desarrolla la ciencia que necesita. Es absolutamente evidente que el más sensible de todos los problemas del mundo contemporáneo consiste en entender a los sistemas vivos, en explicar la vida, en fin, en comprender cómo la vida emergió y cómo se hace posible. Pero, al mismo tiempo, de forma paralela, es evidente que nos encontramos en un cuello de botella. Los más importantes, inteligentes, peligrosos y trágicos problemas tienen que ver hoy por hoy con el calentamiento global, la sexta extinción masiva en curso, la desertificación y la tala de bosques, la acidificación de los mares, la polución y la contaminación en todas sus formas y niveles, la sobrepoblación, la inequidad, la pobreza, y la injusticia, para mencionar tan sólo los más inminentes. Por primera vez desde que aparecieron esos homínidos que se llaman a sí mismos *Homo sapiens sapiens*, ha llegado a ser evidente que su futuro no está asegurado de ninguna manera, y ciertamente no de una vez y para siempre. Los seres humanos se han puesto en peligro de extinción a sí mismos, conjuntamente con la depredación de la naturaleza y la extinción en masa de numerosas otras especies. Los seres humanos han roto todos los balances y equilibrios de la naturaleza. En fin, la vida es algo que ya no va de suyo, y su futuro no está garantizado en el corto o en el mediano plazo, en manera alguna.

Hoy, comprender la vida es una sola y misma cosa que comprender cómo puede ser posible y cada vez más posible. Digámoslo de forma directa y contundente: estamos comenzando a considerar la posibilidad de pensar como la naturaleza, y no ya simplemente como seres humanos, en cualquier acepción de la palabra. Un problema de la máxima complejidad conocida. Las ciencias de la complejidad corresponden exactamente a esta época que mencionamos, a estos desafíos y retos. Y creemos que, así, las ciencias de la complejidad tienen sentido. Al fin y al cabo, el tema de base, por primera vez, en toda la escala de la palabra, en cualquier marco

o dimensión que se prefiera, aunque siempre con énfasis y modos propios, la vida es el problema filosófico y científico *par excellence*. Jamás la humanidad se había enfrentado a escala global con un grupo de cuestionamientos semejantes.

Las ciencias de la complejidad tienen como finalidad comprender la vida, cómo surgió y cómo se ha hecho posible, su diversidad y pluralidad, sus retos, límites y desafíos. Por primera vez, una expresión de la vida no es más importante que la demás, pues todas se implican recíproca y necesariamente. Lo dicho: son ciencias de la vida. Una expresión reciente que demanda, hacia futuro, de ulteriores elaboraciones y desarrollos.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Acot, P., 2005. *Historia del clima. Desde el big bang a las catástrofes climáticas*. Buenos Aires: Ed. El Ateneo.
- Bak, P., 1996. *How nature works. The science of self-organized criticality*. Springer Verlag.
- Barabási, A.-L., 2003. *Linked. How everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life*. New York: Plume Book.
- Barabási, A.-L., 2011. *Bursts. The hidden patterns behind everything we do, from our e-mail to bloody crusades*. New York: Plume Books.
- Barrat, A., Barthélemy, M. & Vespignani, A., 2008. *Dynamical processes on complex networks*. Cambridge University Press.
- Bedau, M. A., and Cleland, C. E., (Eds.), 2010. *The nature of life. Classical and contemporary perspectives from philosophy and science*. Cambridge University Press.
- Brockman, J., 1991. *The third culture: beyond the scientific revolution*. New York: Touchstone.
- Byrne, D. & Callaghan, G., 2014. *Complexity theory and the social sciences: The state of the art*. London and New York: Routledge.
- Casti, J., 1998. Complexity and aesthetics. *Complexity*, 3(5), may/june, pp. 11–16.
- Chaisson, E. J., 2000. *Cosmic evolution. The rise of complexity in nature*. Oxford University Press.
- Christian, D., 2005. *Mapas del tiempo. Introducción a la "gran historia"*. Barcelona: Crítica.
- Couloubaritsis, L., 2014. *La philosophie face à la question de la complexité. La défi majeur du 21e siècle. Tome 1: Complexités. Intuitive, archaïque et historique. Tome 2: Complexités scientifique et contemporaine*. Bruselas: Ousia.
- Cowan, G. A., Pines, D. & Meltzer, D., 1999. *Complexity. Metaphors, models, and reality*. Cambridge, MA: Perseus Books.
- Doerner, K. F., Gendreau, M., Greistorfer, P., Gutjahr, W. J., Hartl, R. F., Reimann, M., (Eds.), 2007. *Metaheuristics. Progress in complex systems optimization*. Springer Verlag.
- Eco, U., 2010. *El nombre de la rosa*. Madrid: Penguin-Random House.
- Érdi, P., 2008. *Complexity Explained*. Berlin: Springer Verlag.
- Gell-Mann, M., 2005. *El quark y el jaguar. Aventuras entre lo simple y lo complejo*. Barcelona: Tusquets.
- Gleick, J., 2008. *Chaos. Making a new science*. Penguin Books.
- Hey, T. & Pápay, G., 2014. *The Computing Universe*. Cambridge University Press.
- Holland, J., 1995. *Hidden order: How adaptation builds complexity*. Reading, MA: Perseus Books.

