

Capítulo 1

¿Qué son las ciencias de la complejidad?

Filosofía de la ciencia de la complejidad

Carlos Eduardo Maldonado Castañeda*

Introducción

Vivimos en un mundo irregular, moteado, imperfecto. La regla no es la regularidad, sino, en términos cotidianos, el anonimato: muchos de los días de los seres humanos son anónimos, indiferentes, que al cabo del tiempo terminan por olvidarse y, por así decirlo, como si nunca hubieran existido. Desde el punto de vista de la ciencia, el mundo ha sido objeto de estudio en términos de fenómenos simples y controlados. Es más, perfectamente controlados en el laboratorio. En numerosas ocasiones –muchísimas, de verdad–, lo que sucede con éxito en el laboratorio (desde la física en general hasta la biología molecular, desde la química hasta la ciencia de materiales, por ejemplo) difícilmente ocurre de la misma manera en el mundo real.

No obstante, el sentido de la ciencia y de la cultura consiste en encontrarle sentido a lo que no lo tiene –una preocupación que, en realidad, heredamos del siglo XIX: la preocupación por el sentido–. Así, tanto la ciencia como la cultura –particularmente el arte, en su sentido más amplio– buscan, descubren, encuentran patrones, regularidades y leyes en un mundo esencialmente

* Filósofo de la Universidad del Rosario. Ph.D. en Filosofía por la K.U. Leuven (Bélgica). Postdoctorado como Visiting Scholar en la Universidad de Pittsburgh (EE.UU). Postdoctorado como Visiting Research Professor en la Catholic University of America (Washington D.C.). Postdoctorado como Academic Visitor – Visiting Scholar, Facultad de Filosofía, Universidad de Cambridge (Inglaterra). Profesor titular de la Universidad del Rosario.

sorpresivo, que sucede, en rigor, a la manera del puntillismo o del impresionismo.¹

Los seres humanos llevan a cabo esquemas de la realidad –algo que ha sido puesto de manifiesto por ejemplo por parte de Kant o Piaget, con la teoría de la *Gestalt*, y que M. Merleau-Ponty desarrolla a su manera por una vía propia. Vamos por el mundo cargados de pre-comprensiones (Heidegger), y descubrimos que toda explicación es tan sólo una interpretación (Husserl); además, que esos esquemas, pre-comprensiones, formas y pre-juicios son suficientes en la vida común y corriente –incluyendo a las profesiones, los oficios e incluso a numerosas disciplinas y ciencias. En el mundo contemporáneo, esta clase de situaciones se ven reforzadas por el papel –dominante, a todas luces– de los medios masivos de comunicación como formadores, gestores y controladores de opinión.

Desde el punto de vista pragmático, vivir de esta manera y explicar el mundo en términos semejantes es suficiente, específicamente para efectos de supervivencia. Al fin y al cabo se trata de la asimilación de los individuos a la fuerza de la especie, mejor aún, a la robustez de la manada, del cardumen, del enjambre.

En este estado de cosas, la ciencia en general –es decir, la ciencia moderna– contribuye ampliamente a continuar, por otros medios, el *dictum* de Aristóteles: sólo es posible hacer ciencia de lo universal. La mejor vía para lograrlo es y siempre ha sido la simplificación y la aproximación. Simplificación de los experimentos y control de la realidad; aproximación a la realidad.

Desde el punto de vista práctico, a la ciencia teórica o abstracta que insiste en que en el mundo las cosas son (*exclusivamente*) simples, le corresponden cuatro herramientas –por así llamarlas– altamente útiles y efectivas: la ética, la religión, el derecho y la educación. Su función es normativizar, disciplinar y ponerle límites y condiciones a las posibilidades de acción y de pensamiento de los seres humanos. En un lenguaje abstracto, a su manera, E. Husserl decía que las ciencias de hechos crean hombres de hechos–;² asimismo, a una ciencia simplificadora, controladora y reduccionista le corresponde una religión, una

¹ Véase N. Cartwright (2005).

² *Tatsachen Wissenschaften machen Tatsachenmenschen*, dice Husserl en la *Crisis de las ciencias europeas y la filosofía fenomenológica*. Esta idea quiere decir que la ciencia que ve al mundo en términos eminentemente positivistas le enseña a ver a los seres humanos al mundo asimismo. Y puesto que por lo general pensamos el mundo en correspondencia con las teorías que tenemos acerca del mundo,

ética, un derecho y una educación –como sus instrumentos fundamentales y estratégicamente más importantes para el orden práctico– igualmente simplificadoras, controladoras y reduccionistas.

En medio de este panorama surgió lo que en su momento P. Ricoeur denominó con acierto una “escuela de la sospecha”: sospecha de las verdades heredadas, sospecha de las verdades sin más, sospecha de las verdades aceptadas acríticamente. Según Ricoeur, los nombres que enarbolaron y encarnaron estas actitudes filosóficas radicales fueron: C. Marx, F. Nietzsche y S. Freud.

La lista puede y debe ampliarse sin dificultad ni discusión alguna con dos o tres nombres más. Uno de ellos es K. Gödel, quien produce la crisis más importante de la historia en cuanto a la forma predominante de racionalidad de la humanidad occidental. Esta crisis continúa hasta la fecha, cerca de setenta años después. Dicho de manera directa y puntual, la crisis que representa la obra de Gödel consiste en el reconocimiento de que existen límites sobre lo que podemos conocer (saber).

Si lo anterior tiene sentido, entonces debe ser posible un tipo de ciencia que se corresponda con el mundo tal y como es, y no simple y llanamente con el mundo tal y como hemos creído que es o como hemos querido que sea: simple, regular, estable, fijo, periódico. Como se adivinará, esta ciencia es precisamente aquella que se ocupa de lo que tradicionalmente fue dejado de lado, obliterado, incluso menoscabado o suprimido: los cambios súbitos e irreversibles, las turbulencias, las fluctuaciones –cambios a largo plazo y de gran alcance–, las cosas caóticas o que parecen serlo a todas luces (= caos determinista), y otros semejantes. Un mundo en el que la norma no sea –como no lo son, efectivamente– las formas simples y perfectas (“sólidos perfectos”), sino las formas irregulares, imperfectas (= fractales).

Pues bien, existe un concepto afortunado para designar un mundo con estos y otros rasgos parecidos: complejidad. Vivimos un mundo complejo. Tenemos una ciencia de la complejidad. Mejor aún, tenemos ciencias de la complejidad (en plural). El objetivo de este capítulo es doble: por un lado, se trata de lograr una comprensión transversal, integrada y a profundidad de lo que son las ciencias de la complejidad; por otro, y aún más importante, mostrar y entender la complejidad misma del mundo, para lo cual es indis-

los seres humanos terminan convirtiéndose y actuando de la misma manera, en correspondencia con la cultura predominante, en la que nacen y viven.

pensable elucidar lo complejo mismo y la complejidad. Sería posible pensar, ulteriormente, cómo vivir y actuar en un mundo semejante. Hay algunos libros –usualmente de divulgación– válidos e importantes en esta dirección; no obstante, este no es nuestro objetivo.³

La tesis general que queremos plantear en este capítulo es: las ciencias de la complejidad constituyen la respuesta a una profunda crisis científica, filosófica y cultural que se inaugura con las geometrías no-euclidianas y la obra de Cantor, que atraviesa por las matemáticas de comienzos del siglo xx –D. Hilbert– y que alcanzan su cénit en la obra de Gödel y Turing. En física, es la crisis que representa el modelo de mundo de la física cuántica –en contraste con los modelos físicos anteriores. En filosofía, es el reconocimiento de una profunda crisis cultural y agotamiento espiritual (= cansancio) que se plasma en la obra de Husserl, de Heidegger y de Lévinas. Ulteriormente, esta crisis habrá de producir la llamada “posmodernidad” y su crítica a los meta-relatos de la cultura occidental –arte, ciencia, filosofía, política e historia.

Como resultado, hicimos el aprendizaje de nuevos conceptos, perfectamente anodinos si se los mira con los ojos de la tradición: incertidumbre, no-localidad, caos, complejidad, catástrofes, asimetría, rupturas, quiebres, inestabilidad, riesgo. Por lo pronto, la idea no es ser exhaustivos. Más bien, se trata de mostrar una atmósfera y señalar lo que contiene, lo que existe detrás de ella, incluso lo que vive en ella y gracias a ella. La forma rápida, pero afortunada, de condensarlo es complejidad: ciencias de la complejidad –complejidad del mundo.

Bien entendido, las ciencias de la complejidad *no* son el resultado de la crisis que esbozamos rápidamente; por el contrario, son la respuesta a dicha crisis. Sólo que, como se apreciará por los contenidos y el lenguaje que sigue,

³ Entre la bibliografía al respecto véase J. Briggs y F. D. Peat (1999). *Las siete leyes del caos. Las ventajas de una vida caótica*. Barcelona: Grijalbo. J. Wagensberg (1994). *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets. De hecho, numerosos libros –usualmente de divulgación– terminan el último capítulo o varios párrafos hacia el final tratando acerca de la importancia, consecuencias de una vida en correspondencia con las ideas estudiadas en el contexto de “complejidad”: caos, fractales y demás. Hay que decir que lo más sólido y serio al respecto es el trabajo acerca de complejidad y organizaciones, particularmente en el contexto de la administración (*managment*). Cfr. K. Grint (1997). *Fuzzy Management. Contemporary Ideas and Practices at Work*. Oxford: Oxford University Press. D. R. Gilpin, and P. J. Murphy (2008). *Crisis Management in a Complex World*. Oxford: Oxford University Press. R. Axelrod and M. D. Cohen (1999). *Harnessing Complexity: Organizational Implications of a Scientific Frontier*. New York: The Free Press.

la expresión empleada no es enteramente afortunada. Las ciencias de la complejidad no son *la* respuesta en el sentido de una única respuesta. La expresión debe ser entendida simplemente como con un valor indicativo: se trata de la dirección y el modo en que debemos dirigir la mirada.

Presentamos a continuación los que creemos son los ejes centrales de lo que es o puede ser una filosofía de las ciencias de la complejidad. Cada una de las secciones contiene una tesis singular, de tal suerte que su conjunto establece una base sólida para comprender el estudio de los fenómenos complejos y, sobre todo, para entender (mejor) la complejidad del mundo y de la naturaleza.

Distinción entre pensamiento complejo, pensamiento o enfoques sistémicos y ciencias de la complejidad

Dicho de una manera general, la ciencia y el pensamiento tienen lugar en un marco cultural y en un lenguaje natural determinado. Hoy en día, la mayor parte de la ciencia –en su sentido más amplio– se hace en inglés. La situación no es diferente en el caso del trabajo sobre sistemas complejos. La mayor parte de la bibliografía técnica sobre complejidad está escrita en inglés, en forma de artículos científicos, libros de texto, libros científicos. El español no es aún una lengua mayor cuando de ciencia en general se trata, aunque sí puede serlo, como lo es, en otros campos, como la literatura, el ensayo y los estudios culturales. Es probable que esta situación cambie en el futuro; sin embargo, este es el estado actual de las cosas.⁴

En español –si bien la situación no es exclusiva de este idioma–, existe una confusión general cuando se habla de “complejidad”, particularmente entre el gran público, también entre el público no especializado (incluso esta ambivalencia se da en buena parte del público culto en materia de ciencia o de filosofía). Se trata de la confusión entre tres dominios próximos, pero distintos: el pensamiento complejo, el pensamiento sistémico y las ciencias de la complejidad.

El pensamiento complejo es el tipo de “complejidad” que se define de cara a y en el contexto del pensamiento de Edgar Morin. En rigor, puede decirse que el pensamiento complejo es un método, a saber: aquel que consiste en poner al descubierto un universo cambiante frente al cual la ciencia, el pensamiento o la cultura anteriores o normales ya no son suficientes. El

⁴ Para los párrafos que vienen, véase Maldonado (1999, 2001).

pensamiento complejo es una filosofía antropocéntrica, y consiste en el llamado a cambiar nuestra actitud ante el mundo y la realidad para captarlo como verdaderamente es.

Hay que decir que el pensamiento complejo es la forma más popular —en el sentido sociológico, demográfico y estadístico— de complejidad. Ha sido acogido particularmente por parte de científicos sociales y de las humanidades; así mismo, en varias regiones ha sido considerado como paradigma cálido necesario en la educación. El pensamiento complejo es particularmente fuerte en América Latina y España, lo es menos en Francia, particularmente. En el resto del mundo su importancia no es tan extendida como en estas tres regiones.

Cuando se habla de complejidad en general, existe igualmente la tendencia a confundirla indiscriminadamente con el pensamiento sistémico. Una razón sólida para esta confusión consiste en el hecho de que las ciencias de la complejidad y el pensamiento sistémico comparten buena parte de su vocabulario: sistemas, sinergia, redes, nodos, el todo es mayor que la suma de las partes, centralización/descentralización, etc.

El pensamiento sistémico tiene el mérito de que no solo recusa los enfoques de tipo reduccionista, simplificador y fuertemente disciplinario (es decir, el énfasis o la sobreacentuación de una ciencia o disciplina determinada sobre las demás), sino que, precisamente gracias a ello, logra una aproximación importante al conocimiento y a los temas, objetos o problemas del conocimiento en términos más funcionales e integrativos.

Sin embargo, distintas del pensamiento complejo y del pensamiento (o enfoque) sistémico, las ciencias de la complejidad tienen un significado, una importancia y una extensión perfectamente diferentes y más amplios que los dos anteriores. Así, pues, el objetivo aquí será precisar en qué sentido deben ser comprendidas las ciencias de la complejidad.

Ahora bien, cuando se habla de complejidad —en cualquier idioma— siempre es necesario establecer la distinción entre dos cosas diferentes: “complejo” y “complicado”. La mejor manera de hacerlo es por vía de las reglas del lenguaje. Es absolutamente importante no usar el concepto de complejidad como adverbio o adjetivo —a diferencia de “complicado”. No es bueno, ni necesario ni deseable que las cosas sean complejas, o que se vuelvan complejas. Pero cuando lo son, o se tornan complejas, existe una “caja de herramientas” que nos permiten entender y explicar qué es la complejidad y en qué sentido, có-

mo y por qué son o se han vuelto complejas las cosas –el mundo, la sociedad, la naturaleza. Esta “caja de herramientas” (por ahora es solo una expresión) son precisamente las ciencias de la complejidad.

La manera genérica para referirse al estudio de la complejidad en este tercer sentido es como “teoría de la complejidad” (*theory of complexity*); como se aprecia, ya no como “pensamiento complejo”. Esta primera diferencia hace referencia a un problema profundo del cual nos ocuparemos más adelante, a saber: la diferencia entre “pensamiento” (cuando se refiere, notablemente, a “pensamiento complejo”) y “teoría”, como al rasgo más puntual de la forma en que se hace buen uso del pensamiento racional en la cultura científica y académica contemporánea.

Como quiera que sea, la opción aquí es por las ciencias de la complejidad. Existen varias justificaciones para ello, todas con un elemento o un soporte común. Se trata del hecho de comprender la complejidad en términos de ciencia –y no simple y llanamente como una cosmovisión (pensamiento sistémico) ni como un método del lado del sujeto (que, además, presupone la distinción, arcaica, entre sujeto y objeto).

A fin de precisar, quisiéramos presentar dos ideas al respecto. La primera tiene que ver con la comprensión de ciencia –en el marco de las ciencias de la complejidad–; la segunda, con la distinción entre la ciencia clásica o moderna y las nuevas ciencias –entre las cuales se destacan las ciencias de la complejidad–, objeto de una consideración posterior más cuidadosa en este capítulo.

Tal y como la entendemos hoy en día, la ciencia es un fenómeno moderno. Específicamente, la ciencia nace como resultado del final de la Edad Media, el tránsito a través del Quattrocento y el acceso a la modernidad con la obra de pensadores, filósofos, investigadores y científicos como Loewenhoeck, R. Bacon y F. Bacon. Esto significa que muy difícilmente se puede hablar de ciencia en relación con otros momentos anteriores en la historia de la humanidad –haciendo referencia, por ejemplo, a Egipto, Babilonia, la antigua China, la Grecia antigua o Roma, ni tampoco en el Medioevo, o acaso también en el mundo árabe o también entre los incas, los mayas o los aztecas, para mencionar las tres culturas más importantes de Mesoamérica. Estamos de acuerdo en que en varios de estos casos habría serios motivos de disputa e incluso, hasta cierto punto, de injusticia.

Es cierto que existen numerosos autores que hablan de la ciencia antigua o de la ciencia en el mundo antiguo. Con toda seguridad, el mejor estudio

—tanto por su volumen como por su importancia— es el trabajo de Needham acerca de la ciencia en la antigua China.

La razón de que la ciencia sea un fenómeno esencialmente moderno tiene que ver con su *carácter cultural*. No es suficiente con que haya descubrimientos, invenciones y ni siquiera abstracción para que exista ciencia. Adicionalmente, es preciso que la abstracción, las invenciones y los descubrimientos tengan un claro resorte e impacto —a la vez— en la cultura. Por ejemplo, que modifiquen la visión y la comprensión del mundo a gran escala; o que de la ciencia existente se sigan acciones en diversas escalas y magnitudes —desde la individual hasta la colectiva— en cuyas raíces puedan ser identificadas hasta el tipo de ciencia que existe en dicha sociedad; así mismo, que la ciencia tenga un cierto tipo de correspondencia —no siempre bien identificada, por lo demás— con el arte existente en dicha sociedad o pueblo. En fin, sin ser exhaustivos, es preciso que la ciencia no tenga ningún carácter cerrado, vertical o autoritario, sino que sea una actividad abierta en continuo proceso de corrección, mejoramiento, ampliación, solidificación.⁵

En cualquier caso, tradicionalmente, la ciencia fue definida con criterios medievales; es decir, como género próximo y diferencia específica. La ciencia clásica o moderna se define por estos rasgos (se es abogado porque no se es sociólogo; se es economista porque no se es administrador; se es físico porque no se es biólogo; se es antropólogo porque no se es lingüista, etc.). Es decir, de manera puntual, la ciencia es clásicamente conocida porque se inscribe e instaura en una tradición, tiene un método propio, con un lenguaje, medios y canales propios de publicación y de divulgación, sumado a un corpus específico que lo sustenta.

No en vano casi tan pronto como surge la ciencia moderna, esta se organiza a sí misma como un cuerpo propio y en torno a gremios cerrados: se crea la Royal Society, la Académie Française des Sciences, la Academia de Ciencias de Rusia (San Petersburgo) y otras más —en contraste con, pero al estilo de, las asociaciones medievales de conocimiento como órganos cerrados. En este sentido, I. Prigogine acusó, con razón, el hecho de que tradicionalmente la

⁵ En el marco de la historia y la filosofía de la ciencia, particularmente, pero también en otros como la sociología de la ciencia y la sociología del conocimiento, la antropología de la ciencia, las políticas de ciencia en sentido amplio y ulteriormente en el área de estudios conocida como estudios culturales sobre ciencia y tecnología, este debate ha sido creciente y sensible a la vez. Hay que decir que existe ya un cierto acuerdo básico al respecto, aun cuando la discusión no está concluida

ciencia se definió como preservación del conocimiento de la sociedad. Esta solo podía –y puede hoy en día– acceder al conocimiento a través de una serie de pruebas que le permitía demostrar su capacidad para conservarlo y mejorarlo una vez se había hecho merecedora y lo había adquirido.

De suerte que el conocimiento se dividió, desde siempre, en dos tipos: esotérico y exotérico: este dedicado a aquellos que disponen del conocimiento, que pueden tener en virtud de criterios selectivos previamente establecidos y siempre sin consulta; aquel, a los más privilegiados y que han dado muestras suficientes de merecerlo. En Occidente, la primera –o por lo menos la más famosa– de estas formas de organización, selección y jerarquización del conocimiento fue la hermandad creada por Pitágoras, quien distinguía entre los *matematikoi* –los miembros de la secta pitagórica– y los *akousmatics*, aquellos que tan solo podían acceder a un conocimiento cualitativamente inferior. La historia subsiguiente en Occidente es suficientemente conocida. Platón impondrá la idea de que “quienes no conocen matemática (geometría), no pueden acceder a la Academia”. Se crean la Academia, el Liceo, la Stoa y la Universitas. En todos los casos, para acceder al conocimiento primero y mejor es indispensable pasar por varias pruebas. Semióticamente hablando, no existe ninguna diferencia entre las sociedades secretas y las sociedades discretas.

Pues bien, es posible caracterizar a la ciencia contemporánea por diversos rasgos. La ciencia es, o implica:

- Una forma de organización del conocimiento.
- Una forma de organización social.
- Un lenguaje.
- Una técnica o tecnología.
- Un método.
- Una forma de acción sobre el mundo.

Queda manifiesto que estas caracterizaciones son eminentemente funcionales, lo cual significa que la ciencia no se define ni como una posesión o adquisición (la ciencia hoy ya no es algo que se sepa; por el contrario, es algo que se hace, y se hace haciendo investigación), ni como un fin en sí misma.

Dicho lo anterior, es necesario establecer que las ciencias de la complejidad tienen un carácter híbrido. Ciertamente, esta no es una característica exclusiva de este grupo de ciencias, puesto que otros grupos de ciencia y

conocimiento de punta tienen este mismo carácter. Con esto se quiere decir que el estudio de la complejidad exige un abordaje no-disciplinar de los temas, problemas, fenómenos y sistemas de que se ocupa, y que la interdisciplinariedad resultante implica, por primera vez en la historia de la humanidad, el reconocimiento expreso de que no existe una jerarquía de conocimientos; en el mejor de los casos, se puede hablar de complementariedad, a condición de que se entienda en su sentido preciso: es decir, no aditivamente, sino como el reconocimiento de que diversas metodologías, lenguajes y explicaciones pueden aportar modos diversos, igualmente válidos, en el diálogo con otras ciencias y disciplinas.

Esta idea merece ser subrayada. El estudio de la complejidad, como de hecho ocurre en la ciencia contemporánea de punta, no debe ser entendido de manera relativista o ecléctica –en el sentido vulgar de la palabra–; es decir, como un asunto de puntos de vista, de capricho o de conveniencia. Una lectura semejante proviene de algunos sectores ortodoxos y atrasados que aún claman por afirmar un conocimiento determinado como mejor o más privilegiado sobre otros; o también, desde otra perspectiva, la afirmación de que determinados autores, corrientes de pensamiento o escuelas son mejores, preferibles o prioritarios frente a otros –arguyendo justificaciones diversas, todas las cuales descansan ulteriormente en argumentos de autoridad.

Así mismo, es importante evitar expresiones fáciles como “la complejidad del mundo” o “la complejidad de la sociedad”. No es cierto que todo el mundo sea complejo, sin más; tampoco lo es que las ciencias de la complejidad se ocupan de todo el mundo, de toda la naturaleza o de toda la sociedad, por ejemplo. Una ciencia o una teoría que explica todas las cosas no explican nada. Así también, luego de un estudio cuidadoso de la realidad, es evidente que asistimos a una mezcla –sutil, ciertamente– entre simplicidad y complejidad, entre azar y necesidad, entre control y libertad. Pues bien, una reflexión minuciosa sobre los fenómenos del mundo pone de manifiesto que hay momentos e instancias en que las herramientas de las ciencias de la complejidad no son necesarias. Hay numerosos casos en los que la ciencia normal es mejor, más eficaz y necesaria que los conceptos propios de complejidad. Esto debe ser de reconocimiento obligatorio. No obstante, se trata de mantener una conciencia vigilante (como decía Husserl) acerca de cuándo, cómo y por qué lo mejor del conocimiento tradicional y habitual ya no tiene cabida, ya no es suficiente para formular un problema, y mucho menos para

resolverlo. Entonces es altamente factible que la complejidad pueda hacer su entrada en escena. Si es así, los científicos e investigadores en complejidad deben conocer perfectamente la obra, todos los parlamentos, y manejar de manera excelsa su propio papel como el mejor.

En efecto, es importante atender el hecho de que los enfoques, metodologías, lenguajes y conceptos de la complejidad tienen una extensión propia, un espacio específico y una función singular, a saber: explicar y actuar en los dominios en los que aparecen fluctuaciones, turbulencias, inestabilidades, irreversibilidad de la flecha del tiempo, emergencias, y cuando la razón humana se siente verdadera, auténticamente *sorprendida*. Pues la sorpresa constituye, con seguridad, el rasgo de familia de las ciencias, disciplinas y programas de investigación que conforman las ciencias de la complejidad.⁶

Origen de las ciencias de la complejidad: el problema, el concepto, la organización académica y científica de la complejidad

Las ciencias de la complejidad nacen a partir del mejor desarrollo que en un momento determinado tenían ciencias como la física, la biología, las matemáticas o las ciencias de la computación. Desde este punto de vista, existe la crítica (superficial) de que el lenguaje de la complejidad está fuertemente permeado por un cierto fisicalismo, biologismo, matematicismo o computacionalismo. Por lo general, esta crítica proviene de algunas personas que se han formado en el marco de las ciencias sociales y humanas.

La razón por la que las ciencias de la complejidad se originan en este marco tiene que ver con una doble circunstancia. Por un lado, se trata del hecho de que, tradicionalmente, las ciencias sociales y humanas han padecido un cierto sentimiento de inferioridad con respecto a las ciencias llamadas duras o positivas. Con seguridad, la principal razón para esta baja autoestima tiene que ver con la escasa formación en matemáticas por parte de los científicos sociales y de las humanidades, y por la sobre-acentuación de la importancia de las matemáticas por parte de grupos de científicos (que en el cuerpo de las ciencias sociales se hace evidente del lado de los economistas, particularmente de la economía clásica y neoclásica). No sin razón, C. P. Snow hizo hace ya

⁶ Cfr. Maldonado, C. E. (2004). "Explicando la sorpresa. Un estudio sobre emergencia y complejidad", en: Autores varios, *Causalidad o emergencia. Diálogo entre filósofos y científicos*. Bogotá: Universidad de la Sabana/Sociedad Colombiana de Filosofía de la Ciencia, pp. 31-63.

varias décadas la descripción de las dos culturas: la científica y las humanidades, y en consonancia con esta preocupación, I. Prigogine elevó el llamado a un nuevo matrimonio (“nueva alianza”) entre ambas culturas. La forma genérica como se ha designado a este encuentro entre ciencias y humanidades ha sido, por ejemplo, en términos de una “tercera cultura” (Brockman).

Por otra parte, las llamadas ciencias duras y la tecnología –particularmente la ingeniería– han tenido un amplio prestigio social, académico, político y económico –por no decir incluso militar, financiero y estratégico– frente a las ciencias sociales y humanas. Este prestigio fue decisivo para la creación –organizacional y administrativa– de las ciencias de la complejidad.

Podemos decir, entonces, que las ciencias de la complejidad han tenido dos orígenes: uno científico y filosófico, y otro administrativo-organizacional. Comencemos por el segundo.

El origen organizacional de las ciencias de la complejidad ha sido muy bien presentado en el libro clásico de Waldrop (1993), Lewin (1992). Desde otra perspectiva, en el caso particular del caos, el libro de J. Gleick (1989) es particularmente hermoso e ilustrativo. Se trata de dos trabajos periodísticos –en el mejor sentido de la palabra– que dan cuenta de los personajes, circunstancias, modos, motivaciones e historia que condujeron a la creación del Instituto Santa Fe (ISF), en Nuevo México (Estados Unidos), considerado como el más relevante y popular centro de investigación en el mundo dedicado al estudio de la complejidad.