- Holland, J., 1998. *Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Jablonka, E. & Lamb, M. J., 2004. *Evolution in four dimensions. Genetic, epigenetic, behavioral, and symbolic variation in the history of life*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Jacob, F., 2015. *El juego de lo posible*. México, D.F.: FCE.
- Kauffman, S., 1995. *At home in the universe. The search for the laws of self-organization and complexity*. Oxford University Press.
- Kauffman, S., 2000. *Investigations*. Oxford University Press.
- Kuhn, T.S., 1992. *La estructura de las revoluciones científicas*. México, D.F.: FCE.
- Lewin, R., 1994. *Complejidad. El caos como generador del orden*. Barcelona: Tusquets.
- Lineweaver, Ch.H., Davies, P.C.W. & Ruse, M., (Eds.), 2013. *Complexity and the arrow of time*. Cambridge University Press.
- Lloyd, S., 2007. *Programming the universe: A quantum computer scientists takes on the cosmos*. Vintage Books.
- Lorenz, E., 2000. *La esencia del caos. Un campo de conocimiento que se ha convertido en parte importante del mundo que nos rodea*. Madrid: Debate.
- Maldonado, C.E., 2016a. *Complejidad de las ciencias sociales. Y de las otras ciencias y disciplinas*. Bogotá: Ed. Desde Abajo.
- Maldonado, C.E., 2016b. El evento raro. Epistemología y complejidad. *Cinta de Moebio. Revista de Epistemología de Ciencias Sociales*, 56, pp.187–196. Disponible en el sitio web: <http://www.moebio.uchile.cl/56/maldonado.html>.
- Maldonado, C.E., 2017a. *Pensar. Las lógicas no-clásicas*. Bogotá: Ed. Universidad El Bosque.
- Maldonado, C.E., 2017b. Hipercomputación biológica y comunicación entre los seres vivos. En: Arboleda, L.C., (ed.), *Un Festschrift para José Luis Villaveces*. Bogotá: Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, pp.109–124.
- Maldonado, C.E. & Gómez-Cruz, N., 2015. Biological Hypercomputation: A New Research Problem in Complexity Theory. *Complexity*, 20(4), pp.8–18.
- Maturana, H. y Valera, F., 1998. *El árbol del conocimiento. Las raíces biológicas el entendimiento humano*. Santiago de Chile: Lumen
- Mitchell, M., 2009. *Complexity. A guided tour*. Oxford University Press.
- Mitchell, S.D., 2003. *Biological complexity and integrative pluralism*. Cambridge University Press.
- Monod, J.L., 2015. *El azar y la necesidad. Un ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna*. Barcelona: Tusquets.
- Moore, D.S., 2015. *The developing genome. An introduction to behavioral epigenetics*. Oxford University Press.
- Morris, I., 2016. *¿Por qué manda Occidente... por ahora?* Barcelona: Ático de los libros.
- Nowak, M.A., 2011. *Supercooperators: Altruism, evolution, and why we need each other to succeed*. New York: Free Press.
- Page, S.E., 2011. *Diversity and complexity*. Princeton University Press.
- Pagels, H., 1991. *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa.
- Prigogine, I. y Stengers, I., 1983. *La nueva alianza. La metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza Universidad.
- Rescher, N., 1998. *Complexity: A philosophical overview*. London: Routledge.
- Rosnay, J. de., 1993. *Los senderos de la vida*. México, D.F.: FCE.

- Ruelle, D., 1995. *Azar y caos*. Madrid: Alianza Editorial.
- Schrödinger, E., 2000. *¿Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets.
- Schryock, A., and Lord Smail, D., 2011. *Deep history. The architecture of past and present*. Berkeley: University of California Press.
- Scott, A. C., 2007. *The Nonlinear Universe: Chaos, Emergence, Life*. Berlin: Springer Verlag.
- Snow, C.P., 2012. *The two cultures*. Cambridge University Press.
- Solé, R. & Goodwin, B., 2000. *Signs of life. How complexity pervades biology*. New York: Perseus Books.
- Stewart, I., 1998. *Life's other secret: The new mathematics of the living world*. Wiley.
- Strogatz, S., 2003. *Sync: How order emerges from chaos in the universe, nature, and daily life*. New York: Hyperion.
- Volk, T., 1998. *Gaia's Body: Toward a Physiology of Earth*. New York: Springer Verlag.
- Waldrop, M.M., 1993. *Complexity. The emerging science at the edge of order and chaos*. New York: Touchstone Book.
- Watts, D., 2004. *Six Degrees. A science of a connected age*. New York/London: W.W. Norton & Co.
- Wilson, E.O., 2012. *The social conquest of Earth*. New York/London: W. W. Norton & Co.