El ISF fue creado gracias al apoyo de Los Alamos National Bank y del Citicorp –la cabeza del City Group–, en 1984 a partir de una iniciativa liderada por prestigiosos científicos, entre los cuales varios ya habían logrado un Premio Nobel, como M. Gell-Mann, K. Arrow, P. Anderson, B. Arthur, G. Cowan, a quienes se sumaron otros científicos como S. Kauffman, C. Langton, R. Axelrod, J. Holland. Es importante reconocer que varios de ellos trabajaban en el Instituto de Estudios Avanzados (IAS) de la Universidad de Princeton, que es, en rigor, la epidermis de la Corporación Rand (Research and Development), considerada como la verdadera dendrita de muchos de los programas científicos y tecnológicos más estratégicos desarrollados en Estados Unidos, entre los cuales se incluye el famoso Proyecto Manhattan que habría de producir la bomba atómica. De acuerdo con testimonios de varios de los fundadores del ISF reunidos en el libro de Waldrop (1993), el IAS no ofrecía ni la libertad ni las condiciones apropiadas de investigación y

trabajo conducentes al estudio de fenómenos no-lineales, emergentes, caóticos, autoorganizativos, hecho que habría de ser el desencadenante para la creación del ISF, por fuera, al margen e independiente del IAS.

En rigor, hay que decir que antes del Instituto Santa Fe ya existían otros centros de investigación de punta dedicados al estudio de la complejidad o, lo que es equivalente, de los sistemas y fenómenos no-lineales. En 1978 se había creado el Centro de Estudios para la Dinámica No-lineal en el Instituto La Jolla; a comienzos de los años ochenta, el Instituto Santa Cruz para la Ciencia No-lineal, a partir del Colectivo de Caos de Santa Cruz; en 1980, el Centro para Estudios No-lineales, en el Laboratorio Nacional de los Álamos; en 1981, el Instituto para la Ciencia No-lineal en la Universidad de California, en Davis; posteriormente, en 1984, el Instituto Santa Fe, que alcanza mayor notoriedad y a partir del cual se crean otros centros e institutos dedicados a la complejidad alrededor del mundo, hasta la fecha. El SFI acuña el concepto técnico de ciencias de la complejidad, término que reúne o en el que se condensa el estudio sobre caos, fractales, no-linealidad, autoorganización, turbulencia, inestabilidad, fluctuaciones, catástrofes, redes, emergencia e irreversibilidad.

Existe una diferencia importante entre el ISF y los institutos y centros de investigación anteriores a él. Tal diferencia consiste en que estos son instancias altamente especializadas y, por definición, cerradas, en tanto que el ISF fue concebido como una interfase entre diversas universidades y centros de investigación, entre la academia y el sector público, incluso entre la academia y el sector privado. Hasta la fecha, se trata de un instituto descentralizado que opera “desde abajo”, es decir, a partir de la iniciativa de profesores e investigadores –desde luego, siempre con una altísima calidad intelectual y académica.

Si atendemos a las fechas de fundación de los primeros institutos y centros de investigación en torno a complejidad y no-linealidad, resulta evidente que, en términos demográficos, llevamos apenas algo más de una generación estudiando de manera sistemática y a profundidad el conjunto de temas, problemas, retos y desafíos que se condensan en el título “complejidad”. Para la sociología de la ciencia, la historia de la ciencia, los estudios sociales sobre ciencia y tecnología y las políticas de ciencias y tecnología, en particular, este dato resulta ser de una importancia enorme, con amplias consecuencias en varios planos. Debemos dejar aquí de lado el estudio de las implicaciones de este hecho, pero es claro que no escapan a una mirada reflexiva y cuidadosa.

El hecho de que el tiempo de trabajo sistemático, organizado –administrativa y financieramente– alcance hasta la fecha algo más de una generación resulta más sensible cuando se lo sitúa en espacios y contextos menos desarrollados, como los de América Latina.⁷ Pero es claro que en educación como en ciencia no existe ni es posible una historia lineal de crecimiento y desarrollo, de tal suerte que es posible alcanzar y recuperar niveles de excelencia mundial a condición de que haya incentivos y facilidades de distinto tipo hacia las comunidades académicas y científicas.

Ahora bien, mientras que el origen organizativo de las ciencias de la complejidad ha sido uno –o por lo menos, un único nicho que, grosso modo, se sitúan en un lustro–, el tema del origen histórico, o mejor aún, histórico-científico del estudio de los fenómenos, sistemas y comportamientos complejos resulta mucho más complicado.

La primera tesis que queremos establecer es que las ciencias de la complejidad tienen más de un origen histórico. Queremos mostrar aquí cuatro orígenes distintos, pero históricamente entrelazados entre sí: la filosofía y el cálculo; la importancia de las demostraciones de imposibilidad; la biología y la termodinámica, y las matemáticas y la lógica.

De acuerdo con G. Chaitin, el origen de la complejidad se encuentra en la obra de Leibniz, en particular en el cálculo –diferencial e integral. En efecto, el problema filosófico de base en el desarrollo del cálculo es el carácter de la realidad, según si es continua o discreta; con ello, el tema mismo de la determinación de los límites del conocimiento.

Chaitin no duda en identificar a Leibniz como la fuente misma de las ideas de información digital, la complejidad del tamaño de un programa y la aleatoriedad o irreducibilidad algorítmica. Para ello se remite a la pregunta filosófica fundamental en toda la obra de Leibniz: ¿por qué hay algo y no nada?⁸ La clave no solo se encuentra en la pregunta misma, sino en la res-

⁷ Existe una excepción notable del cuerpo de conocimiento de las ciencias de la complejidad en América Latina. Se trata de los desarrollos rápidos, sólidos y autónomos del estudio de la lógica en general –y con ella de las relaciones entre lógica y matemáticas–, y en particular de varias lógicas no-clásicas; notablemente de la lógica paraconsistente. No sin razón, se habla de la Escuela Brasileña, creada a partir del trabajo de N. da Costa y cuyo epicentro es el Centro de Lógica y Epistemología de la Universidad de Campinas.

⁸ Cabe recordar que Heidegger también habrá de convertir esta pregunta/problema en la base de su crítica a toda la metafísica occidental y con ello mismo en una de las puertas de acceso a uno de

puesta que aporta Leibniz: “Porque nada es *más simple* y más fácil que algo” (Leibniz, citado por Chaitin, 2007, p. 59). Pero ¿cuál es el significado de esta idea desde el punto de vista de complejidad? Más exactamente, ¿en dónde se encuentra la complejidad de esta idea, de la respuesta de Leibniz?

Heidegger entiende la pregunta (aunque nunca se refiere a la respuesta) de Leibniz en términos de realidades que existen sin ninguna razón, por cuanto hay otras —él pensaba en el ser humano— que para existir no solo buscan razones, sino que necesitan razones para existir. En lenguaje científico, el tema de base de Leibniz consiste en establecer la diferencia entre un mundo gobernado por leyes y otro que carece de ellas. Como se recordará, la ciencia moderna funda la explicación de la necesidad de algo en términos de las leyes que lo rigen.

Por tanto, el tema se encuentra en la determinación de la medida de la complejidad en términos de datos —*facts*— (la flor existe sin razón: he ahí un hecho) y la complejidad de los datos que se intenta explicar. Para Leibniz —notablemente en su *Teodicea*—, la clave del problema consiste en entender que si las ideas son simples, vivimos en un universo altamente complicado que es el resultado de la mente de Dios. En palabras de Chaitin: *Dios minimiza las ideas y maximiza el universo*.

El problema no es otro que determinar la comprensión misma de las ideas que buscan explicar la complejidad del universo. Dicho de una manera general, estas ideas están armadas en términos de cálculo y buscan dirimir el conflicto entre lo continuo y lo discreto. Leibniz apunta en la dirección correcta, pero su época no le suministra las herramientas suficientes para explicar la no-linealidad del universo. Estas herramientas consisten, esencialmente, en el computador.

La dificultad sociológica de este (primer) origen de las ciencias de la complejidad radica en el hecho de que en la época de Leibniz no existía el computador, la herramienta (conceptual) idónea que, literalmente, nos permitirá *ver* fenómenos y dinámicas caracterizadas por complejidad. En otras palabras, el computador nos permitirá ver, literalmente, la no-linealidad. Esta idea será planteada de manera directa y sencilla por H. Pagels (1989):

los temas más sugestivos de su filosofía: el tema del pensar. Sólo que para Heidegger la pregunta de Leibniz se formula de otra manera: “¿por qué el ser y no la nada?”. Cfr. *¿Was heisst Denken?*

la complejidad se funda en el computador y al mismo tiempo se constituye en un factor de desarrollo de la computación.⁹

De acuerdo con Chaitin (2007), el computador es un nuevo concepto matemático y filosófico que modifica la epistemología y el modo mismo de comprender un fenómeno determinado. Si ello es así, entonces podemos afirmar que el computador no es simplemente un instrumento; es una herramienta conceptual, por cuanto tiene sintaxis, semántica, lógica (binaria; booleana, por ejemplo), memoria –de corto y de largo alcance–, y sirve para comprimir, programar y computar. Para Chaitin, comprender significa ser capaces de programar algo. Hay que decir que esta idea no implica un reduccionismo computacional, ni tampoco es descabellada. En un contexto distinto, J. de Rosnay sostiene que si no se comprende algo, la mejor manera de hacerlo consiste en construirlo. De hecho, es posible decir que toda la historia de la matemática se sitúa exactamente en este mismo orden de ideas.

Este primer origen de las ciencias de la complejidad –Chaitin jamás se refiere a algo semejante como “ciencias de la complejidad”– puede ser comprendido con un concepto inventado por E. Fredkin: *filosofía digital*, del cual se apropia G. Chaitin, en cuya tradición se incluiría también el libro *A New Kind of Science* de S. Wolfram. La filosofía digital es aquella que no se refiere al mundo en términos analógicos, sino digitales; entonces, el problema de la compresión, la aleatoriedad y la información algorítmica se revelan como un motivo –novedoso– para la reflexión filosófica.

En términos de filosofía, el origen de la complejidad permite comprender que las ciencias de la complejidad poseen un componente filosófico que no es enteramente visible a lo largo del trabajo sobre sistemas no-lineales debido a que la cara más visible la ocupan la física, las matemáticas, la biología, los sistemas computacionales e incluso la química. Sin embargo, permanece más visible en la obra de autores como I. Prigogine –con referencias constantes a Heráclito, Bergson y otros–, en S. Kauffman –quien se ocupa en algún lugar

⁹ En efecto, entre los padres de las ciencias de la complejidad se encuentra el padre de los algoritmos genéticos, J. Holland. Holland desarrolla los algoritmos genéticos como un camino para explicar de qué manera la evolución marca la dinámica misma de los sistemas complejos. Más exactamente, Holland desarrolla la tesis según la cual la complejidad es el resultado de la adaptación, y la adaptación puede ser literalmente vista y explicada por medio de los algoritmos genéticos. Por otra parte, otro tanto puede decirse de la interfase entre complejidad y computación con respecto a la vida artificial, una de las aristas, por así decirlo, del estudio de los sistemas complejos adaptativos.

de Kant y de Wittgenstein, principalmente— y en divulgadores importantes como J. Casti.

Pasemos ahora al segundo origen de la complejidad. Muchos autores coinciden en que el origen de la complejidad se remonta a la obra de H. Poincaré, en quien se prefiguran las ideas de base del caos. El mérito de Poincaré radica en la demostración de imposibilidad a un desafío planteado por el rey Oscar II de Suecia. Técnicamente, se conoce como el problema de los tres cuerpos.

Newton logra explicar adecuadamente la mecánica celeste en términos, cada vez, de dos cuerpos, e integralmente gracias a la ley de la gravitación universal. Pero si se consideran tres cuerpos, específicamente la tierra, la luna y el sol, ¿puede decirse que entre ellos existe una armonía? El problema es la estabilidad del sistema solar.

Newton logra explicar el problema de las correspondencias entre cuerpos de distintas masas —a distancias diferentes— recurriendo a series de potencias. Por fortuna para Newton, la mayoría de los cuerpos del sistema solar tienen una masa suficientemente pequeña como para ignorarla. Posteriormente, Lagrange y Laplace logran establecer que los planetas se alejan de manera constante y circular, pero que ello no representa ningún peligro para que la tierra salga disparada de su órbita y se pierda en el espacio.

Poincaré logró demostrar que no es posible establecer si el sistema solar es estable o no, con lo cual logró un avance cualitativo importante en el estudio de los sistemas dinámicos. Pareciera contradictorio mostrar que por un lado pueda hablarse de una contribución positiva de Poincaré al reto propuesto por Oscar II y, por otro, con respecto a la idea de un segundo origen histórico-científico de la complejidad.

J. Barrow (1998) ha escrito un libro importante y hermoso acerca de la importancia del pensamiento negativo o también, del papel de la imposibilidad en la ciencia y en el pensamiento humano en general.

Pues bien, el mérito de Poincaré consistió en haber introducido el estudio topológico de las ecuaciones de diferencias no-lineales; en matemáticas, se relaciona con la dificultad del problema que representan los divisores pequeños, que consiste en demostrar que la suma de las perturbaciones pequeñas entre dos o más planetas —cuerpos— se expresa en una suma infinita que se denomina “suma de Fourier”. Poincaré establece que esa suma tiende al infinito, con lo cual parece resultar que las órbitas son inestables.

El problema de la estabilidad lo retoma en los años cincuenta A. Kolmogorov, quien en conjunto con V. Arnold y J. Moser logran establecer el teorema KAM (designado así por las iniciales de los apellidos), según el cual, en condiciones de perturbaciones pequeñas, la mayoría de las órbitas son estables, aun cuando algunas de ellas no sean periódicas. El fundamento matemático del teorema KAM radica en que el problema de los pequeños divisores sólo aparece en el caso de períodos racionales o que pueden aproximarse a números racionales (esto es, fracciones con denominadores relativamente pequeños). No obstante, dado que la mayoría de los números reales no se aproximan bien a números racionales, el problema de la estabilidad no aparece en la mayoría de los casos.

El origen de la complejidad en la obra de Poincaré continúa por otros caminos a través del desarrollo del caos, gracias a E. Lorenz y D. Ruelle; en la física matemática, referida a sistemas dinámicos; en la física en general, particularmente alrededor del problema de los tres cuerpos (*the three-body problem*), y el problema, más amplio, de la estabilidad entre múltiples cuerpos (*the N-body problem*). Por vía indirecta, este origen también avanza en el ámbito de los fractales y de la teoría de números, particularmente.

Nos atreveríamos a decir que este origen de la complejidad se halla entre los gérmenes de lo que posteriormente será la ciencia de conexiones (*science of connections*), usualmente conocida como el estudio de redes dinámicas (*complex networks*).

Una tercera manera de señalar el origen histórico de la complejidad proviene de la contraposición entre dos flechas del tiempo diametralmente opuestas: la flecha del tiempo de la evolución y la flecha del tiempo de la termodinámica.

El descubrimiento de la irreversibilidad de la flecha del tiempo tiene lugar de dos maneras diametralmente opuestas en el curso del siglo XIX. Por un lado, el nacimiento de la biología como ciencia, gracias a la teoría de la evolución de Darwin, establece que la tendencia de los seres y los sistemas vivos es hacia una complejidad creciente desde por lo menos tres puntos de vista: el anatómico y fisiológico –que se integran como el adaptativo–, el evolutivo y lo que posteriormente se denominará como el ecológico. Por otra parte, en el marco de la física, más exactamente de la termodinámica, L. Boltzmann muestra, específicamente en el estudio de los gases, que existe una tendencia

natural hacia el equilibrio, y se configura como el segundo principio (o ley) de la termodinámica: la entropía (entropía térmica, la que estudió Boltzmann).

Figura 1.1. Entropía y complejidad creciente



Fuente: elaboración propia.

Frente a la flecha del tiempo de la termodinámica, la flecha del tiempo de la biología muestra que gracias a las catástrofes naturales —y también a pesar de ellas— ocurridas en el Pleistoceno o en el período Cámbrico, por ejemplo, en la naturaleza asistimos a estructuras, formas, comportamientos y nichos crecientemente complejos (figura 1.1). Aún más, la característica de los seres vivos consiste en fortalecerse en varios sentidos —organísmicos, adaptativos y otros— en contextos de, o en situaciones en las que, enfrentan riesgo o peligro de extinción. Precisamente, aquellos organismos que son capaces de adaptarse a las nuevas situaciones y logran transmitir a sus descendientes las habilidades para sobrevivir serán los más aptos.

De esta suerte, la selección natural no debe ser vista como un factor que resta o elimina, sino como uno que cumple una función positiva, a saber: no solo crear organismos y a través suyo especies más aptas, sino, precisamente por ello, paisajes adaptativos que inciden en los organismos más aptos y que son el objeto mismo de la adaptación de aquellos organismos que logran evolucionar.

Por su parte, Boltzmann identifica el segundo principio de la termodinámica, o ley de la entropía, según el cual en los sistemas cerrados o aislados existe una tendencia natural e inevitable hacia el equilibrio, que equivale a estabilidad y muerte: muerte térmica, muerte calórica. Boltzmann señala que esta tendencia es irreversible, a menos que se introduzca una medida de trabajo y de energía que no haría otra cosa que generar más entropía en el sistema y en el entorno.

Varios autores –entre ellos Chaitin, Kauffman y Solé– coinciden al sostener que la idea misma de complejidad no se funda en la física, ni se deriva de ella, sino en la biología. Una adecuada comprensión de los sistemas biológicos implica necesariamente una comunicación, por así decirlo, entre biología y termodinámica o, mejor aún, entre evolución y termodinámica del no-equilibrio. Una justificación y presentación particularmente ilustrativa de este tema se encuentra en Andrade (2003).

El tercer origen de la complejidad continúa por dos caminos diversos, pero paralelos en ocasiones y entrecruzados en otras: la biología y la termodinámica del no-equilibrio. Esta vía es particularmente visible en la obra de autores como S. Kauffman, R. Solé, B. Goodwin, Ch. Langton y en general en los estudios sobre sistemas vivos, biología evolutiva e incluso algunos desarrollos de Evo-Devo y biología computacional. Otros autores como L. Margulis, F. Varela y H. Maturana no son enteramente ajenos a este origen.

Por otra parte, la obra de I. Prigogine constituye el mejor referente de la termodinámica del no-equilibrio, la cual sigue por vías distintas estudios en torno a la dinámica evolutiva, como en M. Nowak, y sobre entropía no extensiva de C. Tsallis. A todas luces, la mejor continuación es la de los trabajos de W. Zurek sobre la física de la información y la medición de entropía.

El cuarto origen de las ciencias de la complejidad tiene que ver con la historia de las matemáticas y la lógica, presupuesto en la obra de D. Hilbert y asentado sobre la obra de K. Gödel y A. Turing; esto es, a partir del teorema de incompletud y la demostración de la indecibilidad en lógica y matemáticas.

En este punto es necesario hacer referencia a los famosos veintitrés problemas planteados por D. Hilbert en el Congreso Mundial de Matemáticas celebrado en agosto de 1900 en París (Gray, 2005). De ellos, el que muestra una conexión inmediata con la línea genealógica que mencionamos es el décimo problema, consistente en el tema de la decidibilidad.

La crisis del programa de Hilbert tiene un doble resultado inmediato de cara al desarrollo de la idea de ciencias de la complejidad. El primero hace referencia al teorema de la incompletud de Gödel, que no solo representa la mayor crisis de la historia del pensamiento deductivo e hipotético-deductivo –crisis que continua hasta hoy–, sino también, en el ámbito de las matemáticas, constituye el primer reconocimiento de que cuando queremos hablar de sistemas consistentes, estos son necesariamente incompletos, si lo que se pretende es abandonar un pensamiento de tipo tautológico –que es, se infiere

claramente de Gödel, el tipo de pensamiento tradicional en la historia que va desde Euclides hasta Hilbert. De forma genérica, el teorema de Gödel demuestra que hay cosas que son verdaderas pero que no podemos demostrar (por qué lo son).

Por su parte, A. Turing demuestra que frente al décimo problema planteado por Hilbert –“determinación de la resolubilidad de la ecuación diofántica”– no existe un método seguro que nos permita definir de antemano si el problema se puede detener o no. El resultado abre las puertas al problema de la aleatoriedad y, por consiguiente, de la medición de la complejidad de un programa cualquiera.

De manera análoga al trabajo de Gödel, Turing inaugura una línea de trabajo que muestra claramente que la complejidad consiste en temas como indecibilidad e incomputabilidad. A simple vista, este resultado sería negativo, pero en realidad pone de manifiesto que los sistemas que se dicen complejos, o que *puede* decirse que lo son, no son con seguridad sistemas comprensibles (o comprimibles) en el sentido matemático de la palabra –de manera más significativa, ni siquiera en su sentido semántico. Volveremos sobre esta idea a propósito de la identificación de problemas P y NP, que constituyen una forma afortunada, aunque difícil, de aproximarnos al núcleo mismo de lo que es *complejidad*.

Así, pues, el cuarto origen tiene una doble fila de progeñie: por un lado, el trabajo con las matemáticas; por otro, el trabajo con lógica, exactamente con lógicas no-clásicas. Del lado de las matemáticas, la continuación del cuarto origen de la complejidad hace referencia a problemas enormes, muchos de los cuales carecen hasta la fecha de una solución (satisfactoria). Se trata de las relaciones entre lo continuo y lo discreto; el trabajo con los infinitos de Cantor; los problemas relativos a aleatoriedad; el teorema KAM; el número Ω de G. Chaitin; incluso la relación con los seis números que de acuerdo con M. Rees constituyen el universo y, por vía indirecta, con seguridad, la conjetura de Poincaré y la Hipótesis de Riemann –o la función Z. Un campo altamente sensible que se deriva de la complejidad con fundamento en las matemáticas concierne al desarrollo de la computación cuántica y a la conexión entre complejidad y criptología, puesto que en su base se encuentra la teoría de números, y con ella el (indomable) problema de la aleatoriedad.

Desde las lógicas no-clásicas, el primer motivo de investigación es el trabajo con paradojas –tema que en su versión más reciente se remonta a las

paradojas de B. Russell, la teoría de clases, la teoría de tipos y las paradojas de la teoría de conjuntos –y en general el desarrollo de las lógicas no-clásicas, también conocidas como lógicas filosóficas: la lógica paraconsistente, la lógica de la relevancia, la lógica libre, la lógica cuántica, la lógica del tiempo, la lógica modal, la lógica difusa, las lógicas polivalentes.

Al respecto, existen intuiciones acerca de las conexiones entre complejidad y lógicas no-clásicas, pero aún no un trabajo sólido que permita establecer claramente que las lógicas no-clásicas hacen parte del amplio conjunto de las ciencias de la complejidad.¹⁰

Las ciencias de la complejidad, mucho más que cualquier otra ciencia o grupo de ciencias contemporáneas, se caracterizan por el hecho de haber reconocido, introducido y elaborado una idea perfectamente ajena a toda la tradición occidental.¹¹ Se trata de la idea de un cierto holismo, de acuerdo con el cual el todo es mayor que la sumatoria de las partes. Como es sabido, el holismo es un tipo de visión o de comprensión mucho más común en culturas no occidentales, particularmente en Oriente (India).

El falso dilema de las definiciones de complejidad y caracterización de los sistemas complejos

Desde el punto de vista lógico, un rasgo característico de la ciencia moderna consiste en que usualmente parte de definiciones y trabaja con ellas. En buena medida, el trabajo normal de la ciencia –o de la ciencia normal– se sustenta en la discusión acerca de las definiciones que trabajan ciencias y disciplinas diversas. Este problema constituye, no sin razón, una de las aristas de lo que con acierto señalaba T. Kuhn como el problema de la traducibilidad y conmensurabilidad entre lenguajes –definiciones– y tradiciones científicas diferentes; si bien el tema inmediato de Kuhn no es la discusión acerca de las definiciones de la ciencia y con las que trabaja la ciencia en general.

No obstante el culto que Kant le profesa a la ciencia moderna, a la lógica aristotélica y a la física newtoniana, resulta interesante anotar que en la *Crítica de la Razón Pura* se desmarca de dichas tradiciones cuando sostiene que

¹⁰ Una indicación de esta línea de trabajo se encuentra en Maldonado, C. E. (2009).

¹¹ Quizá la única excepción en la historia de Occidente, esto es, la mejor o única expresión de una visión holística sea la de Francesco Bernadone cuando renuncia a sus privilegios y crea el orden de los Franciscanos y él mismo sería conocido posteriormente como S. Francisco de Asís (Clark, 2005).

la buena filosofía –lo cual equivale para él tanto como decir *la buena ciencia*– no trabaja con definiciones, sino que en el mejor de los casos arriba a ellas. Lo que Kant quiere señalar es que la buena ciencia se sirve de experiencias, categorías del entendimiento, fuerza de la imaginación y procesos creativos, incluso de las discusiones mismas sobre el lenguaje, y que tan sólo al final, y únicamente si llega a ser necesario, se concluye en algunas definiciones. En este punto, la filosofía de Kant clama más por una heurística que por un cuerpo axiomático o axiomatizado del conocimiento.¹²

No existe una definición ni una comprensión única de “complejidad”. Ante una mirada escéptica o agnóstica hacia los temas y problema del estudio de los fenómenos y sistemas complejos, este hecho pudiera dar la impresión de que estamos ante un territorio anegado y con serias deficiencias de tipo epistemológico, lógico y científico. Tal es, por ejemplo, la visión de J. Horgan (1998). De acuerdo con Horgan, quien cita a S. Lloyd, del MIT, habría cerca de cuarenta y cinco definiciones de “complejidad”. Esta situación se hace insostenible frente a la ciencia clásica –normal, en sentido kuhniano–, la cual no presenta en ninguna de sus dimensiones, campos o áreas un estado semejante; por el contrario, la ciencia clásica se caracteriza –en consonancia con la cuchilla de Ockham– por una mesura en su lenguaje, así como por una economía de conceptos y definiciones.¹³

¹² La sección de la *Crítica de la razón pura* en la que Kant discute estos temas es la de “La disciplina de la razón pura en su uso dogmático” en la Doctrina Trascendental del Método; véase en particular A719/B747 y A725/B753 y siguientes.

¹³ La siguiente es la lista de definiciones de complejidad que aporta Lloyd, de acuerdo con Horgan. A esta lista le hemos agregado otros conceptos y autores. Los nombres entre paréntesis hacen referencia a los autores o investigadores que acuñaron el concepto: información (Shannon), entropía (Gibbs y Boltzmann), complejidad algorítmica (Chaitin, Solomonoff, Kolmogorov), información de Fischer, entropía de Renyi, longitud de código autodelimitador (Huffman y Shannon-Fano), longitud de código corrector de errores (Hamming), información de Chernoff, longitud de descripción mínima (Rissanen), número de parámetros, o grados de libertad, o de dimensiones, complejidad de Lempel-Ziev, información mutua, o capacidad de canal, información mutua algorítmica, correlación, información almacenada (Shaw), información condicional, contenido de información algorítmica condicional, entropía métrica, dimensión fractal, autosimilitud (Mandelbrot), complejidad estocástica (Rissanen), sofisticación (Koppel y Atlan), tamaño de máquina topológica (Crutchfield), complejidad efectiva o ideal (Gell-Mann), complejidad jerárquica (Simon), diversidad de subgráfico de árbol (Huberman y Hog), complejidad homogénea (Teich y Mahler), sistema complejo adaptativo (Gell-Mann), complejidad computacional de tiempo, complejidad computacional de espacio, complejidad basada en la información (Taub), profundidad lógica (Bennett), profundidad termodinámica (Lloyd y Pagels), complejidad gramatical (posición de la jerarquía de Chomsky), información de Kullback-Liebler, distinguibilidad (Wooters, Caves y Fischer), distancia de Fischer, discriminabilidad (Zee),

El trabajo en torno a complejidad –o sistemas dinámicos– nunca parte de una definición, tampoco trabaja con una definición (única) de “complejidad”. Por el contrario, es habitual referirnos a esa clase de sistemas que entran en el dominio de las ciencias de la complejidad a partir de la identificación de algunas propiedades o atributos que los hace complejos o que puede contribuir a la comprensión y explicación de su complejidad.

Las propiedades sobre las que existe un (cierto) consenso son las siguientes: los sistemas complejos son autoorganizativos, exhiben propiedades emergentes, lo importante en ellos no son los elementos que componen un sistema sino las interacciones de los elementos entre sí; la diversidad y variabilidad; la consideración de dichos sistemas como sistemas abiertos en un medioambiente esencialmente indeterminado, y el hecho de que la clase de fenómenos que exhiben complejidad admiten más de una comprensión escalar, o multiescalar.

De acuerdo con Y. Bar-Yam (2004), la multiescalaridad no es una propiedad epistemológica, es una característica de determinados objetos que permiten, o incluso exigen, una visión en escalas distintas para una mejor comprensión suya. Así, la complejidad es una función de escala con tres clases de sistemas principales: aleatorios, coherentes y complejos. Un sistema aleatorio es aquel que posee una alta complejidad contra una escala fina; en un sistema complejo –Bar-Yam dice “humano”– hay una mayor correspondencia entre escalaridad y complejidad; por último, se dice que un sistema es coherente si posee un grado bajo de complejidad en una escala gruesa o burda (*coarse*).

Quienes no han entrado en las ciencias de la complejidad o aquellos que apenas se introducen en ellas se enfrentan a una dificultad: se trata del uso de expresiones semejantes a “estudiar x en enfoque complejo”, “¿cómo pensar a y en términos de complejidad?”, incluso “aplicar la complejidad a z ”. La lista puede ser tan larga como se quiera. Frente a esta dificultad, quisiéramos introducir dos criterios:

distancia de información (Shannon), distancia de información algorítmica (Zurek), distancia de Hamming, orden de largo alcance, autoorganización, sistemas complejos adaptativos, filo del caos o al borde del caos, sistemas alejados del equilibrio (Prigogine). Cfr. Hogan (1998, p. 253).

El porqué hemos transcrito esta lista –con un par de nombres adicionales– es claro: a pesar del amplio número de definiciones de complejidad: a) no todos los autores y conceptos incluidos en esta lista forman parte del corpus básico del trabajo en complejidad; b) la larga lista no significa, en absoluto, una debilidad conceptual cuando se trabaja con la clase de fenómenos, comportamientos y sistemas que pueden ser comprendidos como “complejos”.

1. Ante todo es importante precisar (= *observar!*) si un fenómeno se comporta de manera compleja o no. Por ejemplo, si es imprevisible, si no se puede estudiar en términos de agregados de partes, si los enfoques causales resultan limitados, en fin, si bajo ciertas consideraciones puede ser estudiado con ciertas delimitaciones metodológicas como un sistema cerrado o aislado (para lo cual resulta más útil el pensamiento sistémico o el llamado pensamiento complejo de E. Morin); así mismo, si la ciencia existente (independientemente de aquella que es ciencia de la complejidad) es suficiente para comprender un fenómeno y para resolver un problema, en cuyo caso la complejidad no es necesaria; si no es indispensable un nuevo lenguaje o unas nuevas matemáticas, dado que los existentes son suficientes.
2. Es muy útil establecer si el fenómeno en cuestión exhibe algunas de las propiedades ya consideradas en el corpus normal de complejidad; por ejemplo, si alguno de los autores, enfoques, etc., que son de complejidad aporta luces con respecto a un problema determinado. En este caso, como en ciencia en general, el conocimiento de la historia, particularmente de la bibliografía de punta en revistas especializadas, libros recientes, eventos académicos y científicos cuando se trata de complejidad y que se “cruza” con el fenómeno estudiado, puede contribuir en la dirección mencionada.

Antes que de posturas de tipo utilitarista, pragmáticas o empíricas, lo que pretenden estos dos criterios es demarcar aproximaciones para el trabajo de complejidad. En otras palabras: es fundamental atender al comportamiento y a la historia de un fenómeno determinado a fin de poder establecer si las ciencias de la complejidad puedan contribuir a su comprensión o no hacerlo. En rigor, esto significa que las ciencias de la complejidad no son necesarias para todos los casos de estudio –y de acción. La inteligencia en complejidad consiste en establecer exactamente cuándo, cómo y por qué razón un tema, objeto o problema es propia y adecuadamente complejo, puesto que, a priori, no es necesario y ni siquiera deseable que lo sea.

En este sentido, no estudiamos simple y llanamente fenómenos, sistemas o comportamientos complejos. Por el contrario, se trata de atender a aquellos fenómenos que son de complejidad *creciente*. De esta suerte, aparece un doble motivo serio de trabajo: por un lado, establecer la complejidad mínima de un

sistema o fenómeno; por otro, aún más difícil, señalar la complejidad máxima del fenómeno que se está considerando.

El problema de la determinación de la complejidad mínima encuentra sólidos fundamentos —aunque inconclusos— en el trabajo de S. Kauffman en torno a la identificación de redes booleanas como generadoras de bucles y de ciclos catalíticos y autocatalíticos —en biología. Al respecto, es imperativo recordar que un sistema complejo no es en absoluto el resultado de un agregado de partes. En la base de la complejidad hay funciones, operaciones, procesos, dinámicas y no elementos. Si ello es así, entonces es necesario estudiar dichos procesos y funciones que son generadores de dinámicas complejas, puesto que no siempre y no todas las funciones y procesos generan complejidad.

Al mismo tiempo, en el estudio de la complejidad la mirada se dirige hacia la determinación de la complejidad máxima de un sistema, un problema que encuentra sus primeras motivaciones en el contexto de la ecología (May, 1974; Margaleff, 1993) (en el que una herramienta ampliamente usada son las ecuaciones Volterra-Lotka para estudiar cadenas tróficas y las relaciones depredador-presa). Por tanto, el tema consiste en la determinación de los límites de la complejidad.

La idea más importante en la historia del pensamiento racional de Occidente es la idea de causalidad. Concebida originariamente por los griegos, la creencia en la causalidad se constituye, tanto por sus implicaciones como por sus alcances, en la más sólida. A partir de entonces, la historia subsiguiente consiste en el refinamiento y la profundización de esta idea; desde las cuatro causas formuladas por Aristóteles hasta la causalidad sin más de la ciencia contemporánea. Con seguridad, su mayor defensor —particularmente en el contexto de las ciencias sociales— sea J. Elster (en especial en *Nuts and Bolts-Tuercas y tornillos*).

Podemos decir que la crisis más profunda con respecto a la idea de causalidad proviene de tres frentes distintos: la mecánica cuántica, las ciencias de la complejidad con el concepto de emergencia, y la nueva biología (distinta a la biología reduccionista de tipo molecular, o aquella que es conocida como la Gran Síntesis). A partir de entonces el panorama se torna más complicado. Una síntesis de la historia del problema “causalidad” es la siguiente:

- | | | | |
|------|------|------|-----|
| i) | C | → | E |
| ii) | E' | → | } C |
| | E'' | → | |
| | E''' | → | |
| iii) | C' | → | } E |
| | C'' | → | |
| | C''' | → | |
| iv) | C | (¿?) | E |

En el primer caso tenemos la explicación básica según la cual una causa produce un efecto determinado. Es el ejemplo y el caso más banal de todos. El segundo representa cómo una misma causa puede producir múltiples efectos. El descubrimiento de este punto tuvo lugar en el curso del siglo XIX. El tercer caso representa la multicausalidad, y muestra que múltiples causas pueden producir un mismo efecto; es producto de la cultura científica del siglo XX. Finalmente, el cuarto caso es el más interesante desde el punto de vista de la complejidad: quiere significar que entre una causa determinada que se conoce bien y un efecto cualquiera, a su vez bien conocido, no existe ninguna relación de tipo causal. Aquí hace su aparición la emergencia.

El concepto de emergencia fue planteado por primera vez por E. Haeckel en el contexto de la naciente ecología —a partir de la teoría darwiniana de la evolución. J. Holland ha explicado de manera sucinta en qué consiste la emergencia: de poco surge mucho, y no importa qué tan bien conozcamos lo poco que hay de entrada, pues lo mucho que resulta no puede ser anticipado de manera lineal y causal a partir de lo poco. Lo mucho es literalmente más y distinto a lo poco que le había precedido.

Con toda seguridad, entre los rasgos que tipifican a un sistema complejo se encuentra el papel activo e inevitable del tiempo. Los fenómenos complejos son fenómenos temporales en el sentido de que son perfectamente inseparable —además de varios otros factores— del papel que el tiempo desempeña en los fenómenos del caso. Sin embargo, es importante atender al hecho de que la irreversibilidad de la flecha del tiempo no debe ser vista como algo ineluctable y fatídico, pues podría adquirir visos providencialistas o fatalistas.

Cuando en el contexto de complejidad se habla de la irreversibilidad de la flecha del tiempo, esta expresión debe ser atendida en el sentido de que el *vector* de los fenómenos de estudio es que el tiempo es irreversible. Sin

embargo, tanto en complejidad como en ciencia en general –en química, en biología, en física, en antropología, en política, en sociología– existen fenómenos y dinámicas que son reversibles. La reversibilidad existe en múltiples planos y momentos de la naturaleza, y constituye un factor que en muchos sentidos es determinante para la normalidad y el buen desempeño de las cosas y de la vida.

Un ejemplo notable de reversibilidad es la salud, cuando el cuerpo humano o la mente han sido aquejados por una enfermedad determinada. La posibilidad de la recuperación y el hecho mismo de la sanación y de la salud expresan un caso en el que la flecha del tiempo –en este caso, de la termodinámica– no es ineluctable ni insalvable. Lo mismo puede decirse del crecimiento o el desarrollo de una empresa, de la existencia de procesos de justicia social y reparación en diversos países, o en las dinámicas mismas de la historia cuando se trata de situaciones ignominiosas, negativas o degradantes (ejemplos que al respecto abundan a lo ancho y largo de la geografía y de la historia mundial).

Digámoslo de manera franca con la ayuda de I. Prigogine (1980): somos nosotros quienes introducimos la irreversibilidad en un mundo reversible; al hacerlo, se produce una transformación tanto del mundo como de nosotros mismos. Justamente, dicha transformación es la que conforma el vector, por así decirlo, de la irreversibilidad de la flecha del tiempo en general. Existe otra manera más general de decirlo: la irreversibilidad de la flecha del tiempo es obra y expresión de la importancia de la biología –y de la química– en un universo físico e inane.

Ahora bien, la buena ciencia elabora predicciones. La posibilidad de la predictibilidad no constituye tanto un rasgo epistemológico de la ciencia en general como, además y fundamentalmente, un criterio ético y práctico sustantivo –relativo a la magia, la superstición, el mito y demás. La diferencia estriba en el hecho de que la ciencia contemporánea en general ha aprendido que existe una tarea inmensamente más complicada y, por ello mismo, significativa que la simple predicción: se trata de las explicaciones, o de las comprensiones o elucidaciones, que permite o que lleva a cabo la ciencia.

Más exactamente, la ciencia contemporánea en general, pero las ciencias de la complejidad en particular, no son simple y llanamente ciencia de control, de predicción y manipulación. En un texto ya clásico de filosofía de la ciencia, I. Hacking (1983) afirmaba que las dos funciones centrales y distintivas de la ciencia son representar e intervenir. Sobre la intervención, destaca cómo la

ciencia, en cuanto actividad interventora, no describe simplemente el mundo, ni siquiera reproduce experimentos: crea fenómenos. Esta idea merece un comentario puntual.

Uno de los criterios de la ciencia clásica consiste en la idea de la reproducibilidad de los experimentos, las observaciones o las descripciones. En el debate con la pseudo-ciencia, digamos a favor de la ciencia clásica que la posibilidad –mejor aún, la exigencia– de reproducir un experimento permite trazar un criterio claro de demarcación con respecto a la especulación, la habladuría o los remedos de ciencia.

La afirmación de Hacking es más original y radical. La ciencia no reproduce simplemente experimentos, los crea. Así, los buenos experimentos no son aquellos que son susceptibles de repetirse, sino los que son mejorados; gracias a esto los fenómenos pueden ser elicitados con regularidad. Mientras que el especulador, el calculador y el constructor de modelos pueden ser anti-realistas –o digamos también: no-realistas–, el experimentador debe ser realista.

De manera directa: las ciencias de la complejidad no buscan controlar la naturaleza y los fenómenos –para lo cual la predicción es tanto un medio como un modo del control–, sino entenderlos y acercarnos a ellos. Así, el tema que salta ante la mirada ya no es simplemente la relación entre ciencia y verdad –un tema que en rigor es medieval–, sino las relaciones entre ciencia y belleza. Para E. Tiezzi,¹⁴ el desafío de la complejidad estriba en la estética de la naturaleza:

La belleza ha dejado muchos rastros de sí en el gran mar “entre la tierra” (...). Es una belleza transgresiva, así como debería serlo también la investigación científica. Si todo es homologado, estandarizado, catalogado, pesado, medido por “factores de impacto”, indicadores económicos, leyes férreas, etc., ya no habrá más belleza ni ciencia. (2006, p. 126)

La relación entre ciencia y belleza es un tema que la filosofía en general y la filosofía de la ciencia en particular apenas han vislumbrado. No obstante, las fuentes más sólidas se encuentran con seguridad en la obra de F. Nietzsche.

¹⁴ Sólo para precisar que no se trata de un autor posmoderno o algo semejante, vale recordar que Tiezzi es químico-físico, y entre los reconocimientos que ha recibido está el Premio Prigogine 2005.

Pues bien, La idea que queremos defender en este punto es que las ciencias de la complejidad trabajan no simplemente con fenómenos complejos, sino con fenómenos de complejidad *creciente*. Aquí queremos avanzar un paso en firme: los fenómenos de complejidad creciente son justamente aquellos que son sistemas abiertos, que permiten la existencia de sistemas abiertos o que exigen ser vistos como sistemas abiertos –tres maneras distintas de referirnos a un mismo motivo.

Es importante establecer que aquí optamos por una “definición” específica de complejidad, a saber: la complejidad como no-linealidad. Tres razones justifican nuestra opción. En primer lugar, se trata de poner de manifiesto que los sistemas complejos no-lineales son aquellos que evolucionan y que precisamente por eso *ganan información*. Ganar información constituye un rasgo distintivo que nos permite comprender mejor el carácter creciente de la complejidad en general, evitando cualquier justificación de tipo teleológico.

Ahora bien, decir que un sistema complejo gana información –en su evolución– no significa que se pueda asimilar información a memoria. Esto quiere decir que no es necesario que ganar información se asimile a ganar memoria o acrecentarla. De hecho, sucede todo lo contrario: los sistemas complejos *tienden* a perder la memoria, a olvidar el pasado, justamente un rasgo distintivo de que la mejor expresión de los sistemas complejos son los sistemas vivos.

Los sistemas informacionales y computacionales han dejado en claro que la memoria es completamente diferente a la información. Pues bien, esta indicación sirve, por vía de analogía, para precisar que un sistema de complejidad creciente vive y evoluciona debido a su sensibilidad frente a las condiciones iniciales *en cada caso y en cada momento*; así mismo, que ganar información no es simplemente una posibilidad o una opción, sino la exigencia misma de la adaptación. Las mejores garantías de vida no siempre se encuentran exclusivamente en la memoria, sino en la capacidad de adaptación; por tanto, la información desempeña un papel fundamental.

Una segunda razón por la cual la no-linealidad ofrece sólidas ventajas teóricas y prácticas respecto a otras interpretaciones de complejidad estriba en el hecho de que el trabajo con no-linealidad que nos enseña a pensar en posibilidades –y ya no simplemente con actualidades o realidades– al mismo tiempo nos demanda un refinamiento de la imaginación.

La no-linealidad implica que un problema tiene más de una solución posible que, dependiendo del problema al que nos enfrentemos, puede convertirse en un reto magnífico. El hecho de que la primera vez que pudimos trabajar efectivamente con no-linealidad fuera gracias al desarrollo de los computadores, no solo ilustraría el sentido mismo de la no-linealidad, sino que debería poder hacer claro que los computadores –y en rigor los programas de simulación– son ayudas estupendas de experimentos imaginarios (*thought experiments* – *Gedankenexperiment*), y que, a fortiori, ponen de manifiesto que el buen trabajo con imaginación es una condición ineludible para la buena ciencia – para la buena vida (*eupraxein*).

Por lo general, ni el trabajo con la imaginación ni su importancia se sitúan en el primer plano en la formación de científicos y académicos, en el sentido más amplio de la palabra. Por el contrario, el énfasis se da –creemos que en muchas ocasiones, no sin justificación– en la habilidad técnica, dejando de lado el virtuosismo, la inspiración, el juego. Pues bien, estos elementos pueden ser recuperados y exaltados mucho mejor por el camino de la comprensión de la complejidad como no-linealidad, puesto que las soluciones y las situaciones no-lineales no las vemos: las concebimos.

Sin embargo, una razón más fuerte estriba en el hecho de que el trabajo con no-linealidad implica necesariamente trabajar con espacios imaginarios (“espacios de fase”), o según el caso con espacios de Hilbert. La ontología que subyace a esta idea es que el espacio real no desaparece ni disminuye en ningún sentido, simplemente queda incluido en un espectro más amplio que lo comprende y lo hace posible. Dicho de manera breve: pensar en complejidad significa propiamente pensar en posibilidades. Y los juegos de posibilidades demandan un papel activo de la imaginación.

Finalmente, una tercera justificación para comprender los sistemas complejos en términos de no-linealidad significa que el mejor método lógico con respecto a ellos es el de la abducción. Esto quiere decir que, en adición a lo que precede, pensar en términos de complejidad significa atender redes complejas o, lo que es equivalente, fenómenos y procesos que suceden –o pueden tener lugar– *en paralelo*.

Con base en lo anterior, cabe sostener que las ciencias de la complejidad son ciencias de posibilidades y no simplemente ciencia de lo actual o lo real, mientras que las posibilidades *son* espacios cruzados o paralelos y no lineales o secuenciales. Estas tres justificaciones de la complejidad en términos de

no-linealidad nos permiten avanzar un paso para abordar uno de los temas más importantes en todo el trabajo con la complejidad y su comprensión. Se trata de los problemas P y NP, y NP completos.

Los sistemas complejos son tales porque en ellos el tiempo es determinante y no simplemente una variable. Sencillamente, el tiempo mismo genera la complejidad o es la complejidad de un fenómeno determinado.

Pues bien, teniendo en cuenta que los temas de complejidad son directamente proporcionales a los contenidos y modos de la información –lo cual se conoce técnicamente como la medición algorítmica de la complejidad y, ulteriormente, como la teoría de la complejidad algorítmica (Chaitin, Kolmogorov)–, los procesos de cómputo permiten distinguir dos cosas: buenos y malos algoritmos (Stewart, 1998), y problemas relevantes e irrelevantes. Ambas se fundan en la distinción entre tiempo polinomial y tiempo exponencial.

Un tiempo polinomial es aquel que crece como una potencia fija –por ejemplo t^2 o t^3 . En términos económicos o administrativos, se trata de aquel que se puede organizar en términos de cronogramas, flujogramas, histogramas y demás. Se trata, sin más, de los tiempos en los que un problema puede ser resuelto o en los que se cree que puede ser resuelto. Por su parte, un tiempo exponencial es aquel que crece como 2^t o más rápido. En otras palabras, se trata de tiempos que no pueden ser medidos, controlados u organizados en forma de cronogramas y demás mencionados. Desde luego, existen tasas de crecimiento, en diversas áreas y fenómenos, que pueden situarse entre un tiempo polinomial y un tiempo exponencial, aunque son altamente raros.

En matemáticas, se dice que un problema P es aquel al que le corresponde un tiempo polinomial. Se trata de problemas que pueden ser planteados y resueltos en un tiempo previsible, incluso si sobrepasa la medida de un tiempo físico en términos personales, organizacionales o institucionales, por ejemplo (Hodges, 2008). Un tiempo inter o transgeneracional puede ser visto adecuadamente como un tiempo que contiene un problema P. Lo verdaderamente singular estriba en el hecho de que esta clase de problemas son *irrelevantes*, y lo son justamente debido a que pueden resolverse y efectivamente se resuelven en un tiempo polinomial. Otra manera de designar a este grupo de problemas P es como *problemas fáciles*.

Por otra parte, se dice que un problema es NP si no es polinomial –y, por tanto, exponencial; esto es, debido a que no puede ser abordado y resuelto en términos de tiempos previsible. Esta clase de problemas se comprenden

como *relevantes*. Otra manera de designar a este tiempo NP es como un *tiempo polinómico no determinista*. Los problemas NP se conocen como *problemas difíciles*. Adicionalmente, se dice que un problema es NP completo si forma parte de NP y si puede resolverse en un tiempo P (puesto que hay, efectivamente, algunos problemas NP que sí pueden resolverse en un tiempo polinomial).¹⁵

Pues bien, el resultado maravilloso consiste en el hecho de que la inmensa mayoría de problemas, en sentido habitual o técnico de la palabra, son problemas P. Si, como sostenía Marx, “un pueblo sólo se plantea los problemas que puede resolver”, entonces esa clase de problemas son irrelevantes –justamente porque se pueden resolver. Al lado de estos problemas, el grupo verdaderamente relevante son los problemas NP. Se trata de aquellos problemas que: a) no tienen solución (en un tiempo polinomial), o b) no se sabe si tienen solución.

Queremos sostener que los problemas complejos se caracterizan precisamente por esto: son problemas que carecen de solución (y precisamente por ello son “relevantes”) o bien para los cuales no tenemos una solución –aunque pensemos que pueda haberla alguna vez. La esencia filosófica de estos problemas es algo que no escapa a un olfato refinado.

Sin embargo, la dificultad no se encuentra en lo que acabamos de presentar. Antes bien, el reto más grande surge en el momento en que podemos reconocer, sin dificultad alguna, que todo problema P también está contenido en la clase de problemas NP. Pero hasta la fecha nadie ha podido demostrar que lo contrario sea el caso.

La forma puntual como esto se manifiesta es mediante la distinción entre la demostración de la solución de un problema, la cual por definición siempre sucede en un tiempo P. Como es sabido, una cosa es el proceso de investigación y otra la presentación de la investigación. De otra forma: una cosa es encontrar una solución y otra muy distinta consiste en mostrar o demostrar la solución (Odifreddi, 2004). Pues bien, existen soluciones que,

¹⁵ Quisiéramos aquí abrir un compás para introducir una observación sensible. Se trata del reconocimiento explícito de que en la vida como en ciencia en general lo habitual –por razones de tipo educativo, cultural, religioso, metodológico o económico, por ejemplo– es que siempre abordemos primero los problemas fáciles y vayamos relegando a segundo plano los problemas difíciles. Al cabo, eventualmente, los problemas difíciles que vamos relegando pueden terminar olvidándose o, por su desplazamiento, volviéndose tan extremadamente difíciles que terminan al cabo, olvidados, menospreciados o también *inmanejables*.

aunque podamos demostrarlas en un tiempo polinomial, es sumamente difícil encontrarlas en un tiempo polinomial. Aquí se encuentran, con seguridad, los problemas de gran complejidad. No en vano este punto entre tiempos y problemas P y NP es el que en el contexto de la matemática es designado propiamente como *teoría de la complejidad*.

Por tanto, hasta la fecha no ha sido posible establecer ni que $P = NP$, ni que $P \neq NP$ (en este último caso entran los problemas de los infinitos de Cantor). La dificultad mayor consiste en el hecho de que es muy difícil comprobar que un problema *no* se pueda demostrar o resolver en un tiempo P. Para ello, debería ser posible explorar todos y cada uno de los algoritmos posibles para la resolución del problema y verificar que cada uno de ellos es inviable para la buena o satisfactoria solución del problema. En términos filosóficos, el camino es dúplice o alternativo: se trata o bien de una demostración de existencia o bien de una demostración de imposibilidad. En matemáticas y en lógica la forma habitual de las demostraciones de imposibilidad se conocen desde Euclides: son demostraciones por reducción al absurdo.

Es importante señalar que, desde el punto de vista lógico, el problema de las relaciones entre problemas y tiempos P y NP constituye, a todas luces, una magnífica *paradoja*. Pues bien, las paradojas son una de las vías de acceso o uno de los componentes esenciales de los sistemas complejos. Las paradojas conforman uno de los pilares de las lógicas no-clásicas.

El problema del método en complejidad

¿Cómo se aprende, se estudia, se enseña, se trabaja y se investiga en complejidad? A partir de estas preguntas se erige un problema serio: ¿la complejidad es realmente una revolución, a saber, una revolución en el conocimiento? La pregunta por el método constituye una constante en la ciencia moderna en general. El tema hace referencia al método de aprendizaje, método de investigación, método de enseñanza.

Efectivamente, la pregunta por el método es una preocupación de la ciencia y de la filosofía moderna debido al contraste que se quería marcar con respecto a la “ciencia” de la Edad Media: la teología. La teología era la ciencia del Medioevo: ciencia de Dios —ciencia de la cual se derivaba cualquier otro conocimiento, o ciencia hacia donde conducían todas las otras ciencias y disciplinas. No había —no podía haber— ciencia superior. Precisamente por ello era designada como *scientia magna*.

Esta ciencia magna seguía un camino: la filosofía, que era el conocimiento de Dios por medio de la razón mientras se daba la fe, y a la espera de que la fe –que era una Gracia– tuviera lugar permitiendo así el conocimiento directo de Dios. Por tanto, la filosofía era considerada como *via regia*, esto es, el camino excelso que conduce a los seres humanos hacia el conocimiento de Dios por vía discursiva y racional.

La teología era una ciencia eminentemente racional, en el sentido de que operaba “desde arriba”, a partir de principios primeros, naturales a la razón humana. Estrictamente hablando, la teología se articulaba en ontología racional, psicología racional y cosmología racional. En todo caso, su núcleo era la dogmática –la piedra de toque última de la ciencia magna.

Atravesando por el Renacimiento, la Modernidad es el resultado de la muerte de la Edad Media, el final de la teología como “ciencia” (obra de los propios teólogos, que habría de conducir a la Reforma y a la Contrarreforma) y el despliegue, la conquista de otro tipo de racionalidad –una que jamás había existido en la historia de la humanidad. En contraste con la teología –“ciencia desde arriba”– la ciencia moderna es “ciencia desde abajo”: ciencia que hace descripciones, observaciones, experimentación, cuyo fundamento seguro es la inducción y el análisis. No sin razón, pioneros de la Modernidad como Bacon y Descartes dedican parte de su obra a la discusión y estructuración de un discurso del método. De esta suerte, el problema del método es sencillamente un problema de demarcación con respecto a la teología y a la Edad Media.

En términos históricos, podemos decir que a medida que avanzamos en el decurso de la modernidad hacia la contemporaneidad, el problema del método en general se hace cada vez más arcaico por menos necesario. No en vano, en el contexto en el que comienzan a aparecer ciencias de distinto tipo a las de la modernidad, P. Feyerabend propone la necesidad tanto de un pluralismo metodológico o metódico como de un anarquismo en materia de método. Más adelante tendremos la ocasión de precisar en qué sentido, cómo y por qué podemos hablar del surgimiento de ciencias de carácter diferente a la ciencia moderna.

Digámoslo: en complejidad no existe un método *porque* el problema mismo del método ya no es importante ni determinante para el desarrollo de la ciencia. Más exactamente, mientras que la ciencia moderna se define por la posesión, apropiación o postulación de un método determinado, en

el contexto de complejidad el problema se revela, en realidad, como vetusto o innecesario.

Ahora, el problema del método, cuando es visto de forma adecuada, no hace referencia a un instrumento o herramienta –que sería la comprensión más superficial del tema–, sino a un modo de pensamiento, si se quiere a una posición o actitud, ante el mundo para poder desentrañarlo, conocerlo y actuar en él. Así, más allá de lo que sostienen los manuales en el sentido de que el método consistiría en la observación, la experimentación, incluso la contrastación o la verificación (verificacionismo), el tema del método consiste en el problema de la inducción; uno de los dos problemas fundamentales de la ciencia y de la filosofía modernas, al decir de Popper (el otro problema es el de la demarcación; es decir, los criterios para distinguir la ciencia de la pseudo-ciencia).

La ciencia moderna se funda en la inducción; es, justamente, “ciencia desde abajo”. Pero en conjunto con la inducción, la deducción conforma el tipo de racionalidad científica o epistémica en toda la historia de Occidente. En términos filosóficos: los seres humanos tienen siempre una determinada pre-comprensión del mundo. Lo que hacen en el curso de sus vidas y de su formación es confirmar esa pre-comprensión, o bien, en el mejor de los casos, mejorarla o corregirla. Es lo que E. Husserl denominó como el hecho de que la ciencia, la filosofía y la vida cotidiana están cargadas –siempre– de supuestos, por definición, no reflexivos y no reflexionados. La función de la buena filosofía, sostiene Husserl, sería criticar, develar o suprimir, según el caso, los presupuestos que fundan una determinada visión del mundo. Filosofía sin supuestos, lo llamará.

En este punto queremos plantear una tesis: el tipo de pensamiento o de racionalidad propio de la complejidad no es el análisis ni la síntesis, tampoco la inducción o la deducción. De manera radical, pensar en complejidad significa específicamente pensar en términos de posibilidades. Hay dos maneras de describir estas posibilidades: por un lado, la importancia de la abducción –que permitiría un acercamiento entre complejidad y semiótica en la línea de Ch. S. Peirce–; por otro, una forma equivalente, es el hecho de que pensar en complejidad significa hacerlo en términos de espacios de posibilidades. La expresión matemática puntual de estos espacios de posibilidades es el de espacios de Hilbert (L).

Esto significa que el trabajo en complejidad es siempre investigación y exploración de espacios posibles, dado que en ellos tienen lugar transiciones de fase, es decir, cambios cualitativos en los fenómenos; por ejemplo, la transformación del hielo en agua o del agua en vapor. Así, la idea fundamental en complejidad es comprender el desorden, las agitaciones, la espontaneidad y las organizaciones del mundo. Para ello existen tres formas particulares de investigación: el trabajo con experimentos mentales, el trabajo de simulación con lenguajes de programación y la idea de que la mejor manera de comprender un fenómeno consiste en crearlo.

Cabe decir que el trabajo de complejidad comprende tres estrategias estrechamente relacionadas entre sí:

- Comprender la complejidad.
- Actuar en la complejidad.
- Aprovechar la complejidad o sacarle uso.

A primera vista, la idea de la comprensión de la complejidad no presenta ninguna dificultad. El elemento sutil estriba en que en complejidad no existe ningún planteamiento de tipo dualista como sujeto-objeto, predominante en toda la historia de Occidente. Tampoco hay un “afuera”, lo cual se entiende mejor en términos matemáticos: es un rasgo específico de la matemática contemporánea que se funda en funciones y trabaja sobre ellas, y el concepto mismo de función ya no admite ninguna separación entre sujeto y objeto.

Varios autores resaltan la idea de actuar en la complejidad. Quien pone un énfasis especial en el tema es J. de Rosnay (2000). Actuar en la complejidad significa reconocer de entrada que la dinámica social no tiene lugar únicamente con base en leyes humanas ni tampoco se entienden o se explican exclusivamente en términos de leyes o acontecimientos humanos. Precisamente por ello, actuar en complejidad significa alcanzar una visión de largo alcance, que no es sino una forma genérica de hablar de interdisciplinariedad.

Por su parte, la idea de aprovechar la complejidad (*harnessing complexity*) se funda en un trabajo de R. Axelrod y M. Cohen (1999). En un mundo complejo –esto es, crecientemente complejo– debemos poder mejorar las cosas sin que podamos o sin que haya necesidad de controlarlas plenamente.

Hasta el momento la forma más exitosa con la cual la ciencia en general ha logrado una explicación del mundo, que la diferencia claramente de la magia,

la religión y el mito, ha sido con base en leyes. Las leyes científicas parecen ser la quintaesencia de la ciencia y el verdadero fundamento arquimédico de la naturaleza y el mundo.

Sin embargo, como lo señala con acierto N. Cartwright (2005), las leyes que explican el mundo y, de manera aún más radical, el conjunto de leyes de la ciencia, de ninguna manera constituyen una pirámide ni un todo indiferenciado. Por el contrario, en el mejor de los casos las leyes científicas conforman retazos del mundo (*patchwork*). En efecto, las leyes de la ciencia en general –leyes físicas, químicas o biológicas, por ejemplo– suministran buenas visiones de parcelas del mundo, pero no pueden presentarse con un valor universal y definitivo sin más, como había sido el caso hasta hace poco.¹⁶

La tesis que queremos defender en esta sección es que el mundo en el que vivimos no puede ser entendido en términos de leyes y generalidades, sino como un mundo fragmentado, con parches, con motas, y que la ciencia que responde ante él tiene el mismo carácter. Ya en diversos pasajes I. Prigogine sostiene que de cara a la ciencia y al mundo contemporáneo no es inevitable formular o descubrir leyes para ser un buen científico.¹⁷ Por el contrario, hoy en día la buena ciencia busca ante todo *explicar* los fenómenos incorporando un elemento que a todas luces es inevitable: el aprendizaje de que el mundo está esencialmente marcado por incertidumbres.

El principio de incertidumbre (que en realidad es una expresión, puesto que su padre, W. Heisenberg, nunca formuló algo semejante a “este es el principio de incertidumbre”) es incorporado en el pensamiento contemporáneo a través de uno de los fundadores de la física cuántica. Este principio adquiere dos formulaciones distintas, así:

- i) De acuerdo con W. Heisenberg, no es necesario conocer el mundo *en todos sus detalles* para vivir en el mundo y para conocerlo y explicarlo;
- ii) según I. Prigogine, la incertidumbre del mundo consiste en el hecho de que el futuro no está dado de antemano y de una vez para siempre.

¹⁶ Al respecto, el estudio más importante que muestra “desde adentro” el carácter provisorio de las leyes físicas es el que lleva a cabo J. de Magueijo (2004 y 2006), en el cual logra establecer que éstas sufren las limitaciones de un universo evolutivo, y que, por definición, la evolución marca el carácter provisional y transitorio de las leyes de la naturaleza.

¹⁷ Cfr. Maldonado, C. E. (2005). *Termodinámica y complejidad. Una introducción para las ciencias sociales y humanas*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.

En el contexto de complejidad, es indispensable tener en cuentas ambas formulaciones.

Por tanto, como se aprecia con facilidad, la incertidumbre no tiene ningún carácter psicológico o psicologista; tampoco es un rasgo o un componente epistemológico. Más aún, la incertidumbre constituye un rasgo *ontológico* del mundo. Queremos sostener que este rasgo se funda ulteriormente en la naturaleza evolutiva de la realidad.

Contras las lecturas de tipo fundamentalista o tradicional en contra del principio de incertidumbre, este no implica, en manera alguna, que las certezas y las verdades ganadas a lo largo de la historia de la cultura y de la ciencia en general desaparezcan o pierdan valor. Todo lo contrario. Lo que sucede es que al lado de aquellas certezas y verdades hemos aprendido *adicionalmente* la incertidumbre, cuya doble raíz nos dirige hacia el ámbito de la mecánica cuántica y hacia los sistemas alejados del equilibrio o con equilibrios dinámicos.

Como se aprecia sin dificultad, nos encontramos de frente con tres teorías imprescindibles (dudamos en llamarlas “fundamentales”, a la manera de una teoría —¡tres, en rigor!— fundamental de la naturaleza; una expresión que se remonta a la obra de R. Feynman): la mecánica cuántica, la teoría de la evolución y la complejidad. Podríamos argumentar a favor de la idea según la cual las dos primeras podrían integrarse en la tercera. Sin embargo, a fin de evitar, por lo pronto, cualquier crítica de tipo reduccionista, queremos afirmar que existe una sólida e irrompible vinculación entre las tres. De este modo, pensar en términos de complejidad implica, concomitantemente, pensar en términos evolutivos o de dinámicas, procesos y fenómenos cuánticos.

Ciencias de la complejidad y pluralismo lógico: las lógicas no-clásicas

Pensar en términos de complejidad significa pensar en términos de pluralidad y diversidad. Mejor aún, la complejidad es el resultado mismo de la diversidad de un sistema determinado, o de la historia de un fenómeno o incluso de la diversidad del comportamiento de un fenómeno determinado.

Sin embargo, esta idea no debe ser entendida en un sentido simple, como si la sola idea de pluralidad implicara necesariamente la existencia de complejidad. Más aún, es el hecho de que como tratamos con procesos de complejidad creciente, este carácter implica o genera la idea misma de diversificación.

Cabe detenernos en una idea aparentemente superficial: se trata del modo plural de hablar de las ciencias de la complejidad. En términos generales, la forma como toda la historia de Occidente se ha referido al conocimiento ha sido en singular. En la cultura académica y científica en general es habitual hablar (y escuchar hablar, o leer) de “la filosofía griega”, incluso de “la filosofía”, la ciencia clásica, o en referencia al Medioevo, de “la teología”, y otras semejantes. Detrás de este uso del lenguaje se esconde abiertamente, o de manera implícita, la idea según la cual existe un solo tipo de conocimiento que merece ese nombre (“la filosofía”, “la ciencia”, etc.), o bien, en otro caso, que cualquier otro tipo de conocimiento semejante sólo adquiere validez y racionalidad con referencia a si se inscribe en o bien si es legitimado por el conocimiento que de manera excelsa y por definición se define como central o único.¹⁸

A simple vista, esta observación daría la impresión de que se trata de simples cuestiones semánticas. Lo cierto es que no solo parte de la reflexión consiste en el manejo de los usos del lenguaje, sino también que hemos aprendido que hacemos cosas con el lenguaje (ayer) (más adelante consideramos el papel del lenguaje en la producción de ciencia, en particular de ciencia nueva).

Las ciencias de la complejidad se sitúan en una tradición reciente que no solo comprende al mundo de manera plural sino que, en correspondencia, se asumen y se desarrollan a sí mismas de forma plural. Por tanto, hablamos con total seguridad de ciencias –ciencias de la complejidad. Ante la pregunta por qué existe la complejidad, no hay una sola respuesta, sino varias, diversas respuestas. Esto exige poner de manifiesto de manera explícita que el hecho de que haya una pluralidad de respuestas y enfoques no significa, de ninguna manera, la defensa –cualquiera– de posturas relativistas o eclécticas.

La pluralidad de resultados que la complejidad de la naturaleza nos suministra *contrario sensu* a una simplicidad o una pluralidad reducida de resultados que la cultura y la sociedad admite, concibe, piensa o está dispuesta a aceptar.

¹⁸ A su manera, J. Derrida hace la crítica de este tipo de pensamiento, particularmente en *A la marge*, acerca del carácter cerrado, dominante y excluyente de la forma como la historia Occidental se ha referido a sí misma y a cualquier otro tipo de conocimiento que sea como la suya; así mismo, G. Vattimo, en una postura distinta, ha hecho el llamado a un pensamiento débil –relativamente al pensamiento llamado “fuerte”. Son posturas que representan claramente en qué consiste la crítica o actitud deconstructiva de la llamada “posmodernidad”.

Pues bien, el campo propicio para el estudio de la pluralidad es el de la lógica, a condición de que ya no se piense simplemente en la lógica formal clásica –singular, por definición–, sino en las lógicas no-clásicas. Aquella es conocida como la lógica simbólica o como la lógica matemática. En esencia, trabaja con y se funda en lenguajes artificiales, por ello su énfasis en la validez (tablas de validez).

Las lógicas no clásicas constituyen una alternativa y una complementariedad a la lógica formal. En ocasiones, debido a que la lógica formal clásica es demasiado rígida; en otras, porque sucede todo lo contrario, y no aporta el rigor suficiente en la comprensión y en la elucidación de las estructuras y modos de racionalidad de la ciencia, de la vida y del mundo en general.

Las lógicas no-clásicas más importantes son:

- Lógica paraconsistente.
- Lógica de la relevancia.
- Lógica del tiempo.
- Lógica difusa.
- Lógica polivalente.
- Lógica modal.
- Lógica cuántica.
- Lógica epistémica.
- Lógica libre.
- Lógica intuicionista.

Las lógicas no-clásicas nacen en los años cincuenta y hasta la fecha mantienen su desarrollo.¹⁹ Entre algunas de ellas se dan vasos comunicantes más flexibles con la lógica formal clásica; otras mantienen una distancia mayor con ella. Como quiera que sea, el primer hecho que merece resaltarse es que a todas luces se trata de un *pluralismo lógico* –es decir, un pluralismo en la forma de entender y de explicar el mundo, tanto como un pluralismo de la racionalidad. Al fin y al cabo la lógica es un estudio de la racionalidad y

¹⁹ Esta lista no es exhaustiva; tan solo presenta aquellas lógicas no-clásicas que han superado la lactancia, por así decirlo. Para ser rigurosos, a esta lista habría que agregar la lógica no-monotónica, las lógicas desviadas (*deviant logic*) (S. Haack), la lógica no-monotónica, la lógica deóntica, la lógica probabilística, la lógica de fabricación (*fibring logics*). Sin ninguna duda, el panorama más integral sobre las lógicas no-clásicas hasta la fecha se encuentra en Gabbay and Guenther, 2001.

acerca de la inteligibilidad del mundo y de la naturaleza. Solo que, a diferencia de la lógica formal clásica, la lógica lo es de cualquier cosa: hay lógica y podemos hacer lógica de las papayas, del deporte, de los animales o de lo que nos plazca o interese.

Si el primer rasgo del estudio de la complejidad es la pluralidad de ciencias –incluyendo modelos, teorías, conceptos y metodologías– que contribuyen sinfónicamente, por así decirlo, a la respuesta acerca de cómo y por qué las cosas son complejas o se vuelven tal, con seguridad la mayor contribución puede venir de la lógica en general y de las lógicas no-clásicas en particular.

Sin embargo, al respecto existe una dificultad notable: no existe un camino directo –mucho menos una autopista– que conecte el corpus sólido y ortodoxo de complejidad con las lógicas no-clásicas. A lo sumo, hay diversos senderos, muchos de ellos a través de territorio inhóspito, vías improvisadas, en fin, caminos de ensayo, si se permite la analogía. Esto es más cierto cuando se va desde las ciencias de la complejidad hacia a la(s) lógica(s), pero es menos áspero y más posible cuando sucede en sentido contrario (Jacquette, 2006; Peña, 1993; Palau, 2002; Priest, 2008; Goble, 2005; d’Ottaviano, 2009).

Es importante tener en cuenta que si bien el terreno de trabajo en lógica en general –tanto en la lógica simbólica como en las lógicas no-clásicas– es el lenguaje, la lógica contemporánea en general es tanto un estudio acerca de la racionalidad misma como del mundo en relación con los temas de racionalidad; es decir, cómo *pensamos* el mundo y cómo es el mundo *que pensamos*. De esta suerte, una simple mirada a la diversidad de lógicas no-clásicas permite entender que asistimos a un pluralismo lógico acerca del mundo, y este constituye con toda seguridad el rasgo distintivo de los sistemas complejos no-lineales.²⁰

La semántica de las lógicas no-clásicas es habitualmente la de los mundos posibles, una idea que se remonta a la obra de D. Lewis (*On the Plurality of*

²⁰ Al respecto, es posible decir que el camino habitual y en cierto modo el más fácil o elaborado hasta la fecha ha sido el del reconocimiento de la complejidad como pluralidad por vía de la biología, a partir justamente de la diversidad de la vida: la biodiversidad. Diversidad que se dice en tres planos –diversidad genética, diversidad biológica o natural, y diversidad cultural, pero que en realidad conforma una unidad indivisible. En esta línea, la biología no debe ser vista como opuesta o distinta a la ecología –una discusión que aún ocupa a una parte de los biólogos, de formación clásica, hay que decirlo–, y ambas, ecología y biología, se integran alrededor del reconocimiento y del estudio de la diversidad de la vida. El título genérico en el que se da esta integración es “nueva biología”. Para un desarrollo en general de esta idea, cfr. Mitchell, 2003.

Worlds, 1986). Puesto que la lógica en general se ocupa del problema de las consecuencias o implicaciones (*entailment*) —es decir, qué sigue después de qué—, el trabajo con las lógicas no-clásicas en general tiene que ver con una variedad de formas de implicación, o si se quiere de inferencia. Formas que no respetan, por ejemplo, el principio de no-contradicción (o de contradicción, como se le designa a veces), o también que no obedecen al principio de idempotencia, mostrando que justamente hay una pluralidad de modos de lograr una demostración y que cada una, según ciertas reglas, puede ser perfectamente válida sin que por ello descarte a otras; formas que reconocen diversos sistemas deductivos, y ya no uno sólo, como en la lógica occidental tradicional y por extensión en toda la historia de la ciencia occidental en general; en fin, formas que ponen de manifiesto que efectivamente es posible aquellas que rechazan la idea de tercero excluido y también otras que rechazan la idea de la monotonicidad, de la implicación; incluso formas que no aceptan las leyes de Morgan, que se encuentran precisamente en la base de toda la lógica formal clásica —al lado de las contribuciones de Boole y de Frege, en sus comienzos.

Con seguridad, el mayor escándalo de todos los que produce el pluralismo lógico de las lógicas no-clásicas con respecto a *toda* la historia de la humanidad occidental es el reconocimiento explícito de que no existe una verdad única (*there is no one true logic*), sino que en realidad asistimos a una pluralidad de verdades o de sistemas de verdad. Suponiendo que tengamos la sensibilidad e inteligencia de vincular esta idea con el teorema de la incompletud de Gödel, asistimos a un cisma de la racionalidad occidental y parcialmente, por el mismo camino, a entender por qué razón las ciencias de la complejidad aún están lejos de ser ciencia normal en sentido pedagógico, sociológico o cultural de la palabra.

Como se aprecia sin dificultad, los problemas que se abordan y que se encuentran en la base de las lógicas no-clásicas son numerosos, y prácticamente todos tienen una envergadura filosófica. Esta es una razón por la cual las lógicas no-clásicas se denominan de forma más adecuada, afirmativa o positivamente, como *lógicas filosóficas*.²¹

²¹ Si cabe la expresión, las ciencias de la complejidad están, en consecuencia, atravesadas “de entrada tanto como de salida” por motivos filosóficos. Lo cual, naturalmente, no debe ser entendido en sentido clásico, como si se tratara de vindicar a la filosofía por encima de otras ciencias y disciplinas,

La lógica ha dejado de ser una ciencia absoluta e inalterable. Han sido numerosas las críticas sobre Quine acerca de su llamado hacia la falibilidad de la lógica –análoga a la falibilidad misma de las matemáticas a raíz de la crisis del programa de formalización hilbertiano. Pero nada de ello implica, en absoluto, que la lógica no sea universal, todo lo contrario (Gabbay, *et al.*, 2001). Sólo que la universalidad de la lógica –he aquí una hermosa paradoja– es plural.

Como se aprecia, la noción de pluralidad se corresponde con la idea de dinámica. Ambas, sostenemos, conforman las bases del sistema bípedo que son las ciencias de la complejidad –si se nos concede la metáfora.

¿Cuáles son las ciencias de la complejidad?

A fin de comprender cuáles y qué son las ciencias de la complejidad, es preciso situarlas en el marco cultural en el que existen y se desarrollan.

En la historia de la humanidad nunca ha habido tantos científicos y tecnólogos como hoy. Esta idea es ya un lugar común en los estudios sobre sociología de la ciencia, historia y filosofía de la ciencia y estudios culturales sobre ciencia y tecnología (por ejemplo, los estudios CTS). Así mismo, nunca habíamos sabido tanto sobre el universo en general, de tal suerte que lo que hemos aprendido sobre la realidad en general constituye el 90% o más de lo que jamás hemos sabido en toda la historia de la humanidad junta. En la misma línea: hoy sabemos más matemáticas, gracias a los desarrollos de la matemática en el siglo xx, que en toda la historia de la humanidad anterior. Así, esta clase de reconocimientos y de extensiones se amplían sin dificultad, brindando una idea clara acerca de la ciencia y la tecnología contemporánea, y el enorme contraste con toda la historia anterior de la especie humana.

Dicho de manera general, el estudio de la complejidad es exactamente el estudio de sistemas dinámicos (aunque en rigor, desde el punto de vista físico, la dinámica como tal forma parte de la ciencia moderna, más exactamente de la mecánica clásica. Así, comprender o caracterizar el estudio de los fenómenos de complejidad creciente como sistemas dinámicos es un arcaísmo –que se alimenta de la física– y no contribuye a entender por ejemplo la especificidad de la complejidad relativa a la ciencia de la modernidad). Se

lo cual sería permanecer aún en la vieja historia de “las dos culturas” que precisamente el espíritu de la complejidad busca superar).

trata, pues, de aquella clase de sistemas que son esencialmente variables, cambiantes, marcados por el signo de la irreversibilidad, y para los que conceptos como “atractores extraños”, “turbulencias”, “inestabilidades”, “recursividad” y “bucles”, “sistemas alejados del equilibrio”, “sistemas al borde del caos”, “ruptura de simetría”, “iteración” y otros semejantes brindan una muy buena indicación acerca de hacia dónde se debe mirar cuando queremos estudiar y explicar la clase de fenómenos, comportamientos y sistemas que entran en el ámbito de la complejidad.

Una característica importante de este grupo de ciencias es que permiten una doble comprensión de la realidad y de los fenómenos que tienen o pueden tener lugar. Por un lado, en consonancia con el espíritu de la ciencia clásica, la complejidad es una medida cuantitativa de un sistema; por ejemplo, de la aleatoriedad de un sistema o de su dinámica y así sucesivamente. Desde este punto de vista, las ciencias de la complejidad coinciden con la ciencia en sentido habitual en medir la realidad, los fenómenos y el mundo; esta medición puede conducir hacia un dato numérico o descansar en él. En sentido clásico, las ciencias de la complejidad emplean y, sobre todo *crean*, matemáticas altamente sofisticadas, y se refieren o pueden referirse a los sistemas dinámicos no-lineales en términos cuantitativos. Ello no significa necesariamente que hoy en día siga siendo válida la idea de Galileo según la cual el lenguaje de la naturaleza está escrito en caracteres matemáticos. Es más, con seguridad, la ciencia de punta contemporánea ya no afirma tal cosa *sin más*, como sí fue el caso en toda la historia de la ciencia moderna.

Por otra parte, las ciencias de la complejidad permiten una comprensión de los sistemas dinámicos que no se funda ni se reduce, de manera imperativa, a mediciones de tipo cuantitativo, por el contrario, admiten—en paralelo, digamos, con las mediciones de tipo cuantitativo— una explicación y una comprensión más amplia de los sistemas complejos adaptativos. En muchas ocasiones se ha hablado de esta segunda comprensión como de “matemáticas cualitativas”, queriendo hacer referencia a las “nuevas matemáticas” en contraste con la matemática clásica de corte rigurosamente cuantitativo. En general, esta idea puede ser aceptada en su espíritu, pero requiere de algunas precisiones puntuales—las cuales rayan con o se sitúan en lo que puede denominarse en propiedad como una filosofía de las matemáticas de la complejidad.

La expresión genérica de matemáticas cualitativas hacen referencia a la revolución que se produce en matemáticas a partir de la emergencia de

las geometrías no-euclidianas, los trabajos de Cantor, el surgimiento de la topología, que adicionalmente presuponen contribuciones de Riemann, el programa formalista y su crítica de D. Hilbert, y que tanto funda como atraviesa el estudio del caos, los fractales, la termodinámica del no-equilibrio, la ciencia de conexiones y las lógicas no-clásicas.

Dicho de una manera adecuada, es posible sostener sin dificultad alguna que el trabajo en complejidad en general admite –y en muchas ocasiones exige– tanto un trabajo de cuantificación como lo que genéricamente se denomina una comprensión cualitativa de la no-linealidad, solo que ninguna de las dos posibilidades debe ser asumida en el espíritu de la polémica en torno a las dos culturas –la científica y la de las humanidades– como si fuera la ocasión de triunfo de la una o la transformación de la otra. Con seguridad, los mejores trabajos de punta en complejidad en el mundo emplean tanto matemáticas fuertes –ecuaciones, fórmulas, conceptos– como métodos computacionales –programas, simulaciones, gráficos. Pero, a la vez, el carácter dominante, exclusivista acaso, o excluyente de la matematización de la ciencia moderna ya no tiene lugar sin más, puesto que, para decirlo en términos amplios (aunque algo ambiguos, por lo pronto), lo propio del trabajo en complejidad es una aproximación de tipo interdisciplinar –como nunca antes lo había conocido la historia de la ciencia en general.

Dicho en lenguaje filosófico: la complejidad es ese tipo de ciencia de corte eminentemente heraclíteo y que, por primera vez en la historia de la humanidad, no solo traza una gran distancia con respecto a la ciencia, al pensamiento y a la cultura que se funda en la escuela de Samos y de Elea: Melisso de Samos, Zenón de Elea y Parménides, sino que además marca un contraste considerable con respecto a la ciencia y la cultura que se funda en de Platón y de Aristóteles o se deriva de ellos.

En efecto, lo que había prevalecido en la historia de la humanidad occidental era el conocimiento de realidades estables, fijas o regulares (periódicas). Desde luego, siempre se ha sabido de fenómenos tales como las contingencias, las irregularidades, los saltos bruscos, las sorpresas, en fin, lo imprevisto. Pero esta clase de realidades y otras semejantes habían permanecido por fuera de la racionalidad científica y filosófica. En el mejor de los casos, entraban en consideración gracias al arte y la literatura.

Una manera precisa de situar la clase de realidades que constituyen la complejidad es, por ejemplo gracias al lenguaje del caos, como aperiódicas.

Es decir, se trata de esa clase de fenómenos y comportamientos que no son regulares, cíclicos o estables.

Como se aprecia, ni siquiera en el lenguaje de la filosofía tradicional puede decirse que el tema de trabajo en complejidad sea el movimiento, a diferencia del ser, puesto que sencillamente tampoco interesa el movimiento de tipo regular y cíclico, para el cual, por lo demás, la ciencia clásica reservó el concepto de “revolución” – como en “revoluciones celestes”. Mejor aún, se trata de esa clase de movimientos –dinámicas– que no cabía esperar, que son irregulares, sorprendidos, súbitos e irreversibles. Básicamente, el trabajo en complejidad consiste entonces en explicar dos cosas: el origen de esta clase de movimientos y realidades, y su regularidad o la identificación de algún patrón que explique su comportamiento. Sobre esta base ha de ser posible una previsión ulterior de esta o de otra clase parecida de dinámicas.

Ahora bien, existe una circunstancia singular que resulta escandalosa particularmente para la filosofía clásica. Se trata del hecho de que la mayoría de preguntas y problemas filosóficos del mundo contemporáneo –en el sentido más amplio de la palabra– hoy ya no son formuladas por filósofos en el sentido técnico o profesional de la palabra, como sí grosso modo había sido el caso desde la Grecia antigua hasta comienzos o mediados del siglo xx. Pero aún más sorprendente resulta ser que la mayoría de las respuestas a las preguntas fundamentales del ser humano hoy en día no las aportan los filósofos, en marcado contraste con la usanza en el curso de la historia de Occidente. Tal es por lo menos la situación cuando se la ve con los ojos de la historia de la filosofía o también de la inscripción de la filosofía en cada época de Occidente.

Por el contrario, hoy en día las preguntas y problemas más profundos son formuladas principalmente por parte de científicos –en el sentido más amplio de la palabra. Así mismo, en correspondencia, la mayoría de las soluciones o respuestas a dichas preguntas también son aportadas por la comunidad de científicos.

Pues bien, queremos decir que el estudio de las ciencias de la complejidad constituye –por así decirlo– un estudio de caso particularmente conspicuo de lo que estamos mencionando. Hay quienes sostienen que la complejidad (no) es (otra cosa que) la respuesta a las preguntas filosóficas de la ciencia contemporánea que la ciencia misma no puede resolver. Si ello es cierto, se impone entonces una presentación y discusión cuidadosa de lo que son las ciencias de la complejidad.

Entre los autores clásicos de complejidad, I. Prigogine ha sido el que con mayor claridad y lucidez ha reconocido este rasgo y lo ha puesto suficientemente de manifiesto, a plena luz, sobre la mesa. Prigogine (1980) habla del estudio físico de la complejidad como de la física del devenir (*the physics of becoming*).

La tabla 1.1 presenta las ciencias de la complejidad,²² los autores que son considerados los padres de dicha ciencia y la fecha de su origen. Seguidamente haremos algunas precisiones necesarias al respecto.

Tabla 1.1. Las ciencias de la complejidad

Termodinámica del no-equilibrio	I. Prigogine	Premio Nobel, 1977
Caos	E. Lorenz – D. Ruelle	1962-1977
Fractales	B. Mandelbrot	1977
Catástrofes	R. Thom	Medalla Fields 1977
Ciencia de conexiones	L. Barabasi, S. Strogatz, Watts	2001-2003
Lógicas no-clásicas	A partir de los años 1950s hasta la fecha	Numerosos autores

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, esta lista tan solo tiene valor desde el punto de vista de la historia y la filosofía de la ciencia.²³

Propiamente hablando, actualmente no existe una lista que nos indique *estas son las ciencias de la complejidad*. Ningún instituto ni centro de investigación de punta en el mundo contiene un listado semejante. La opción es señalar una serie de campos o tópicos de trabajo en complejidad, los cuales

²² Este argumento se encuentra ampliado en Maldonado, C. E. “Ciencias de la complejidad: ciencias de los cambios súbitos”, en *Odeón*, No. 2, 2004-2205, pp. 85-125. En ese artículo hace falta una referencia especial a la ciencia de conexiones. Por esta razón más adelante se presenta el tema, con preferencia sobre los demás, y también se adopta la línea de presentación y discusión centrada en los supuestos o las bases de este conjunto de ciencias: las teorías de fluctuaciones, de turbulencias, de las inestabilidades y de la evolución.

²³ Desde el punto de vista de políticas de ciencia y tecnología la situación es tal que, por ejemplo, si un grupo de investigación o un investigador presenta un proyecto sobre el caos –en algún sentido– para financiación o para un concurso, y otro más lo hace sobre redes complejas, es muy probable que el proyecto sobre caos no sea favorecido, y sí el de redes complejas. La razón tiene que ver con la actualidad, la innovación y la relevancia del tema. El caos, por ejemplo, es un tema que prácticamente se da por sentado (*is taken for granted*), es decir, ya es algo que va de suyo en la cultura científica contemporánea.

tendrían por derivación el valor de precisar el tipo de estudios y las direcciones en las que se mueve y hacia dónde se dirige la investigación en complejidad en el mundo.

Una lista en este sentido incluye áreas como las siguientes:²⁴ la física de los sistemas complejos; emergencia, innovación y robustez en los sistemas evolutivos; procesamiento de información y computación en la naturaleza y en la sociedad; dinámica y estudios cuantitativos en comportamiento humano, historia e instituciones sociales; emergencia, organización y dinámica de los sistemas vivos. Los campos de aplicación y estudio comprenden la administración, la educación, sistemas militares, ingeniería, violencia étnica, sistemas de salud pública, sistemas vivos, métodos multiescalares, economía, entre otros.

Una observación más puntual debe poner de manifiesto que tratamos con ciencias –en plural– que contienen numerosos modelos, lenguajes, enfoques, metodologías, que incluso presuponen una visión prismática desde el punto de vista filosófico –todos novedosos, sugestivos y muchos en proceso, inacabados–, distintos de los de la modernidad. Se trata de elementos tales como ecuaciones de Lotka-Volterra, ecuaciones de Navier-Stokes, el conflicto entre componentes y estructuras de Lagrange frente a ecuaciones hamiltonianas, transformación del panadero, atractores extraños, fractales, leyes de potencia, las cascadas, exponentes de Lyapunov, grupos y operadores de Lie, teorema de KAM, trabajos con mapas (planos, iterativos, estocásticos, no lineales), teoría de grados, funciones de distinto tipo, álgebra multilineal, la teoría de la criticalidad autoorganizada, sistemas multi-agentes, entre otros, todo ello *al lado* de lo mejor que la ciencia –en sentido amplio– habitual que no trabaja directamente con complejidad dispone.

Un primer balance de estos modelos y herramientas propias de la complejidad aparece en P. Anderson (1999) y está organizado en varios grupos, de la siguiente manera:

- La teoría matemática de la complejidad, que se origina en los trabajos de Turing y Von Neumann

²⁴ Este párrafo tiene en cuenta la presentación de Institutos como Santa Fe y NECSI por considerarlas suficientemente inclusivas. Una revisión de otros centros e institutos de punta en el mundo aborda una lista pormenorizada de campos de trabajo e investigación que de todas maneras quedan incluidos en los que mencionamos a continuación.

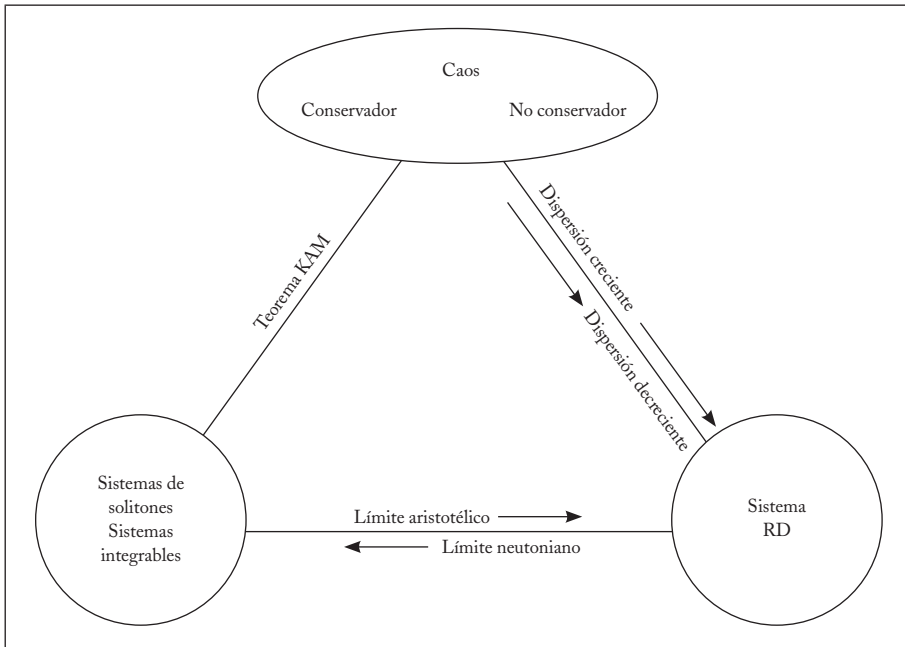
- La teoría de la información, que procede de Shannon y Weaver. Los trabajos sobre mediciones de la complejidad, con énfasis especial en las contribuciones de Ch. Bennett.
- La teoría ergódica –que no es, estrictamente hablando, de origen complejo–, los trabajos con mapas dinámicos, caos, y los trabajos de Kolmogorov. Aquí mismo, las contribuciones de las variables relevantes e irrelevantes y las consecuencias del teorema de Liouville para los sistemas dinámicos.
- Las multiplicidades aleatorias, la ruptura de la ergodicidad, la teoría de la percolación, las redes neurales, y otros semejantes.
- La criticalidad autoorganizada, y los fractales.
- La inteligencia artificial y, por derivación, la vida artificial.
- Los “programas húmedos” (*wetware*), que en general son los esfuerzos por conocer sistemas complejos como el cerebro y la mente.

El mérito de esta lista es que al tiempo que menciona algunos puentes con lo más relevante –desde el punto de vista de la complejidad– de la ciencia contemporánea no-compleja, puede contribuir a la explicación de los sistemas no-lineales; así mismo, señala algunas de las rutas más importantes de trabajo e investigación en complejidad. Con todo, los títulos, autores y conceptos mencionados exigen un trabajo posterior de profundización para entender adecuadamente de qué se trata a propósito de ellos.

Una segunda ponderación de los instrumentos, modelos y lenguajes de la complejidad lo presenta Scott (2007), ver figura 1.2.

En este esquema se elabora una propuesta de articulación de *ejes* antes que una enumeración de modelos y teorías. El énfasis está cargado, manifiestamente, del lado de la física; aun así, suministra un cuadro coherente que permite trazar algunos puentes con la ciencia y la filosofía tradicionales –Aristóteles y Newton, particularmente, según Scott. Se destaca en especial los conectores de la aleatoriedad y las flechas invertidas de dispersión creciente que comunican al caos con los sistemas de difusión-reacción.

Figura 1.2. Interrelaciones entre sistemas caóticos de baja dimensión, sistemas de solitones y sistemas de reacción-difusión (RD)



Fuente: Scott, 2007.

Por otra parte, este esquema permite apreciar algo que ya es un lugar común en complejidad y en ciencia en general. Se trata de la casi identificación entre complejidad y caos –algo que, si bien traduce una percepción bastante generalizada de una parte importante de la comunidad científica y académica, no es enteramente cierta, cuando se la mira en detalle, pues son dos cosas diferentes: el caos y la complejidad. La manera más directa de decirlo consiste en afirmar que no por ser *caotólogo* se es, necesariamente, *complejólogo*. Pero, al revés, cuando se trabaja complejidad es posible, e incluso en determinados casos, necesario, atravesar por los dominios del caos. Algo semejante puede y debe decirse con respecto a los fractales y las demás teorías y modelos que se encuentran en la base del estudio de los sistemas de complejidad creciente.

Ahora bien, es importante poner de manifiesto un rasgo filosófico de las ciencias de la complejidad. Se trata del hecho de que, en contraste con la tradición, en complejidad aprendemos que no existen diferencias de naturaleza entre las cosas y los fenómenos en general, sino solo diferencias de grados cualitativas o de organización.

Aristóteles y la tradición aristotélica afirmaron – durante cerca de dos mil trescientos años– que tanto en la naturaleza como en la sociedad existen diferencias de naturaleza. La expresión puntual en Aristóteles es la existencia del alma racional, el alma animal y el alma vegetativa; esta idea se extiende y se traduce a todos los ámbitos a los que se refiere la tradición aristotélica en ciencia y en filosofía.

Por tanto, de acuerdo con esta idea es imposible que una cosa deje de ser lo que es, que se transforme en otra, o que existan vasos comunicantes entre los diferentes reinos de la naturaleza –animal, vegetal y racional– e incluso entre diversos niveles y escalas de estos reinos. Con base en esta filosofía se crearon discursos y prácticas religiosas, políticas, económicas y militares, y se enfatizó (= justificó) la idea de la existencia y necesidad de jerarquías en la naturaleza.

Pues bien, uno de los hechos evidentes de que las ciencias de la complejidad constituyen una auténtica revolución científica (en el sentido kuhniano de la palabra) es que aprendimos que esa idea de diferencias de naturaleza es un artilugio que se revela como un engaño o un error a la luz de los descubrimientos y reflexiones contemporáneos.

Una forma de reconocer lo dicho se revela en el desarrollo mismo de la tabla de elementos periódicos –iniciada por Lavoisier, sistematizada por Mendeleiev y desarrollada hasta la fecha. La tabla de elementos periódicos representa el alfabeto de la totalidad del universo conocido y por conocer. No existen diferencias de tipo material (hylético) u ontológico entre la vida y la no-vida. Las diferencias son simplemente cualitativas, de grados o de organización. Por ejemplo, un fenómeno puede caracterizarse porque posee más cadmio que otro; mientras que otro porque tiene más polonio o carbono que otro, y uno más porque carece de un octonio frente a otro. Los ejemplos pueden multiplicarse y llenarse de contenidos a voluntad.

El hilo conductor del estudio de los sistemas complejos no se funda en elementos aislados ni en criterios a priori de jerarquización, sino en temas de organización en general. Precisamente por ello, muchos autores coinciden en que el pensamiento de la complejidad se da *a la manera* de la biología –la cual tiene entre sus manos, mucho más que la física o la química, diversidad de tipos y relaciones de organización todas variables (= vivas, justamente).

La naturaleza –desde la física de partículas hasta la genética, desde la química inorgánica hasta la biología y la ecología– no inventa seres, estructuras,

formas y comportamientos enteramente novedosos; lo que hace es mejorar, modificar, inaugurar en ocasiones, a partir de relaciones y organizaciones precedentes, siempre con discreción y continuidad. En síntesis, la naturaleza es una mixtura fina de azar y de necesidad. La complejidad estriba en conocerlas y trabajar con ellas.

Ahora bien, dentro del desarrollo de las ciencias de la complejidad, el capítulo más reciente trata de lo que puede designarse como las redes complejas, o la ciencia de conexiones,²⁵ desarrollada a partir de la teoría de grafos, cuya paternidad se le concede a D. Watts, L. Barabasi y S. Strogatz (no obstante algunas diferencias profundas entre ellos).

La idea básica de las redes complejas estriba en que la complejidad del mundo o de los sistemas del mundo o de los fenómenos, según se prefiera, puede explicarse de manera satisfactoria por procesos dinámicos que generan mapas móviles de acuerdo con los tipos de relaciones que existen o se generan entre los componentes de un sistema y entre este y su entorno o medioambiente.

El rasgo más radical de la ciencia de conexiones es el hecho de que varios modelos, teorías y ciencias que antes tenían un cuerpo propio quedan integrados en el estudio de las redes complejas. Tal es el caso de la criticalidad autoorganizada (SOC), la teoría de cascadas y la teoría de percolaciones, así como de numerosos elementos de la teoría de equilibrios dinámicos; aunque también puede y deben incluirse aquí múltiples aspectos de la teoría de juegos, de la teoría de la decisión racional y de la teoría de la acción colectiva. Se trata pues del desarrollo de una síntesis magnífica con un espíritu, lenguaje, enfoques y contribuciones propias, no obstante lo reciente del nacimiento de esta ciencia.

De acuerdo con el estudio de las redes complejas, su estructura consta de tres grados, así: redes o nodos (*links*), clusters y hubs (sistemas de clusters), en orden de complejidad creciente. Tanto sus topologías como sus estructuras

²⁵ La diferencia a simple vista trata de marcar una distinción semántica, conceptual y de enfoque con respecto a la teoría de redes (sin más) que es anterior a la ciencia de redes, y ajena o exterior a esta. El estudio de las redes forma parte de áreas como la ingeniería en general, la física y los campos derivados de ellas. El estudio de redes (sin más) no sabe nada de complejidad, y es eminentemente lineal. Incluso uno de sus factores clave es la eficiencia y la eficacia –algo perfectamente alejado del universo de los sistemas complejos no-lineales. Por esta razón, se las denomina como redes complejas o como ciencia de redes.

son complejas y heterogéneas; su estudio habitual se basa en características estadísticas que ponen de manifiesto patrones de conectividad complejos y sutiles.

Lo anterior nos sirve para hacer una observación: en la buena ciencia de punta en general y en las ciencias de la complejidad en particular, la sensibilidad o la inteligencia del investigador se enfoca, más que en los planos generales, en los detalles finos, en los giros locales, en las singularidades o contingencias que se ocultan detrás de la generalidad, en desviaciones estándar e inestabilidades generadoras de orden y complejidad.

Las redes complejas tienen como sello característico colas pesadas y grandes fluctuaciones –fluctuaciones de largo alcance y amplio espectro–, así como propiedades denominadas libres de escala (*scale-free*) y correlaciones no triviales tales como la conformación de clusters y de *hubs*. En muchas ocasiones estas generan ordenaciones jerárquicas altamente significativas.

La idea de no-trivialidad es un rasgo distintivo de dos de las ciencias o componentes presentadas en el estudio de los sistemas de complejidad creciente: las lógicas no-clásicas en general y las redes complejas. En términos históricos, la no-trivialidad hace referencia a la deuda que lo mejor de la ciencia y del pensamiento contemporáneo tienen con Gödel y con Turing. Esta idea se relaciona con varias cosas: el rechazo de un modelo deductivo único o prioritario –cerrado, en consecuencia–; la crítica a cualquier pensamiento o explicación de tipo tautológico; la preferencia por sistemas abiertos –indeterminados, eventualmente–, y por dinámicas crecientes y sorprendidas; En síntesis, la no-trivialidad tiene que ver con el carácter no conclusivo ni concluyente entre lo continuo y lo discreto.

Tal y como sucedió originalmente con las otras ciencias de la complejidad –con el caos, por ejemplo (Gleick, 1988), la termodinámica del no-equilibrio, la teoría de las catástrofes (teniendo en cuenta las contribuciones, muchas veces dudosas de Zeeman), o con el amplio uso y referencia de los fractales–, el estudio de las redes complejas es exactamente una *ciencia*, en el sentido preciso de que cubre, se aplica o explica numerosos ámbitos del mundo y de la naturaleza; pero es una ciencia compleja por cuanto no se reduce únicamente a una dimensión de la realidad –la social, o la natural–, sino que cruza, integra e ilumina diversos campos con contribuciones, analogías y transferencias entre dominios y áreas antiguas o tradicionalmente disímiles y hasta contrapuestos.

Como quiera que sea, cabe resaltar que gracias a la ciencia de conexiones por primera vez se ha hecho manifiesta una característica sugestiva de la complejidad en general: el carácter magnífico y estricto de su arquitectura. Dado el hecho de que durante toda la historia de la humanidad occidental hemos tomado el universo y lo hemos desagregado –lógica, conceptual, filosófica, científica y en muchas ocasiones incluso literal, físicamente– y al cabo fuimos incapaces de reunir las piezas del “rompecabezas” (= realidad, naturaleza, sociedad), las ciencias de la complejidad en general, y sobre todo el estudio de las redes complejas, ofrecen por primera vez en la historia de la cultura occidental la posibilidad de una composición “científica” del orden anteriormente fragmentado. “Científicamente”, esto hace referencia a una alternativa distinta a cosas como el eclecticismo, la improvisación o un cierto relativismo (*collage*, pastillaje o juego, como se habla por ejemplo en diseño).

En síntesis: mientras que a la luz de una mirada histórica pueden mencionarse claramente seis ciencias –incluidas las lógicas no-clásicas– como componentes de lo que genéricamente son las ciencias de la complejidad, su resultado evolutivo pone de manifiesto otro escenario.

El caos pudiera no ser considerado como una ciencia, sino como parte de la matemática en general. Siempre es importante distinguir caos y complejidad, puesto que no es posible identificarlos sin más. El estudio de los equilibrios dinámicos que originariamente conformaba a la termodinámica del equilibrio queda integrado a la ciencia de conexiones. La teoría de catástrofes “muere” como teoría matemática a favor del caos (pues resulta muy onerosa, lógica y conceptualmente hablando (= cuchilla de Ockham), aunque su valor permanece en otras consideraciones. Las propias lógicas no-clásicas aún no pueden alcanzar el estatus de “ciencias” de la complejidad. En realidad esta es más una posibilidad que requiere de un desarrollo, de una presentación y del aval de la comunidad académica en general. La ciencia que tiene mejores perspectivas es la de las redes complejas. Finalmente, en este mismo balance, tres teorías básicas componen y articulan a la complejidad: el cuerpo de conocimiento de los sistemas complejos no-lineales –en rigor una designación genérica–, la teoría de la evolución y la teoría cuántica. En el futuro encontramos aquí el caldo de cultivo para alcanzar una ciencia de nuevo tipo, distinta de la ciencia clásica –de espíritu y filosofía reduccionistas, deterministas y simplificadores.

Complejidad significa cambio, transformación

Queda dicho: en términos físicos, el estudio de la complejidad puede ser comprendido como una física del devenir. El lenguaje de complejidad no admite ambivalencia ni duda alguna: se trata de afrontar, explicar y vivir con temas como incertidumbre, flujos, procesos, entre otros. En términos matemáticos, se trata del problema de tiempos no polinomiales que nos pone frente a problemas difíciles, y por eso mismo relevantes; en términos filosóficos, de entender la realidad en términos distintos a “ser”, “igualdad”, “identidad”, “mismidad” y otros parecidos que terminan conduciéndonos, todos, hacia la metafísica occidental (*meta ta physiká*).

La dificultad de la complejidad radica en que hemos sido formados, durante cerca de dos mil quinientos años, en una determinada filosofía: una filosofía del ser, de la estabilidad, de la regularidad, de la periodicidad, y a lo sumo en ciclos y movimientos pendulares, oscilaciones periódicas, ciclos cortos, de mediano o de largo alcance, pero ciclos al cabo.

El tema de base de la complejidad es las transiciones orden/desorden, es decir, cómo el orden se rompe y da lugar a desorden; en otro sentido, cómo es posible que a partir del desorden surja orden. *Order out of chaos*, es la expresión habitual en inglés (que en español no se ha traducido correctamente).

El orden es el problema fundamental de la humanidad; es común a las religiones, al mito o la magia, a la ciencia, al arte y a la literatura. En ocasiones se han expuesto “causas primeras” o “causas últimas” para el orden; en otras, se ha producido el debate entre creacionismo y evolucionismo, o entre diseño y evolución. Desde otros puntos de vista se ha introducido la idea de un principio antrópico (Barrow *et al.*), que ha sido bien acogido por las religiones, sobre todo por alguna de las tres grandes religiones de Occidente.

Sin embargo, lo que hasta el surgimiento de las ciencias de la complejidad había permanecido era las *transiciones* entre el orden y el desorden. Así, pensar en complejidad significa hacerlo específicamente en términos de transiciones –transiciones continuas, entre estados, entre escalas, entre dimensiones, transiciones indefinidas, incesantes. Todo es cuestión de tiempo. No parece haber un punto estable –real o definitivo–, y si lo hay, como en ocasiones es efectivamente el caso, entonces es tan sólo provisional, inestable, transitorio justamente. Para el modo occidental de pensar, he aquí una idea verdaderamente radical.

Por tanto, la complejidad del mundo no es otra cosa que sus cambios y transformaciones, inestabilidades y fluctuaciones o los fenómenos y comportamientos que se dan en él. Justamente, son dichos cambios los que introducen la incertidumbre y el riesgo. Si los cambios del mundo fueran mínimos, controlados, predecibles, este carecería de complejidad. Lo que resulta maravilloso a la luz tanto de la historia y la filosofía de la ciencia como de la epistemología en general, es que accedimos al trabajo con complejidad propiamente en la segunda mitad del siglo xx, hecho que transformó por completo (en realidad, ha comenzado por transformar de manera radical) nuestra comprensión de la realidad, nuestra propia posición con respecto a ella y nuestras acciones y posibilidades adelante en el tiempo. Este, sostenemos, es el gran mérito del estudio de los sistemas complejos no-lineales. La circunstancia puntual que permitió trabajar de manera frontal el conjunto de temas, retos y problemas que se condensan en el título “complejidad” fue la aparición del computador.

Pues bien, quisiéramos dirigir la mirada hacia otra dirección. La tesis que queremos defender aquí es que en la base del estudio de los sistemas de complejidad creciente se encuentra una serie de teorías básicas, sin la cual es imposible comprender la dinámica de los sistemas complejos. Por tanto, a fin de entender esta tesis es imperativo presentar y discutir brevemente cada una de estas teorías.

Teoría de las fluctuaciones

Quizá la primera teoría contemporánea que estudia los temas relativos a cambio y transformación después de las teorías de la mecánica clásica es la teoría de las fluctuaciones. Una fluctuación es un cambio a largo plazo, o que implica una consideración larga o amplia del tiempo.

Mientras que la ciencia normal trabaja con valores promedio de los movimientos –para lo cual recurre a formas como la ley de los grandes números o la campana de Gauss, entre otras–, el trabajo con fluctuaciones se concentra en desviaciones aleatorias de un valor promedio cualquiera. Las fluctuaciones tienen lugar en *todos los sistemas* descritos por las fluctuaciones de la mecánica cuántica, que se denominan fluctuaciones cuánticas. A fin de obtener una teoría cuantitativa de las transiciones de fase en tres dimensiones, es necesario tener en cuenta a las fluctuaciones. La física de partículas elementales, la termodinámica y la cosmología coinciden en pensar que la formación de las primeras estructuras en el universo –al comienzo del Big Bang– habría sido

el resultado de fluctuaciones cuánticas (Barrow *et al.*, 2004), que conduce a la cosmología cuántica.

De acuerdo con esto, es importante observar los valores y comportamientos, las dinámicas y fenómenos que suceden por debajo o por encima de ciertos valores críticos. Es allí en donde suceden las fluctuaciones. Una manera de designar estos espacios –imaginarios, no reales– en donde tienen lugar o pueden tener lugar las fluctuaciones como estados críticos o puntos críticos –dos formas distintas de designar el origen de la complejidad. Dicho de manera negativa, mientras un fenómeno o sistema no se acerque o no se encuentre en espacios críticos o en puntos críticos, no tendrán lugar desviaciones aleatorias y dicho fenómeno se regirá por regularidades, promedios, valores estándar. Las fluctuaciones disparan o generan las inestabilidades de un sistema determinado. Más exactamente, las inestabilidades son el resultado de fluctuaciones. Ulteriormente, podremos hablar de orden a través de fluctuaciones (*order through fluctuations*).²⁶

Las fluctuaciones –que también son resultado de comportamientos macroscópicos– producen bifurcaciones en los fenómenos. “It is interesting that, in a sense, the bifurcation introduces *history* into physics and chemistry, an element that formerly seemed to be reserved for sciences dealing with biological, social, and cultural phenomena” (Prigogine, 1980, p. 106).

En consecuencia, cerca a las bifurcaciones, la ley de los grandes números deja de regir y el sistema se ve obligado a elegir una de las opciones que tiene. Esta elección introduce irreversibilidad, y el sistema podría –eventualmente– volver a un estado o posición anterior a dicha elección al costo de un enorme trabajo (= energía, materia, información, tiempo, interacciones o relaciones).

Como quiera que sea, es necesario observar que las fluctuaciones desempeñan un papel secundario dentro de los sistemas macroscópicos y pueden tener el valor de introducir pequeñas correcciones en el sistema, que pueden ser dejadas de lado si el sistema es lo suficientemente grande. Sin embargo, cuando el sistema se encuentra cerca de bifurcaciones, estas se imponen sobre los promedios. Existen diversas maneras de definir cuándo y cómo un sistema se acerca a estados o a puntos cercanos a bifurcaciones: por ejemplo, por la presencia de un atractor extraño, por las interacciones con determinados

²⁶ Tenemos entonces dos expresiones distintas: orden a partir del caos (*order out of chaos*) y orden a través de fluctuaciones (*order through fluctuations*).

elementos o también como resultado de la evolución misma del sistema. Hablamos entonces de fluctuaciones térmicas, fluctuaciones estacionales, fluctuaciones climáticas, fluctuaciones económicas y muchas más, siempre en función del contexto y del problema o sistema en cuestión.

Como se aprecia sin dificultad, las fluctuaciones y las inestabilidades son entonces generadoras de la magnífica variedad de formas, estructuras, comportamientos y sistemas que observamos en el mundo y en la naturaleza. La idea central es que las fluctuaciones aparecen, *siempre*, en la forma de un suceso local, de pequeñas dimensiones y de proporciones y significado apenas perceptibles en un primer momento (Prigogine y Nicholis, 1994). La inteligencia del complejólogo (o complejóloga) estriba en que pueda captar, estudiar y explicar dichos sucesos locales y pequeñas dimensiones, aunque sólo puede hacerlo en espacios posibles, imaginarios o simulados, puesto que si los estudia en espacios reales, es muy probable que el estudio de las fluctuaciones llegue a ser, al cabo, (muy) tardío –y la investigación o el estudio puede tener significado tan solo *ex post*, lo que es, en verdad, poca cosa, relativamente a la posibilidad de que sea, como debiera ser, *ex ante*.

Por consiguiente, ante la mirada reflexiva salta el trabajo con elementos aleatorios, precisamente aquellos que producen las fluctuaciones. Así, el acceso natural al problema de las fluctuaciones se produce en el marco de la teoría de probabilidades; hablamos de probabilidades multivariantes, en especial de fenómenos estocásticos. No en última instancia, la teoría de fluctuaciones se encuentra en la base de las dinámicas de auto-organización –aunque es igualmente cierto que los fenómenos auto-organizativos no se explican solamente por la presencia de fluctuaciones, pues pueden tener en su base una lógica booleana, como lo enfatiza particularmente S. Kauffman (1995, 1998).

Teoría de las turbulencias

En su sentido primero, una turbulencia es una forma de flujo en la que las partículas de un fluido se mueven de manera desordenada en patrones o formas irregulares y que tienen como resultado, en lenguaje físico, el intercambio de *momentum* de una parte del fluido en otra. La observación de un río, del humo de un cigarrillo o del fuego, incluso del flujo sanguíneo en el sistema venoso, pone de manifiesto, sin dificultad alguna, cómo suceden las turbulencias.

Con seguridad, el hecho sorprendente aquí es el reconocimiento de que fenómenos, comportamientos y sistemas que antes se pensaba que eran

simples, resultan (altamente) complejos, con lo cual se produce una confluencia magnífica entre la mecánica clásica, la teoría de sistemas dinámicos y la termodinámica de los procesos irreversibles. Esta confluencia es justamente la que da lugar a las ciencias de la complejidad o al estudio de los fenómenos de complejidad creciente.

En efecto, las turbulencias ya no se presentan al margen de posiciones de equilibrio, sino en su interior. Originalmente, los fenómenos de turbulencia fueron estudiados entre mediados del siglo XIX y comienzos del siglo XX por parte de la hidrodinámica y de la ingeniería; poseen un número propio conocido como número de Reynolds (Re), un número sin dimensiones que se emplea en la dinámica de fluidos para determinar el flujo de un líquido, por ejemplo, a lo largo de un ducto, y para lo cual se reserva el término de “flujo laminar”. Es posible pensar, como es efectivamente el caso, que en la base de las turbulencias se encuentren atractores extraños.²⁷

Exactamente, la turbulencia es la razón misma por la que suceden –y podemos hablar legítimamente de– comportamientos aperiódicos. La aperiódicidad es, con seguridad, el rasgo más importante de la presencia y la acción de dinámicas de turbulencia. De esta suerte, no obstante los trabajos pioneros de la hidrodinámica, las turbulencias se explican de manera satisfactoria gracias al caos.

Por otra parte, el trabajo con turbulencias constituye el núcleo de la teoría de la criticalidad auto-organizada (Bak, 1996).²⁸ La idea central es que, en contraste con la historia anterior, los fenómenos de turbulencia no pueden ni deben asociarse a desorden o ruido; por el contrario, aquello que en la escala macroscópica se observa como turbulento, en la escala microscópica

²⁷ Al respecto, se hace necesario observar que prácticamente todo el trabajo de los caotólogos consiste en la identificación de atractores extraños, para lo cual, una vía de acceso es el reconocimiento de que en la base de todo atractor extraño hay una dimensión fractal.

²⁸ La teoría de la criticalidad autoorganizada (SOC, por sus siglas en inglés) no alcanzó el estatus que su fundador, P. Bak, quiso otorgarle, a saber: ser ciencia. Pero sí constituye un modelo ampliamente estudiado en la dinámica de los sistemas autoorganizativos. Ulteriormente, como observa S. Strogatz, la SOC quedará integrada, como un momento particular, al interior de una ciencia más amplia que la comprende y la hace posible: la ciencia de conexiones, o el estudio de las redes complejas. Al respecto, P. Anderson sostiene: “*The canonical case of SOC is turbulence* [cursivas nuestras]; in this case SOC suffers from the Molière syndrome that it merely broadens the perspective on the phenomenon without adding any new methodology. SOC has an intriguing feature: it seems to generate true randomness from regular initial conditions” (1999, p. 13).

aparece como un sistema de comportamientos coherentes –entre millones de moléculas.²⁹

Teoría de las inestabilidades

No existe algo como una “teoría de las inestabilidades”, pero sí el estudio, sistemático, de fenómenos inestables: partículas inestables, equilibrios inestables, simetrías inestables. Solo puede hablarse en un sentido genérico de algo así como una teoría de la inestabilidad.

Cuando se habla de inestabilidad, por lo general se hace referencia a la constante o al teorema de Lyapunov, que suministra requisitos suficientes para establecer las condiciones de estabilidad de un punto de equilibrio. Una vez logrado esto, el trabajo en complejidad con respecto a Lyapunov es esencialmente de contraste o, si se prefiere, de falseación. Se trata de métodos (teorema, constante, función) que permiten determinar la estabilidad de un sistema sin necesidad de integrar explícitamente ecuaciones diferenciales, y es una generalización de la idea básica según la cual alguna medida de disipación de energía de un sistema permite concluir que existe estabilidad.

El aspecto metodológico, lógico y epistémico más importante es el de que la inestabilidad es *necesariamente* un concepto o un acontecimiento *local*. Un sistema cualquiera está globalmente en equilibrio, pero siempre se desestabiliza en un punto preciso, determinado. En consecuencia, por lo general no existe una comprensión o definición general o uniforme de inestabilidad (Sastry, 1999).

Comprender o explicar la inestabilidad no significa que haya que excluir cada una de las condiciones iniciales en el punto o estado de origen de un sistema cualquiera que se está considerando, sino que tan solo se requiere que una de dichas condiciones iniciales en el vecindario de un origen sea observada con cuidado, pues allí es donde se origina la inestabilidad.

De esta suerte, las inestabilidades resultan de los intercambios entre flujos netos –información, materia, energía, etc.–, entre un sistema cualquiera

²⁹ Este “movimiento”, por denominarlo así, entre las escalas microscópicas y macroscópicas del universo o de la realidad constituye un rasgo altamente significativo del trabajo en complejidad –y, en un contexto más amplio, de la ciencia contemporánea de punta en general. Una forma, afortunada, de entender y de trabajar en este movimiento entre lo micro y lo macro –y viceversa– es lo que se conoce como visión multiescalar. En la última sección de este capítulo tendremos la ocasión de verlo con más detalle.

y su entorno. Justamente en este sentido aprendemos la idea de equilibrios dinámicos. A partir de esto, el concepto que se introduce es el de estados no-lineales, que sirve para designar flujos que no desaparecen entre el entorno y el sistema. Estos flujos pueden sufrir bucles de retroalimentación negativa o positiva, según el caso, dando así lugar a estados de transición que, por definición, son inestables. El grado y el modo de la inestabilidad dependerán exactamente del modo y del grado de los flujos.

Esta idea adquiere un valor singular en el caso de la biología. Se trata de la idea según la cual un sistema determinado se integra a un entorno determinado pero no se asimila a él, sino que se diferencia constantemente de él. Este proceso de integración-diferenciación constituye el origen mismo de la inestabilidad del sistema considerado. Un sistema vivo es un sistema que no se encuentra en equilibrio, en un doble sentido: ni en equilibrio con el entorno ni consigo mismo, por ejemplo, homeostáticamente. Encontramos aquí la tensión esencial entre homeostasis y homeorhesis.

Así, los sistemas inestables son esencialmente abiertos. En cualquier caso, la complejidad de la naturaleza, como lo señalan Nicholis y Prigogine, no se puede referir a ningún principio de optimización universal. Más bien, la naturaleza busca estabilidad a través de criterios pragmáticos, en su dinámica de complejización creciente. Esta estabilidad de largo alcance, si cabe decirlo, descansa en la simetría (Ash y Gross, 2008).

Teoría de la evolución

Con seguridad, esta es la teoría más importante en el estudio de los sistemas complejos. Podemos decir que los sistemas complejos *son*, efectivamente, evolutivos, y que la evolución es el modo mismo de la complejidad.

Contra la idea común y corriente acerca de la evolución, esta no debe ser entendida en el sentido de progreso, paso de lo inferior a lo mejor, o de lo anterior a lo posterior, como erróneamente se usa cuando se habla de “la evolución del paciente”, la “evolución de la economía” y otras semejantes.

De acuerdo con S. J. Gould (1994), la prueba de la evolución radica en imperfecciones reveladoras de una historia. Así, la evolución no pone de manifiesto una historia lineal, sino una marcada por disposiciones extrañas y soluciones singulares. El estudio de las dinámicas evolutivas concentra la mirada en estas soluciones y disposiciones. El resultado es, a todas luces, sorprendente, si se mira desde la tradición: los fenómenos y las estructuras

evolutivas destacan la importancia del catastrofismo sobre el gradualismo; es decir, de cambios súbitos y a gran escala, sobre transformaciones pequeñas, acumulativas y controladas de alguna manera.

En efecto, en la historia de Occidente han predominado cambios lentos, controlados; se trata de la clase de cambios que han sido considerados, destacados, conservados y transmitidos a través de la educación, de la cultura. Sin embargo, la complejidad habla de todo lo contrario. Literalmente, es la otra cara de la luna: nos habla de cambios imprevistos, súbitos irreversibles, y de cómo pequeños cambios imperceptibles tienden (= pueden tener) a consecuencias imprevisibles. Este es justamente el tema central de los caotólogos.

Gould y Eldridge postularon una teoría para destacar –contra toda una filosofía y tradición habituales– esa clase de inflexiones magníficas que constituyen o que son la evolución: se trata de la teoría de los equilibrios puntuados o intermitentes. En lenguaje de la complejidad, dicha teoría pone de manifiesto que la evolución sucede precisamente en los sistemas alejados del equilibrio. Para Eldridge y Gould la tarea consiste en pensar más allá del gradualismo pero en términos darwinianos, pues lo que se impone como “políticamente correcto” es pensar la teoría de la evolución en perspectiva gradualista, algo que desafortunadamente se presta a partir de algunos pasajes de la obra de Darwin.

En consecuencia, los sistemas complejos introducen una visión que exige tener en cuenta las rarezas y las imperfecciones en la dinámica de las especies –o de los fenómenos– que permiten entender mucho mejor por qué y cómo acontece la historia.

El problema es el siguiente: ¿cómo se forman los científicos y –con ellos– los demás seres humanos, en una filosofía del cambio? El tema mismo equivale a cuestionarnos cómo es posible comprender de manera adecuada la evolución, teniendo en cuenta que la principal dificultad para ello –y por tanto para el estudio de la complejidad– proviene del hecho de que, atávicamente, los seres humanos han sido conducidos a pensar (= creer) en la necesidad de causas finales; esto es, de sentido y finalidad. Pues bien, la teoría de la evolución pone de manifiesto que la evolución misma es ciega, los organismos y las especies no van a ninguna parte o no saben a dónde van; lo único que interesa es la supervivencia y transmitir las mejores características de supervivencia, de tantas maneras como se pueda imaginar, a sus descendientes.

El reto es asumir y entender la dinámica compleja –esto es, evolutiva– en contraste con la teleología, como si la evolución tuviera un sentido o una finalidad, o como si la complejidad (= complejización) tuviera alguna finalidad (pre)determinada.

Ahora bien, lo relevante de las teorías mencionadas es que todas ellas implican transiciones de fase, esto es, transformaciones cualitativas o de estado en los fenómenos, y en muchas ocasiones, dependiendo de cada sistema y del entorno, transformaciones que son irreversibles. Solo que la irreversibilidad aparece entonces como fuente de asimetría y de información.

La flecha del tiempo de la evolución permite hablar de varias transiciones en la escala del universo, de la naturaleza o de la sociedad; todas ellas implican temas de interés filosófico. Estas transiciones han sido presentadas por diversos autores en los siguientes términos:

- i) Transiciones de evolución de partículas, galaxias, estelares, planetarias, químicas, biológicas y culturales (E. Chaisson, 2001).
- ii) En dos aproximaciones distintas, pero complementarias, J. M. Smith y E. Szathmáry plantean ocho hitos de la evolución o transiciones mayores en la evolución. En el primer caso, estos hitos son: de moléculas replicantes a poblaciones de moléculas en compartimientos; de replicadores independientes a cromosomas; del ARN como gen y enzima al DNA y la proteína; de los organismos procariotas a los eucariotas; de clones asexuales a las poblaciones sexuales; de los protistas a los animales, plantas y hongos; de los individuos solitarios a las colonias; en fin, de las sociedades de primates a las sociedades humanas y el origen del lenguaje (Smith y Szathmáry, 2001). En una segunda aproximación, estas transiciones mayores son: el origen de los cromosomas, el origen de las eucariotas, el origen del sexo, el origen de los organismos multicelulares y el origen de los grupos sociales (Smith y Szathmáry, 2003).
- iii) En un tercer sentido, E. Jablonka y M. Lamb (2004) sostienen que existen cuatro sistemas de herencia que conducen a la visión de una complejidad creciente pero integrada o unificada: la dimensión genética, epigenética, comportamental y simbólica de la variación en la historia de la vida.

El factor mínimo común a estas tres aproximaciones es que permiten una comprensión no dividida, no binaria, ni siquiera sistémica de la evolución y de la complejidad, sino una comprensión unificante en la que, por decir lo menos, nos permiten reconocer que no hay dos cosas: naturaleza y sociedad; tres cosas: naturaleza sociedad y cultura; ni cuatro cosas: naturaleza, sociedad, cultura y símbolos. Por el contrario, se trata de cuatro *escalas* de un mismo fenómeno: la complejidad creciente de los fenómenos y sistemas en el mundo. No sin razón se ha hablado de alguna de estas aproximaciones –lo cual puede aplicarse sin problema a las tres– como el estudio de la evolución. Es decir, se trata de reconocer que tanto la evolución como la complejidad no son basamentos inamovibles sobre los cuales o a partir de los cuales sucede la dinámica en el mundo y en la naturaleza. Por el contrario, antes que estructuras fijas o supuestos metafísicos, la evolución y la complejidad son teorías y dinámicas que sufren sus propias dinámicas –es decir, fluctuaciones, inestabilidades, turbulencias y catástrofes. Este es, con toda seguridad, el rasgo más destacado de contraste entre todas las teorías de cualquier orden –científico o filosófico– en la historia de la humanidad (occidental) y el estudio de los sistemas complejos no-lineales.

La tesis que queremos sostener en esta sección es que las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida, aunque no pueda decirse lo mismo en sentido contrario, cuando se parte de las ciencias de la vida hacia la complejidad, y ciertamente no si las ciencias de la vida se entienden en el sentido habitual de las ciencias de la salud y la medicina. Sin embargo, esta idea no debe hacernos pensar en el sentido de algún vitalismo –que fue definitivamente superado en la historia gracias a los trabajos de G. Canguilhem–, sino como el hecho de que el fenómeno de mayor complejidad conocida –en cualquier acepción de la palabra– son los sistemas vivos. Ellos son los que introducen en el universo lo que este por sí mismo no tenía: *historia*.³⁰

Es cierto que los fenómenos de auto-organización, emergencia y no-linealidad no son exclusivos de los fenómenos que exhiben vida, sino también de los sistemas físicos y químicos o de los sistemas computacionales. Una buena comprensión de la complejidad pone de manifiesto que, aunque los

³⁰ La idea de los cognitivistas y filósofos de la mente en general, según la cual la mente constituye el problema de máxima complejidad conocida, es en realidad un caso particular, altamente significativo, en verdad, del estudio de los sistemas vivos.

sistemas vivos son sistemas físicos, no se reducen a la física, puesto que implican otros elementos, organizaciones y dinámicas que le confieren sentido, retroactivamente, a lo que sucede en la escala física y química. La vida es la respuesta que el universo inventa para resolver el problema de la entropía.

Esta es, sostenemos, la principal dificultad de pensar y aceptar la complejidad. Esto quiere decir una cosa: las ciencias de la complejidad se encuentran lejos –bastante lejos aún– de ser ciencia normal, de ser educación normal, en fin, cultura normal. La ciencia predominante, la cultura predominante sigue siendo de corte reduccionista, causal, centralizado, jerárquico, controlador, disciplinar y disciplinante. En las mejores facultades de filosofía aún se habla de metafísica. En las mejores facultades de ciencias aún se sospecha que las ciencias sociales y las humanidades son secundarias o meramente instrumentales. En las mejores escuelas de humanidades existe un fuerte analfabetismo matemático, lógico y científico. Seamos honestos: el llamado a la tercera cultura (Brockman) aún dista mucho de ser voz dominante, o de tener por lo menos un aria propia. Si cabe la expresión, es, a lo sumo, bajo continuo (para emplear una expresión cara a Schopenhauer y a Nietzsche).

Hemos presentado los ejes o las poleas, si se nos permite, de la complejidad. Estos son, sostenemos, los verdaderos ductos subterráneos de la ciudad –a través de los cuales, acaso, se mueve y donde vive el Jorobado de París. Ellos sostienen las facetas más comunes, auto-organización, emergencia, sinergia, redes, caos y termodinámica del no-equilibrio. En suma, son estas las bases de las ciencias de la complejidad.

Podemos concluir esta sección complementando la complejidad y la evolución con la tercera gran teoría que permite una descripción y explicación de la realidad en general: la teoría cuántica.

A diferencia de la teoría de la evolución y –si cabe– de la teoría de la complejidad, las teorías físicas se aplican a un tipo particular de situaciones. Se trata de aquellas situaciones en las que un sistema físico se encuentra en un estado inicial cualquiera y está sujeto a distintas transformaciones. Sobre este sistema los físicos establecen diversos tipos de mediciones. Las dos formas más importantes de mediciones son aquellas que aportan la teoría de probabilidades y la teoría cuántica. El problema más importante de todos cuantos puede hallarse es indudablemente el de las relaciones entre lo continuo y lo discreto. Tal es, exactamente, el marco en el que existe y se trabaja en física cuántica.

Existen varios vasos comunicantes entre la complejidad, la evolución y la teoría cuántica. De acuerdo con un libro singular sobre el tema, con marcado acento filosófico, se trata de desentrañar la realidad última, tal cual las cosas son o aparecen (Barrow *et al.*, 2004).

Con toda seguridad, el trabajo tripartita pero mancomunado entre estas tres teorías –complejidad, evolución y cuántica– habrá de producir la revolución teórica, cultural y social más grande que jamás haya conocido la historia de la humanidad. Los primeros cimientos ya están establecidos y son promisorios: pero la construcción apenas se ha iniciado y la mayor parte permanece, por así decirlo, aún en planos. Planos que, sin duda, pueden cambiar en correspondencia con los avances teóricos y prácticos de la investigación en estos tres campos.

¿Puede haber ciencia sin teoría? El problema de la inexistencia (hasta la fecha) de una teoría general o unificada de la complejidad

En general, el campo de trabajo en complejidad se articula en tres grandes dominios: simulación, medición de la complejidad y el trabajo en torno al desarrollo de una teoría (general o unificada) de la complejidad.

La teoría de la complejidad designa tres cosas distintas: en sentido matemático y lógico, hace referencia a la relación entre los problemas P y NP, y a la posibilidad de su resolución. Hasta la fecha, este es el sentido estricto del concepto de teoría de la complejidad. En un sentido más amplio y genérico, “teoría de la complejidad” hace referencia a una visión general de sistemas dinámicos, uno de cuyos elementos más destacados y reconocidos es el estudio del caos. En este sentido, la expresión “teoría de la complejidad” –como por lo demás se usa particularmente en la bibliografía en inglés– no tiene ningún sentido técnico y sí tan solo indicativo. De esta suerte, se trata de una teoría más al lado de otras.

Sin embargo, un tercer sentido de la expresión contiene y apunta hacia un problema altamente difícil. La mejor manera de señalar en qué consiste es trazar brevemente su historia.

Inmediatamente después de la creación del Instituto Santa Fe, los investigadores y académicos formularon una tarea clara: una de las finalidades –quizá la más importante de todas, aunque nunca se enunció exactamente en este sentido– era alcanzar una teoría general de los sistemas complejos. Incluso se afirmó (Gell-Mann, Kauffman, Holland, Pines, Cowan y otros) que

el carácter de esta teoría sería su simplicidad, en el sentido preciso de que en la base de la enorme y diversa complejidad del mundo se encuentra –debería encontrarse– una teoría elemental de dichos sistemas. En ese momento se emprendieron diversos ensayos y trabajos sin que ninguno diera resultados satisfactorios. Al cabo de algún tiempo, esta tarea fue dejada de lado, gradualmente silenciada, y finalmente nunca volvió a ser formulada. Esto se puede ver en cualquiera de los libros publicados por la editorial de la Universidad de Oxford con el título *Santa Fe Series for the Sciences of Complexity*.³¹

El fenómeno más sorprendente de las nuevas ciencias en emergencia es que algunas de ellas son jalonadas más por un espíritu heurístico que por la posesión de una teoría clara y distinta. Con seguridad, los dos ejemplos más conspicuos son los de la biología y, con ella y más allá de ella, lo que podemos denominar una teoría general de las organizaciones. En efecto, no existe (hasta hoy) una teoría general –o *algo semejante*– acerca de los sistemas vivos. Una teoría parecida debería poder contener o articularse con las dos escalas fundamentales del problema de los sistemas vivos (o sistemas que exhiben vida), a saber: un componente –o teoría– que dé cuenta del origen de la vida, y uno que dé cuenta de la lógica de los sistemas vivos. El segundo aspecto sí existe: es la teoría de la evolución. Acerca del primero hay algunas propuestas, pero ninguna suficientemente consolidada y aceptada. El verdadero reto estriba en el hecho de que debe ser posible explicar al unísono la lógica de la vida (evolución) y el origen de la vida. Quizá las dos propuestas más fuertes hasta el momento sean la teoría de la auto-organización y la explicación epigenética de la vida.

Por otra parte, debe quedar claro que una teoría de las organizaciones debe, necesariamente, anclarse en la biología y en la ecología, aunque sus espectros y alcances desbordan con mucho a estas dos ciencias. Como lo expresa S. Kauffman (1994), no existe una teoría semejante.

Pues bien, desde un punto de vista “pragmático” –si cabe la expresión– el aspecto verdaderamente significativo estriba en el reconocimiento de que al

³¹ Esta historia, características, dificultades y aristas se encuentran reseñadas y estudiadas en Maldonado, C. E. (2007). “El problema de una teoría general de la complejidad de fractales”, en: F. López Aguilar y F. Branbila Paz (compiladores). *Antropología fractal*, México, D.F.: Centro de Investigación en Matemáticas, pp. 9-24; Maldonado, C. E. (2007). “El problema de una teoría general de la complejidad”, en: Maldonado, C. E., (Ed.). *Complejidad: Ciencia, pensamiento y aplicaciones*, Bogotá: Universidad Externado de Colombia, pp. 101-132; Maldonado, C. E., xyz (Libro II Encuentro).

tiempo que se trata de falencias, ciertamente la carencia de una teoría básica, general, fundamental o unificada (distintas maneras de apuntar a un mismo conjunto y horizonte) no impide –y quizá, paradójicamente impulsa– la investigación ni el trabajo teórico y práctico en torno a la comprensión de los sistemas vivos en el doble sentido mencionado, además no agota el panorama de los temas y problemas que subyacen a él.

En pocas palabras, algo que resulta escandaloso a la luz de la (historia y filosofía de la) ciencia clásica es que existe –y es posible– ciencia sin teoría. Desde luego, esto no debe ser tomado a la ligera como si la idea de una teoría (general o unificada) inexistente no fuera importante, pudiendo así deslizarse hacia pendientes relativistas, eclécticas o pseudo-científicas. Antes que una cláusula de rendimiento y limitación, encontramos aquí serios motivos para trabajar en la dirección del desarrollo de una teoría de nuevo tipo diferente a la que habíamos desarrollado o entrevisto en la historia de la humanidad. En este punto se entronca el estudio de los sistemas de complejidad creciente.

Vemos el mundo a través de los modelos teóricos y de los lenguajes que los soportan. Los conceptos iluminan el mundo y lo constituyen a la vez. Por su parte, las ideas inauguran territorios, vislumbran horizontes, diseñan planes y programas de investigación y acción. Ciertamente, toda discusión acerca de conceptos es una discusión filosófica. Y a fortiori lo es toda discusión acerca de modos, estructuras, dinámicas, existencia, validez o crítica de las teorías con las que comprendemos el mundo y que explican la naturaleza y el universo en general.

La diferencia con la historia tradicional es que estas discusiones ya no competen única y exclusivamente a los filósofos –ni siquiera a ese campo particular que es la filosofía de la ciencia– como tampoco son patrimonio exclusivo de los científicos –teóricos y experimentadores. En verdad, cuando tratamos con contextos, temas y problemas propios de ciencias de frontera, lo mínimo que podemos decir es que se trata de un encuentro polifónico en el que diversas tradiciones, fortalezas y necesidades confluyen y se retroalimentan (creemos) positivamente.

Por tanto, queremos plantear que la posibilidad de una teoría no reduccionista, no disciplinar y no excluyente –en el sentido preciso de la filosofía medieval, es decir, que se define por género próximo y diferencia específica– corresponde al mejor espíritu de trabajo de ciencias como las de la complejidad. Desde hace algún tiempo –muy corto, si se mira en perspectiva histórica–,

existen varias voces –provenientes indistintamente de campos tan diversos como la ciencia y la filosofía, la literatura y el arte– que sugieren una inflexión en el sentido aquí mencionado. Sin embargo, lo cierto es que esta inflexión no se ha producido efectiva o positivamente hasta la fecha.

Complejidad, sociedad del conocimiento y cultura

La tesis que queremos defender afirma que las ciencias de la complejidad son las ciencias –o la clase de ciencias– propias de la sociedad del conocimiento. Por tanto, quisiéramos hacer una presentación breve de la sociedad del conocimiento, de sus características y de sus bases.

Todas las sociedades clásicas, desde cuando los primeros homínidos descendieron de los árboles en las estepas africanas hasta mediados del siglo xx, coinciden en un mismo aspecto, a pesar de su diferencia en el tiempo: se fundan en un mismo *tipo* de economía (por consiguiente, les corresponde un mismo tipo de mentalidad), que se articula en sus tres sectores tradicionales: el sector primario –agricultura y ganadería–, el sector secundario –manufactura e industria– y el sector terciario –servicios.

Lo común a estos tres niveles de la economía tradicional es que tanto implican como afirman finitud, agotamiento. Nunca es seguro que de una fanegada de tierra se obtenga el equivalente a una fanegada de cultivos, o que de un número x de cabezas de ganado se obtenga necesariamente el mismo número x de productos o beneficios, así como tampoco lo es que de una empresa con un número y de empleados y un capital z se obtenga una ganancia que se siga, de manera lineal, del input de fuerza de trabajo y de capital invertido. Lo que caracteriza a los sectores tradicionales de la economía, y por consiguiente a las sociedades tradicionales –la de cazadores-recolectores, la del paleolítico, la del neolítico, las antiguas, medievales y modernas– es la presencia de bucles de retroalimentación negativa o elementos, factores y tendencias a rendimientos decrecientes (B. Arthur).

En contraste con las sociedades tradicionales y el tipo de economía que las caracterizaba y fundaba, a mediados de los años noventa comienza a emerger primero la sociedad de la información –cuya base material es la economía de la información o economía basada en la información– y después, con fundamentos sólidos, la sociedad del conocimiento –cuya base material es la economía del conocimiento o economía basada en el conocimiento.

Desde una perspectiva sociológica, el mejor estudio acerca de la sociedad de la información hasta el momento es el trabajo de M. Castells (1998). De acuerdo con Castells, la sociedad de la información corresponde a la fase posterior al capitalismo posindustrial, que crea una nueva clase social en la historia, según la cual el principal factor generador de riqueza en una sociedad ya no depende de cualquiera de los sectores tradicionales de la economía, sino de la producción –y consumos, distribución, acumulación de un bien perfectamente intangible: información.

Es más, las sociedades más violentas y atrasadas del mundo son aquellas que dependen de los sectores más atrasados de la economía, de tal suerte que cuanto menor es el grado de dependencia de los sectores primario, secundario y terciario, respectivamente, menor es el atraso y la violencia de una sociedad o de un país. Con seguridad, los países de la OCDE han incorporado una parte importante –superior al 8% o al 10% del PIB– de su desarrollo económico y social a la economía de la información; con mayor razón puede decirse lo mismo de los países más desarrollados –como el G-20, el G-8.³²

La sociedad del conocimiento surge entre finales del siglo xx y comienzos del siglo xxi. Se caracteriza por agrupar a aquellas sociedades, países y economías que ya no solo se fundan en la economía de la información, sino en la economía del conocimiento.³³ Entre sus principales sectores están la industria del entretenimiento, la industria de la cultura, la industria de la educación, la industria del conocimiento y la I+D. En concordancia con la economía de la información y con la sociedad de la información, tanto la economía como la sociedad del conocimiento se caracterizan porque fundamentan la riqueza de una nación en un bien intangible: el conocimiento. Sin embargo, el rasgo de mayor contraste consiste en que la economía del conocimiento se constituye en el cuarto sector de la economía, aunque, en contraste con los tres que le preceden, se funda en rendimientos crecientes o en bucles de retroalimentación positiva.

³² La lista de los países del G-20, creado entre 1997 y 1999, incluye a los países del G-8, la Unión Europea, y un grupo de países de las economías llamadas emergentes: Argentina, Australia, Brasil, China, India, Indonesia, México, Arabia Saudita, Suráfrica, Corea del Sur y Turquía.

³³ Esta idea implica una distinción importante –que por lo pronto debe quedar aquí de lado– entre “información” y “conocimiento”. Dado el contexto aquí, la mejor manera de distinguirlos es de cara al conocimiento: que es lo que sigue precisamente en el texto.

Ahora bien, existe un componente determinante en la economía del conocimiento, esto es, en sus dinámicas como en sus articulaciones y desarrollos. Se trata del papel destacado que la ciencia y la tecnología ocupan en la economía en general, en la esfera pública y privada, pero también en la sociedad civil. Nunca antes en la historia de la humanidad la ciencia y la tecnología habían desempeñado un papel protagónico en la generación de riqueza, bienestar y desarrollo de la vida social. Con total seguridad, las sociedades más prósperas serán aquellas que incorporen, promuevan y desarrollen mejores políticas de conocimiento, en el sentido más amplio y profundo de la palabra, y las que logren organizarse de tal suerte que el conocimiento –ciencia y tecnología, principalmente– ilumine, funde o catalice los demás sectores de la economía. Si esto es así, entonces uno de los elementos principales en las políticas de conocimiento –en el sentido más amplio– serán las ciencias de la complejidad. En 1989, el físico H. Pagels afirmaba con razón:

Estoy convencido de que las sociedades que dominen las nuevas ciencias de la complejidad y puedan convertir ese conocimiento en productos nuevos y formas de organización social, se convertirán en las superpotencias culturales, económicas y militares del próximo siglo. Aunque hay grandes esperanzas de que así se desarrollen las cosas, existe también el terrible peligro de que esta nueva proyección del conocimiento agrave las diferencias entre quienes los poseen y quienes no. (Pagels, 1989, p. 54)

La manera más rápida de seguir la mirada de Pagels consiste en observar la clase de artículos que se publican en una de las revistas más importantes en complejidad: *Complexity*.³⁴

Como quiera que sea, uno de los problemas fundamentales en la historia de la humanidad occidental tiene que ver con la relación entre las partes (de un todo) y el todo. Este debate se expresa como la discusión acerca de la prevalencia del análisis sobre la síntesis, o el reconocimiento de que para que haya síntesis debe haber (también) análisis, incluso la idea de que la síntesis es un modo de pensamiento y ciencia mejor y preferible al análisis. El problema de las relaciones entre un todo (cualquiera) y las partes tiene serias

³⁴ “Complexity”, Wiley Periodicals; cfr. <http://www3.interscience.wiley.com/journal/38804/home?CRETRY=1&SRETRY=0>

consecuencias e implicaciones prácticas en el mundo. Por ello, el tema no es simplemente cuestión de métodos, de lenguajes o de tipos de ciencia.

En la historia occidental de la humanidad, el problema de las relaciones entre el todo y las partes se sintetiza en tres posturas fundamentales, así:

- En primer lugar, Euclides establece como uno de los postulados centrales de su geometría la idea de que el todo es mayor que las partes. Esta idea permanece intacta durante cerca de veintitrés siglos, y se asume como una verdad de suyo; justamente, un postulado de la razón.
- G. Cantor introduce una revolución con respecto a las ideas de Euclides y en general de todas las de la cultura occidental anteriores gracias al reconocimiento de que las partes de un todo pueden ser mayores que el todo. Esta idea no es otra que el descubrimiento, escandaloso en su época y durante mucho tiempo, según el cual no solamente existe el infinito, sino varios (múltiples) tipos de infinito. Esta idea de Cantor se condensa, en el cuerpo de los estudios sobre complejidad, a partir de la idea de los conjuntos de Cantor.
- Es un hecho suficientemente reconocido en el cuerpo teórico de las ciencias de la complejidad la idea de acuerdo con la cual el todo es mayor que la sumatoria de las partes.

El anclaje de la complejidad en el marco social y cultural en general referencia otras ciencias de frontera: ciencias de la vida, ciencias de la tierra, ciencias del espacio, ciencias de la salud, ciencias de materiales.

La ciencia contemporánea presenta dos dimensiones centrales, así: la gran ciencia (*big science*) y la ciencia propiamente dicha, en su sentido habitual y tradicional, que es designada como pequeña ciencia (*little science*) (Price, 1962, Galison, 1992, Echeverría).

La gran ciencia es aquella que se articula como el tipo de ciencia que interesa, que convoca y en el que confluyen formaciones e intereses diversos: científicos, tecnólogos, políticos, militares, financistas, administradores, economistas. Esta clase de ciencia gira alrededor de auténticos programas de investigación y también da lugar a ellos. El ejemplo más conspicuo de la gran ciencia es el trabajo en torno al súper colisionador de hadrones con sede en el CERN, en el que trabajan científicos de más de sesenta países. Pero una manera más amplia de comprender la gran ciencia es como aquella que trabaja

en torno a temas como la búsqueda de energías alternativas, la exploración del fondo submarino, la exploración y conquista del espacio extraterrestre, el proyecto genoma humano y la etapa subsiguiente, la genómica, la búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI).

La pequeña ciencia es aquella que interesa a los científicos o tecnólogos, aun cuando tenga una cierta (pequeña) envergadura de vinculación con el sector público y/o con la sociedad.

Las ciencias de la complejidad constituyen un nuevo tipo de ciencia que existe a partir de la formulación de problemas de frontera y el trabajo con ellos. Se dice que un problema es de frontera cuando convoca a diversas formaciones científicas y académicas, o en el que confluyen tradiciones, lenguajes, metodologías y modelos diversos de ciencias y disciplinas anteriormente separadas o aisladas. Quizás el rasgo más determinante de este nuevo grupo de ciencias es que configuran *síntesis* magníficas que se definen a partir de determinados problemas de frontera.

Desde una perspectiva cronológica, este nuevo grupo de ciencias son:

- Las ciencias cognitivas.
- Las ciencias de la salud.
- Las ciencias de la vida.
- Las ciencias del espacio.
- Las ciencias de la tierra.
- Las ciencias de materiales.
- Las ciencias de la complejidad.

Las primeras en constituirse fueron las ciencias cognitivas, hacia los años sesenta, en el Media Lab del MIT. En ellas confluyen la psicología, la filosofía, las ciencias de la computación, la biología, la neurología, entre otras, y de ellas se derivan el estudio de sistemas expertos, la robótica, la inteligencia artificial, la vida artificial.

Incluso en inglés, ciencias *cognitivas* es un neologismo (*cognitive sciences*). No son ciencias del conocimiento (*sciences of knowledge*), en el sentido de que no tienen por *objeto* al *conocimiento*. Por el contrario, existe un problema: justamente el de determinar qué es conocimiento. Ya no es evidente, en absoluto, que el conocimiento sea un rasgo distintivo de la especie humana, tampoco lo es que el conocimiento sea un fenómeno exclusivo de los sistemas

vivos, ni siquiera de los mamíferos superiores. Así mismo, algunos sistemas artificiales conocen, análogamente a los sistemas vivos, al ser humano o a numerosos sistemas naturales y artificiales, se comportan como si se conocieran. Si ello es así, entonces resulta claro que no sabemos qué es el conocimiento, y ciertamente no cuando lo que hemos heredado de la antigüedad se confronta con los nuevos desarrollos en diversos campos de la investigación. Entre los padres de las ciencias cognitivas se encuentran H. Simon, M. Minsky, los esposos P. and P. Churchland (1999).

Pues bien, puede decirse lo mismo respecto a los otros grupos de ciencias. Las ciencias de la salud no tienen por objeto la salud, de la misma manera que las ciencias de la vida no tienen por objeto la vida, y así sucesivamente. Por el contrario, existe un problema que no puede abordarse ni resolverse exclusivamente por una ciencia o disciplina determinada (cualquiera) o por una sola tradición histórica y de investigación. Precisamente por ello se constituyen nuevas ciencias de frontera fundadas en problemas de frontera.

Se trata de nuevas formas de ciencia que carecen de *objeto*, en el sentido tradicional, positivista o realista de la palabra, y que se fundan en *problemas* –de frontera, justamente. Así, las ciencias de la salud no tienen por objeto la salud, sino el problema mismo de la salud. Por ejemplo, es el reconocimiento explícito de que la salud humana comienza en algún punto antes del ser humano, atraviesa por los seres humanos, pero termina más allá de la especie humana, por ejemplo en la salud del planeta, que entonces se denomina mejor como *Gaia*, para designar no un objeto físico (= planeta, o Tierra), sino un organismo viviente (Lovelock, Margulis). Las ciencias de la vida no tienen por objeto la vida, sino que se enfrentan con el problema de establecer qué es vida: si la vida natural, fundada en el carbono 14, o acaso la vida artificial, cuya física es el silicio y cuya química son los algoritmos genéticos. Si es la vida como un fenómeno local –en el planeta llamado Tierra– o vida-tal-y-como-podría ser, que incluye programas de investigación como la exobiología. Las ciencias del espacio incluyen investigaciones acerca de si vivimos en el único universo posible o en uno de tantos (Bruce, 2004; O’Shea, 2008), y cómo el espacio extraterrestre permite la existencia de otros planetas semejantes al nuestro, o incluso los temas relativos al origen del universo o al choque de eventuales meteoritos sobre Gaia. Las ciencias de la tierra estudian la tectónica de placas, las profundidades del mar, la búsqueda de energías alternativas, la sostenibilidad misma de la vida sobre el planeta, o los temas relativos al

calentamiento global y su relación con las extinciones en la historia del planeta. Por su parte, las ciencias de materiales incluyen investigaciones sobre nanotecnología y nanociencia, biología y química en la escala femtométrica, tejidos y texturas inteligentes, y otros semejantes.

Esta breve descripción pone al descubierto que la antigua clasificación de las ciencias en ciencias naturales y sociales, ciencias físicas y humanidades, ciencias exactas y ciencias positivas, así como en otras semejantes, se revela arcaica. Las “antiguas” ciencias y disciplinas quedan integradas dentro de esta nueva estructuración, algunas intactas, otras divididas en varias de las ciencias mencionadas, mientras otras incluso desaparecen (o al parecer tienden a desaparecer).

Pues bien, las ciencias de la complejidad son *ciencia de frontera* fundadas a partir de un problema, a saber: no simple y llanamente conocer y explicar la complejidad, sino explicar cómo y por qué sucede complejidad. Mejor aún, hay un problema que no logramos determinar exactamente, que se caracteriza por sorpresas, imprevisibilidad, emergencias, contingencias, aleatoriedad.

Vivimos un mundo diferente de suma cero; esto es, en aumento interdependiente, con múltiples entrelazamientos de diverso grado y orden. Este mundo se dice de la globalización, la internacionalización o la mundialización. Pues bien, las ciencias de la complejidad son el tipo de ciencias de este mundo diferente de suma cero, en el que, literal, pero también metafóricamente, el aletear de una mariposa en un lugar hace llover en otra región y momento.

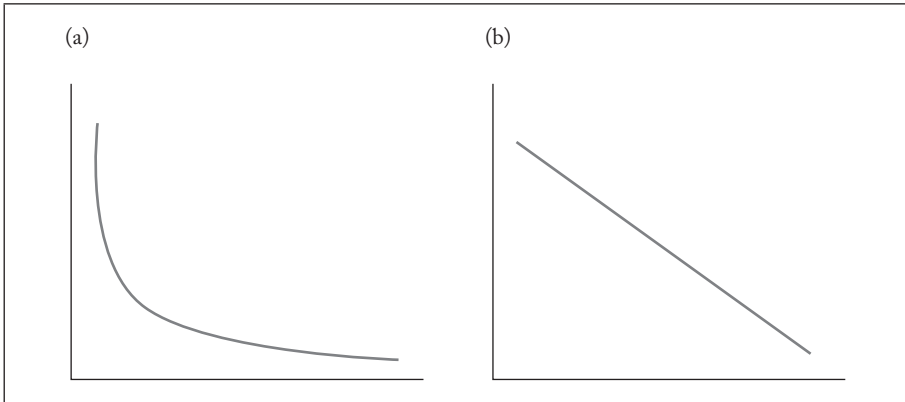
Como es sabido, un mundo diferente de suma cero (una expresión que encuentra sus raíces en la teoría matemática de juegos) es aquel en el que si un jugador gana, otro(s) también gana(n), así sea con diferencias; y si un jugador pierde, otro(s) también pierde(n), así sea con diferencias. Se trata de un mundo esencial y marcado continuamente por una extrema sensibilidad a las condiciones iniciales, que varían o pueden variar en cada momento y de manera sorpresiva, como de hecho lo atestigua, en numerosos campos y momentos, la historia reciente del mundo, afectando así a escalas, fenómenos, comportamientos y sistemas distintos y ajenos a aquellos en los que inicialmente tuvo lugar una perturbación, una bifurcación, en fin, una inestabilidad.

Desde luego, no es necesario a priori que una inestabilidad en un sistema y en un lugar determinado tenga repercusiones sobre otros sistemas en otros lugares. Empleando una analogía proveniente de la geología, todo depende de la escala y la magnitud del acontecimiento. Nos explicamos.

En geología en general y en sismología en particular se han establecido determinadas escalas para medir movimientos telúricos. Las más conocidas son la escala de Richter y la escala de Mercali. Existen permanentemente en el mundo movimientos tectónicos que no son percibidos por nosotros, pero que son detectados por los instrumentos sensibles de la sismología. La inmensa mayoría de estos movimientos se dan en magnitudes entre uno y cuatro. Los movimientos telúricos registrados entre cinco y nueve, justamente la mayoría de temblores y terremotos detectados y conocidos, traen consigo consecuencias desastrosas. El límite superior de la escala es 10, que implicaría una catástrofe de consecuencias insospechadas.

Una razón matemática explica esta clase de funciones y relaciones. Es una ley de potencia, y se mide en escalas logarítmicas. La figura 1.3 ilustra esta clase de leyes de potencia.

Figura 1.3. Leyes de potencia, en escala natural (a) y logarítmica (b)



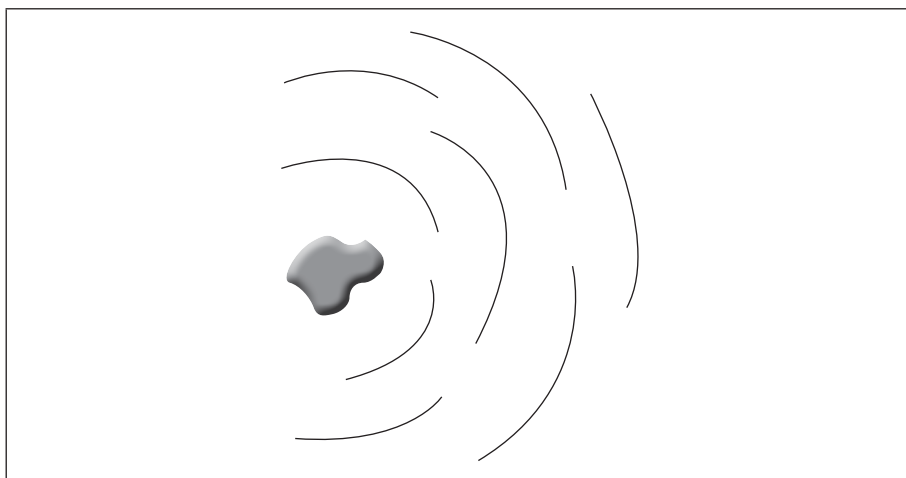
Fuente: elaboración propia.

Los gráficos representados en la figura 1.3 indican que existen numerosos eventos de corta magnitud que tienen consecuencias de bajo alcance y pocos eventos de amplio alcance con consecuencias significativas. Por tanto, la racionalidad es inversamente proporcional: numerosos eventos de baja repercusión y pocos acontecimientos de alta repercusión y alcance.

La dificultad estriba en que no es posible establecer a priori cuáles acontecimientos tendrán repercusiones magníficas. Precisamente por ello, una tarea cuyas consecuencias incluso son altamente éticas consiste en el trabajo

con espacios de posibilidades, puesto que los espacios reales podrían ser demasiado tardíos, como es efectivamente el caso (figura 1.4).

Figura 1.4. Acontecimiento local (en rojo) y sus ondas de repercusión (en azul)



Fuente: elaboración propia.

En rojo aparece un acontecimiento local; las ondas de repercusión expresan la magnitud y grado –o escala– del evento, de suerte que pueda inscribirse o no en la explicación de las leyes de potencia representadas en el gráfico anterior.

Complejidad y clasificación tradicional de las ciencias (básicas o naturales y sociales y humanas)

Cuando se hace ciencia, y en particular cuando se trabaja en ciencia de punta (*spearhead science*), el primer objeto de trabajo no es el mundo, los objetos de que se trate o la naturaleza; por el contrario, es el lenguaje. En efecto, se trata de dificultades serias tales como: ¿cómo decir lo nuevo?, ¿cómo emplear el lenguaje “viejo” o habitual para designar lo nuevo que conocemos? El lenguaje natural opera como un fijador –para emplear una expresión tomada de los laboratorios de fotografía o cine– y como vehículo a través del cual fluyen y se comunican una cantidad de cosas: impresiones, opiniones, conceptos, certezas, dudas, logros, cuestionamientos, flujos, procesos y realidades de diversa escala y magnitud. El lenguaje natural posee tanto una cola –de cometa– como una áurea o contexto cultural, social, político, religioso, filosófico.

Las dificultades del lenguaje se tornan más conspicuas cuando justamente tratamos con sistemas dinámicos, en el sentido específico de la complejidad; es decir, de sistemas que se hacen nuevos o que abandonan estructuras, formas y patrones antiguos. Según I. Stewart, lo propio de los sistemas caóticos consiste en el hecho de que tienden a perder la memoria –debido precisamente a la sensibilidad a las condiciones iniciales *en cada caso y a cada momento*.

En términos filosóficos, el conflicto consiste en determinar si vemos lo que conocemos o si conocemos lo que vemos. Resulta habitual que la gente vea tan solo lo que ya conoce, que tienda a centrarse en lo conocido y a remitir todo lo nuevo que ve, siente o experimenta –por definición novedoso– a estructuras (entre ellas lingüísticas y conceptuales) de lo ya sabido y conocido. La psicología de la Gestalt es una buena expresión de este fenómeno según el cual reducimos lo nuevo a lo sabido. Dicho de manera genérica, es muy poca la gente que se da a la tarea de conocer cosas nuevas –desafiando lenguaje, hábitos, conceptos que ya se poseen– y, por consiguiente, de verlas.

Un ejemplo ilustra este problema. Incluso un biólogo teórico como S. Kauffman lo incorpora en su obra, al discutir la heurística de las ciencias de la complejidad (Kauffman, 2000). Cuando los españoles llegaron al territorio de los mexicanos (= aztecas), estos fueron incapaces –literalmente– de verlos, puesto que carecían de los conceptos que les permitían ver los nuevos fenómenos: arcabuz, perro, barco, blancos, cristianismo, entre otros. Solo se percataron de la llegada de los españoles por vías de hecho: cuando literalmente estaban asolando los campos, matando a hombres y niños, poseyendo a las mujeres, destruyendo los templos y derribando las imágenes de los dioses. Pero ya era demasiado tarde.

La función de los conceptos en general y de las teorías en particular es permitirnos ver –nuevas– realidades. A diferencia de la *E. coli* que tenemos en nuestro intestino, del perro que nos acompaña, de la vaca que nos ofrece su leche todas las mañanas o de las plantas y flores que adornan nuestra casa, vemos el mundo y la naturaleza, la sociedad y el universo a través de los símbolos y los signos que se encarnan en el lenguaje y se vehiculan a través de todo el aparato y cuerpo de conocimiento. En otras palabras, no tenemos un acceso directo a la naturaleza y al mundo: estamos siempre mediados por la cultura –en sentido amplio– que poseemos. Al fin y al cabo, toda explicación parece ser una interpretación.

Hacer ciencia es extremadamente difícil. Frente a lo que podría pensarse espontáneamente, la dificultad no radica en asuntos relacionados con presupuestos, equipos de investigación, formación académica de excelencia, publicaciones, idiomas u otros parecidos; por el contrario, tal dificultad estriba en el hecho de que en ciencia sólo se puede ser primero; es decir, no se puede descubrir lo ya descubierto, no se puede inventar lo ya inventado, no se puede pensar lo ya pensado; en el mejor de los casos se puede modificar, alterar, criticar, revisar. Esta es la característica de la ciencia, en particular cuando hablamos de producción de conocimiento nuevo, o de corrimiento de las fronteras del conocimiento, en una palabra, de ciencia de punta. Es en este espacio en donde se sitúa la comunidad científica de punta –en el sentido más amplio y no técnico de la palabra.

Ahora bien, al tiempo que la actividad científica surge de un entorno social y cultural, contribuye a transformarlo; solo que, como lo precisara Kuhn, esa transformación del entorno social implica un choque con las usanzas, las prácticas sedimentadas, las tradiciones a-críticas, en fin, lo atávico. Esta situación es tanto más cierta en el contexto del estudio de los sistemas complejos no-lineales.

El caldo de cultivo de las ciencias de la complejidad fueron las ciencias básicas y naturales, pero el camino se dirigió rápidamente hacia otro tipo de ciencias: las ciencias sociales y humanas. Este movimiento desde ciencias más simples –literalmente– hacia ciencias más complejas –desde cualquier punto de vista (estructural, epistémico, dinámico, y otros)– corresponde tanto al crecimiento y el fortalecimiento de las propias ciencias de la complejidad como a un reconocimiento explícito de que las ciencias sociales y humanas cuentan, son importantes (*they matter*) y representan uno de los mayores retos para el estudio y el desarrollo de los sistemas complejos no-lineales.

El mejor testimonio de este movimiento es el Informe Gulbenkian para la Reestructuración de las Ciencias Sociales. No en vano el título acordado para este informe es *Abrir las ciencias sociales* (1994, 2006). Como consecuencia directa de dicho informe, I. Wallerstein escribe uno de los textos más significativos que pone sobre la mesa el reconocimiento de la importancia de las incertidumbres del saber (2005).

El fenómeno más radical del giro producido en el estudio de los fenómenos y dinámicas de complejidad creciente tiene que ver con un hecho singular, a saber: el reconocimiento de que el ser humano (“ciencias humanas”,

“ciencias sociales”) no constituye una dimensión por sí misma aislada de las demás dimensiones, escalas y fenómenos de la realidad en general –que era el mayor supuesto de toda la tradición occidental desde la Grecia antigua.

Esta idea puede ser presentada por vía de una analogía. Así como en la pintura del período Edo en Japón –expuesta principalmente por K. Hokusai– aparece un paisaje con un mar y una ola inmensa en cuya base, algo lejana, se encuentra una pequeña barca de pescadores tratando de mantenerse a flote, o así como en otro paisaje aparece el formidable Monte Fuji, en uno de cuyos lados se puede ver, pequeños, a unos hombres escalando o caminando por ella, tratando de mantenerse ante la imponente naturaleza; así mismo el estudio de la dimensión y de la dignidad humana –en cualquier sentido de la palabra– no se erosiona ni se elimina, sino que queda inscrita en un marco más amplio que lo contiene y lo hace posible.

Existen diversas clases de humanismo: el humanismo griego, el humanismo renacentista, el humanismo clásico, el humanismo marxista, el humanismo ateo, el humanismo cristiano, y otros más, e incluso algunos sectores optan por denominarlo no ya como humanismo sino como enfoques y filosofías “humanísticas”. Estos distintos tipos de humanismos están acompañados por concepciones filosóficas, religiosas y políticas determinadas, muchas de las cuales no son compatibles con otras semejantes que se denominan a sí mismas como humanistas. Lo que queremos afirmar es que no obstante las diferencias entre ellos, todos asumen explícita o tácitamente una cierta distancia entre el ser y la realidad humana frente al resto del mundo y de la naturaleza.

En contraste con estas posiciones, queremos poner de relieve que la comprensión del ser humano en el sentido de la complejidad no altera ni afecta a cualquiera de aquellas concepciones sobre la humanidad, al contrario, las integra como aspectos o casos locales en el espectro más amplio de sistemas dinámicos caracterizados por interdependencias, sensibilidades y movimientos recíprocos con otras escalas, dimensiones, fenómenos y sistemas.³⁵

Es preciso hacer un reconocimiento poco amable. Parece ser mayor la tendencia de los científicos sociales y de las humanidades a cerrarse en sus propios dominios, lenguajes y tradiciones que la de los científicos positivos o

³⁵ Una ampliación de esta idea se encuentra en Maldonado, C. E. (2009). “Complejidad de los sistemas sociales: un reto para las ciencias sociales”, en: *Cinta Moebio* 36: 146-157; www.moebio.uchile.cl/36/maldonado.html

naturales. Estos últimos parecen estar más abiertos hacia otras esferas como la poesía, la música, el arte y las humanidades, que aquellos otros hacia las matemáticas, la biología, la química, la física o los sistemas computacionales.

Si tal es el caso, sería en este sentido que habría que entender la necesidad del llamado de la Comisión Gulbenkian –conformada por C. Juma, E. Fox Keller, J. Kocka, D. Lecourt, V. Y. Mudimbe, K. Mushakoji, I. Prigogine, P. J. Taylor, M. P. Trouillot y I. Wallerstein– para que las ciencias sociales se abran tanto a la ciencia de punta como a los fenómenos y dinámicas sorprendentes, por novedosas, del mundo actual. Y por ciencia de punta no cabe la menor duda: se trata de las ciencias de la complejidad o la ciencia de las dinámicas no-lineales.

La tesis que queremos plantear aquí es que el encuentro frontal, abierto y desinteresado entre ciencias sociales y humanas y ciencias naturales y exactas tiene una doble consecuencia inaudita. Por un lado, como sucede en todos los encuentros (algo que ha sido bien planteado por parte de T. Todorov a propósito del encuentro entre los españoles y europeos y los pueblos precolombinos), el primer resultado es que las partes relacionadas se transforman radicalmente, precisamente al incorporar en su propia historia a la(s) otra(s) partes(s), con lo cual “su” propia historia deja de ser “suya” únicamente. Por otra parte, el propio concepto de “ciencias sociales y humanas” tanto como el concepto de “ciencias naturales y exactas” se revela, entonces, como un arcaísmo.

En consecuencia, pensar la ciencia en general –social o natural, ideográficas o nomotéticas, blandas o duras, o como se las quiera denominar– exige una decisión radical. Se trata del reconocimiento de que las ciencias, tal y como han existido, como han sido denominadas y comprendidas, son un verdadero arcaísmo, puesto que en el marco de la ciencia de punta en general, muchas de ellas desaparecen por completo, se integran en otras más amplias o se atomizan en partes distintas que quedan unas integradas allí y otras inscritas por allá. “Allí” y “allá” son maneras generales de designar a las nuevas ciencias en el contexto de la sociedad del conocimiento. Hay aquí una tarea de gran envergadura aún por cumplir (Lewin, 1995; Gleick, 1989; Waldrop, 1993; Erdi, 2008, Scott, 2007).

Ahora bien, esta idea adquiere un carácter más radical cuando también se considera en relación con la tecnología y el arte. En efecto, del lado de las ingenierías, el tema de la comprensión y clasificación de las ciencias –algo

que resulta cada vez más importante desde numerosos puntos de vista en el mundo actual y hacia el futuro— supone una transformación conceptual, y por tanto semántica, importante. De manera tradicional siempre se estableció la diferencia entre tres dominios: técnica, tecnología y ciencia. Pues bien, debido a los numerosos desarrollos teóricos y prácticos, en particular, gracias al desarrollo de los sistemas informacionales y computacionales, hoy en día resulta *desueto* hablar de dos cosas como si fueran distintas: ciencia y tecnología. El concepto que les corresponde es el de *tecnociencias*, acuñado por G. Hottois por primera vez en 1982, pero que aún no tiene un reconocimiento sólido entre académicos, científicos y políticos. Quizá la diferencia aún pueda trazarse entre técnica y tecnología, y con ella entre técnico y tecnólogo. En consecuencia, a fortiori, entre científico y técnico.

Del lado del arte, los estudios sobre ciencia en general deben poder incorporarlo a partir de una doble motivación. Por un lado, a lo largo de la historia de la humanidad el trabajo en arte siempre ha estado acompañado tanto por el uso de nuevas técnicas y tecnologías; por otro, el arte y la ciencia no tienen intereses ni preocupaciones contrapuestas; así, ya no cabe —en absoluto— la clasificación del arte como algo ajeno a la ciencia —una idea que encuentra sus raíces en la filosofía de Aristóteles.

La ciencia y al arte comparten la pasión por numerosos aspectos, entre ellos, la armonía, la belleza, la dinámica, la ausencia de fronteras claras y rígidas, la exploración, el juego, la imaginación, en fin, la creatividad. Pero esto es cierto a condición de que se entienda a la ciencia en el *espíritu* de los sistemas de complejidad creciente y al arte como el juego entre verdad y belleza. En estos términos, el encuentro entre ciencia y arte producirá la transformación de cada uno de ellos. Una vez más, este es un tema que emerge recientemente y que aún habrá de convocarnos en el futuro, en el marco del estudio de los sistemas y comportamientos dinámicos en general. Entre los autores que cabe destacar del lado de los estudios sobre el arte están K. Clark y E. H. Gombrich.

Recapitulando: el problema del progreso del conocimiento relativamente a la complejidad

La complejidad no se ocupa de todos los fenómenos. No es bueno, necesario ni deseable que las cosas sean “complejas”, pero cuando lo son o se vuelven

complejas tenemos un conjunto –varios, en realidad–, de “instrumentos” gracias a los cuales podemos ver estos fenómenos y explicarlos.

Si puede hablarse de un método en complejidad –un contrasentido, por lo menos desde el punto de vista semántico, pues en el contexto del estudio de los fenómenos y comportamientos complejos adaptativos en realidad asistimos a la emergencia de un pluralismo metodológico–; mejor aún, si cabe hablar de un procedimiento de aproximación al trabajo y la formación en la complejidad así como a la investigación sobre ella, este sería el de la constante y sensible observación de valores críticos en los comportamientos o las dinámicas de los sistemas. Esta idea no es difícil.

Se trata de concentrar la mirada en las anomalías antes que en los fenómenos normales, en las desviaciones antes que en los estándares y promedios, en fin, en las singularidades antes que en los planos y mapas en general. Análogamente a la arquitectura, la fineza de una obra se reconoce en sus acabados; esto es, en los detalles, pues son ellos los que marcan la creatividad y la genialidad de un arquitecto (en contraste, por ejemplo, con un urbanizador).

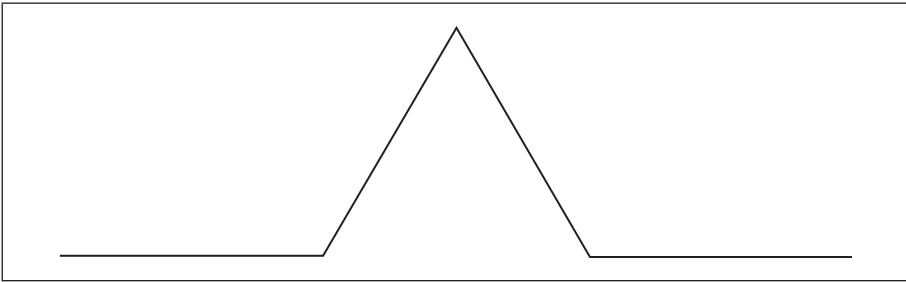
Ciertamente, esta clase de observaciones ya es común a la (buena) ciencia contemporánea. La diferencia estriba en una observación con escalas amplias –de tiempo, por ejemplo– y en términos transversales o multiescalares. Gracias a esto será posible comprender un fenómeno o un sistema determinado en términos dinámicos. En los umbrales de los valores críticos los investigadores de los sistemas complejos –de complejidad creciente– buscan identificar estados críticos y puntos críticos, pues allí es donde suceden las cosas interesantes, desde el punto de vista filosófico, heurístico y vital.

Este lenguaje y esta actitud no debe prestarse a engaños: las ciencias de la complejidad son ciencias de tiempos de crisis o de fenómenos y sistemas en crisis (¡críticos, justamente!). Solo que una mirada atenta pone al descubierto el hecho de que el esquema tradicional, de acuerdo con el cual las cosas se entendían como aquellas que tienen origen, desarrollo, apogeo, decadencia y muerte, es en verdad bastante artificioso y equivocado. La representación misma de esta idea (figura 1.5) raya por su simplicidad con la agresión al intelecto.

Mucho más aproximada a los comportamientos y dinámicas reales es la idea de los fractales, que constituyen una muestra mejor de un fenómeno en crisis, esto es, dinámico.

En complejidad entendemos que los sistemas evolutivos *siempre* están en crisis, en un doble sentido:

Figura 1.5. Sencillo generador de la estructura fractal conocida como curva de Koch



Fuente: elaboración propia.

- a) O bien en el sentido de que la crisis es real, inminente o inevitable –y entonces hay que actuar (la ciencia es una praxis),
- b) o bien en el sentido de que la crisis aún no existe, pero podría tener lugar –y entonces trabajamos sobre ella, incluso aunque jamás llegue a tener lugar efectivamente.

Precisamente por ello, el trabajo con complejidad es esencialmente trabajo con posibilidades. Existe aquí un vaso comunicante con otras herramientas y aproximaciones, tales como los estudios de futuro (distintos de la futurología) y con la prospectiva, que son las más populares. Sin embargo, la diferencia con estas dos estriba en el trabajo a profundidad con sistemas no-lineales y en la investigación de la no-linealidad en el más estricto de los sentidos.

Esto nos permite una observación adicional. Las ciencias de la complejidad –incluidas las lógicas no-clásicas– son ciencias *formales*. La formalidad debe entenderse aquí en el sentido de *rigor científico*, *rigor académico*. Por ejemplo, rigor sintáctico, semántico, matemático, filosófico, en fin, científico. Este es un rasgo que comparten las ciencias de la complejidad en general con la mejor filosofía y con la mejor ciencia en la historia de la humanidad. Dicho negativamente, se trata de evitar a toda costa las veleidades de la pseudo-ciencia y todo lo que la acompaña (como su atracción por la opinión –*doxa*–, los saltos ligeros de un terreno a otro, de un lenguaje a otro, en fin, el gusto por la ambivalencia, tanto como en la otra orilla por un rigorismo acartonado).

No cabe la menor duda: la pasión por la complejidad es la pasión por la dinámica, el movimiento, el cambio. La motivación principal es comprender cómo sucede y por qué, cómo nos sorprende y cómo podemos aprovecharlo. Asistimos por primera vez en la historia de la humanidad al estudio integra-

do –científico, filosófico, tecnológico, y demás– de aquello que había podido ser reconocido, quizás, pero que nunca constituyó un motivo directo de tematización y problematización.

Sacar orden a partir del caos, he aquí un rasgo de civilización y espíritu, pues lo usual es que ante el caos y las catástrofes, ante las transformaciones y los cambios imprevistos, el espíritu humano sucumbiera, terminara derrotado o, peor aún, terminara por darse *a sí mismo* por vencido. Los ejemplos en la historia –en toda la extensión de la palabra– abundan y se pueden mencionar a voluntad, casi sin límite.

Mientras que la historia de la ciencia se concentró en los logros, los descubrimientos y los fracasos, recientemente hemos comenzado a trazar la historia de la ciencia también en función de los errores y desaciertos; el resultado ha sido sorprendente, pues esta otra historia aporta más y mejores luces sobre el progreso del conocimiento y de la vida. La mayoría de las cosas fracasan o no tienen éxito: tal es la primera evidencia de una lectura dinámica, evolutiva de la sociedad y de la naturaleza. Pues bien, disponemos de conceptos, instrumentos y lenguajes que nos permiten trabajar con estos procesos (Ormerod, 2005). Frente al fracaso y la pérdida, el estudio de los sistemas dinámicos destaca la urgencia y la importancia de la creatividad y la innovación. En pocas palabras: los cambios y las transformaciones, las revoluciones y las inestabilidades, las fluctuaciones y las turbulencias *son* innovaciones y *exigen o demandan* innovación.

Una de las herramientas de las que disponen los seres humanos a la hora de describir y comprender los fenómenos –que muchas veces les acaecen, o que ellos mismos producen pero cuyas consecuencias o alcances escapaban a la vista–, y con las cuales toman decisiones y actúan en un sentido o con una dirección determinada es la ciencia. Sin embargo, ante la inminencia de turbulencias, inestabilidades y fluctuaciones, la ciencia clásica poco o nada podía contribuir, pues ella, cargada de conceptos y principios filosóficos tales como “ser”, “la realidad” (en singular), “estabilidad” y otros, ocultaba, desconocía o desplazaba ideas y conceptos tales como movimiento, evolución, dinámica, cambios imprevistos y otros semejantes. Esto se dio hasta cuando emergieron ciencias que hicieron de estos temas, retos y problemas el motivo central de todo su trabajo e investigación.

Extraer –si cabe la expresión– orden a partir del caos, o bien lograr orden a través de fluctuaciones, son dos maneras distintas de mostrar tanto la

capacidad de la inteligencia como la fortaleza del espíritu. Implican creatividad e imaginación, determinación y claridad conceptual, trabajo de equipo y autonomía. Sólo una inteligencia creativa, formada con rigor y con ayuda de imaginación creativa puede lograr ver –no con los ojos físicos, ciertamente– orden a partir del caos. Así mismo, sólo un espíritu vital –en el mejor y más fuerte de los sentidos de Nietzsche– es capaz de vislumbrar patrones en medio de las turbulencias. La usanza ha sido siempre el aislamiento o el rechazo de cualquier forma de las inestabilidades y turbulencias, cuando aparecen, para mantener o alcanzar un orden y regularidad determinado. En la literatura, dos ejemplos notables son la obra de Boccaccio y, antes que él, la de Petrarca.

La dignidad del estudio de los sistemas dinámicos consiste en la capacidad de conocer fuerzas que nos dominan –o nos dominaban– y principios que les subyacen. Para ello el estudio de los sistemas complejos implica y exige algo extremadamente difícil: *pensar en sistemas abiertos demanda una mente abierta*. Por ejemplo, una mente dispuesta a corregirse cuando sea necesario, una mente que escapa a las certezas para abrirse además a la incertidumbre, en fin, una mente que sabe que el control sólo es local y provisional. “Sólo quien espera lo inesperado hallará”, decía Heráclito, llamado el Oscuro de Éfeso.

El tema que siempre fue eludido es ahora motivo de serias investigaciones, aunque apenas comenzamos. Es cierto que nunca antes hubo tantos científicos y tecnólogos, pero son pocos los que se apasionan por la dinámica en el sentido de la complejidad. El peso de la cultura es enorme; queremos decir, de esa cultura que se empeña en el orden, la estabilidad y las regularidades. A favor suyo, digamos que es pensar con el deseo (*wishful thinking*): quisiéramos que las cosas estuvieran en orden, controladas, ciertas, pero lo que es evidente es que hay torbellinos que nos atrapan, fuerzas que nos manejan, que no terminamos de controlar y muchas veces ni siquiera de comprender. Esta es la carga ética, si se quiere, de la complejidad.

En efecto, estudiar sistemas dinámicos –es más, *alta y crecientemente* dinámicos–, al tiempo que demanda una mente dinámica, en el mejor y más excelso de los sentidos, contribuye a una plasticidad y flexibilidad de las estructuras mentales. En este sentido, educadores y psicólogos, sociólogos y antropólogos, cognitivistas y filósofos coinciden en que el reconocimiento explícito de la percepción natural está siendo transformado por las nuevas tecnologías, en el sentido más amplio e incluyente de la palabra, que la naturaleza misma está siendo modificada de una forma imprevista, si se mira con

los ojos de la tradición –varias de cuyas muestras es la investigación con las nuevas tecnologías aplicadas a los sistemas vivos, tales como la bioingeniería, la biotecnología y las biociencias.

Nunca como ahora fue más urgente y dramático el llamado a estudios del futuro y a instrumentos semejantes. La insistencia y el tono se justifican en el carácter integrado –como nunca antes en la historia del mundo– de los conjuntos de retos, problemas, temas e intereses. Precisamente, en cierta consonancia con ello, hemos aprendido la importancia y las potencialidades de trabajar con espacios de posibilidades –“espacios de fase”–, como aquellos en los cuales los cambios y las transformaciones pueden suceder y en efecto tienen lugar.

Así como la modernidad introdujo la perspectiva, esto es, el punto de fuga y la visión estereoscópica, en un giro irreversible en la historia del arte (válido hasta la llegada de las *Demoiselles d'Avignon* de P. Picasso), del mismo modo hemos aprendido a desarrollar otro tipo de mirada, a saber: una visión multiescalar.

La visión multiescalar supone el desplazamiento de la mirada desde el universo microscópico hasta el universo macroscópico, y a los grados y niveles intermedios tanto como a la capacidad de atender al mismo fenómeno en cada una de las escalas y en todas en su conjunto a la vez. Con seguridad, esta nueva mirada no había tenido lugar nunca antes en la historia de la humanidad. La tabla 1.2 ilustra las escalas físicas del universo.

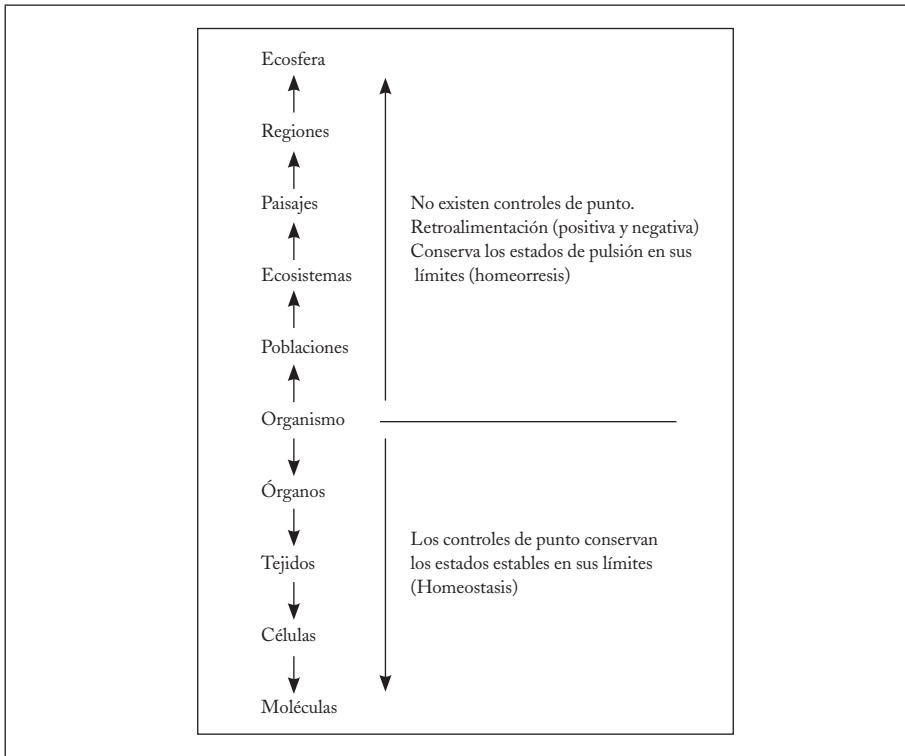
Tabla 1.2. Escalas físicas del universo

Universo microscópico – unidad métrica	Universo macroscópico
Mili - 10^{-3}	Centímetro
Micro - 10^{-6}	Decímetro
Nano - 10^{-9}	Metro
Pico - 10^{-12}	Kilómetro
Atto - 10^{-15}	
Femto - 10^{-18}	Año luz

Fuente: elaboración propia.

La figura 1.6 ilustra escalas biológicas de la naturaleza y representa la cibernética de la jerarquía organismo-ecosistema.

Figura 1.6. Escalas biológicas de la naturaleza.



Fuente: adaptado de Odum (1997).

Como se observa, el punto de confluencia de los procesos homeostáticos y homeorréticos es el organismo. Si se comparan los controles a nivel del organismo y por encima suyo, las organizaciones y las funciones en el nivel del ecosistema son mucho más reguladas y controladas, pero exhiben comportamientos más caóticos y desequilibrados, los cuales son controlados por los bucles de retroalimentación –positiva y negativa. En eso consiste la homeorresis. La idea principal aquí es suministrar una ilustración acerca de los balances dinámicos en la naturaleza.

En diversas ocasiones hemos expresado alguna duda acerca de Aristóteles y de la tradición aristotélica. Pero hay un punto en el que es preciso hacerle un reconocimiento. De acuerdo con el Estagirita, a diferencia de las ciencias particulares, el estudio de la filosofía, en el mejor y más excelso de los sentidos, se caracteriza por la capacidad de ver la multiplicidad de la unidad, o lo general en lo particular. Lo que es, sostenía Aristóteles, se dice y se piensa

de maneras diversas, plurales, distintas. Y es el rasgo distintivo de la filosofía estudiar esta pluralidad: *to on legetai pollakhon*.

Al cabo del tiempo, por caminos no-disciplinarios, hicimos el aprendizaje de la importancia y, si se quiere, de la inevitabilidad de la pluralidad. Y mientras que lo singular, simple o sencillo siempre implica un cierto grado de control y de estabilidad, la idea misma de diversidad introduce frontal y directamente la noción de cambio, inestabilidad y equilibrio dinámico.

Queremos sugerir que las ciencias de la complejidad constituyen un nuevo tipo de racionalidad, si se quiere de filosofía, a condición de que no se piense en términos profesionales, disciplinarios y técnicos. Algo así es a lo que apunta la idea de filosofía digital, a la que se refiere G. Chaitin. En fin, a su manera, este es el horizonte al que apuntaba el llamado de Heidegger a *pensar*—como algo diferente a hacer técnica, ciencia o metafísica.

Como quiera que sea, es imperativo reconocer que el trabajo en torno a sistemas complejos tiene muchos componentes, cruza por varios dominios y se encuentra en vecindad con varios problemas que lo afectan. Por ejemplo, la elaboración de mapas, la identificación de grupos y de anillos, la configuración de espacios. Estas ideas pueden trabajarse con la ayuda de las matemáticas—haciendo referencia a la geometría algebraica o a la teoría de categorías. En lenguaje de complejidad, se trata justamente del trabajo con la ciencia de conexiones. Por ejemplo: ¿cuántos grados existen entre un punto de partida cualquiera y un objetivo determinado? No en última instancia, encontramos aquí el problema grueso de la aleatoriedad. Pero en otros aspectos, el trabajo en complejidad también concierne—o puede interesarse—por aspectos como criptografía, redes de seguridad, encriptamiento y desciframiento, por ejemplo. Anomia, decía Weber.

Puede decirse que los académicos, teóricos, experimentadores y científicos que se encuentran en el génesis del estudio de la complejidad son complejólogos de primera generación, en el sentido de que todos ellos se formaron—y en general, continúan formándose—en ciencias y en disciplinas particulares. En el curso de su formación tienen alguna información y estudio sobre complejidad, caos, fractales, redes y demás, pero por lo general no constituye ni siquiera la mitad de su formación universitaria básica. No obstante, sí hay una gran diferencia con respecto a la historia de la formación habitual en la historia de Occidente: se trata de la inmensa capacidad de síntesis, aunada a una excelente formación en su propia ciencia y disciplina, sin lo cual habrían

podido surgir ciencias de síntesis, ciencias de fronteras, en fin, problemas de frontera.

Aún no existen currículos de formación básica en complejidad, y en el mejor de los casos algunos doctorados y unas cuantas maestrías sobre complejidad. En el momento actual, lo mejor del trabajo en complejidad sucede al cabo de la educación formal: en centros e institutos de investigación –los cuales, por lo demás, se encuentran a medio camino entre la universidad y la sociedad, entre la universidad y la empresa, entre la universidad y el sector público (o estatal).

Cabe especular que en un futuro inmediato pueda surgir una segunda generación de complejólogos, esto es, todos aquellos que ya se habrán formado en complejidad como educación básica, con claros contenidos interdisciplinares. En inglés existe una distinción elegante y sutil para hablar de estos niveles de educación y de formación. Se dice que alguien estudió en una ciudad o universidad y/pero que se educó en tal otra universidad o ciudad (*He/she studied in X, and/but he/she was educated in Y*) (lo cual supone el reconocimiento expreso de que los lugares en los que se estudia el pregrado (*study*) y los lugares en los que se hace el posgrado y definitivamente el doctorado (*educate*) son –¡deben ser!– distintos, lo cual no solo garantiza un reconocimiento mejor en la formación, sino la creación de nuevas y más sólidas redes de conocimiento).

De acuerdo con K. Clark (2005), “el gran mérito de la civilización europea, en verdad el único mérito que tiene, es que nunca ha dejado de desarrollarse y de cambiar”. Europa es el nombre de una civilización que se caracteriza por el cambio y el desarrollo; incluso aunque dichas transformaciones y desarrollos no siempre sean provechosos, benéficos ni productivos; con todo, cuenta con ciertos momentos y fases que sí han hecho magníficas contribuciones a la historia del espíritu humano.

Europa marca un contraste notable con otras culturas y civilizaciones: con Egipto y con China, con los mayas y los aztecas, con los incas y los escandinavos, incluidos los celtas; por mencionar algunos ejemplos. “Europa”, en rigor, no es un lugar –ese que con acierto y humor designa J. Barzun (2000) como “la única península que se cree un Continente”. Pudiera decirse que es el lugar de un imaginario, pero el término ya está demasiado gastado. Europa es sencillamente el título de una época que abarca alrededor de dos mil quinientos años, a partir del período clásico de la Grecia antigua.

Dos maneras distintas de traducir el reconocimiento que hace Clark al espíritu europeo: una proviene de G. H. Wells, cuando establecer que hay comunidades de la obediencia y comunidades de la voluntad. Las primeras serían las civilizaciones de Egipto y Mesopotamia; las segundas, las del norte –las europeas, justamente. Otra manera es aquella que presenta N. Wiener, cuando habla de dos clases de sociedades: sociedades de conservación y sociedades de innovación. Nuevamente, entre estas últimas se sitúa lo que genéricamente podemos designar como el mundo Occidental.

Desde luego, estas (y otras) caracterizaciones (semejantes) chocan a quienes son partidarios de una crítica al eurocentrismo, de un reconocimiento de otras culturas y tradiciones, incluso de quienes claman por un llamado a lo más raizal de los pueblos. Como quiera que sea, una cosa es evidente: asistimos a una cultura o una civilización (mejor este segundo término, pues la civilización occidental se integra por las dinámicas y cruces de numerosas culturas –las cuales no siempre coinciden con los Estados; quizás, a lo sumo, con las naciones) marcada por variaciones y cambios, transformaciones y desarrollos, no siempre deseados o no siempre actuados como se los tenía originalmente concebidos.

Pues bien, la(s) ciencia(s) de la complejidad es aquel cuerpo de conocimientos que ha llegado a expresar y traducir mejor esas transformaciones y cambios; incluso esos choques y conflictos; en fin, las paradojas y las inconsistencias. Solo que –y este es el mayor de todas las admiraciones– se trata de un cuerpo de conocimientos –en el sentido amplio de la expresión– que ha terminado por descubrir una naturaleza, un mundo, un universo, que se explica mucho mejor en términos de equilibrios dinámicos, orden a través de fluctuaciones, en fin, orden a partir del caos. Por este mismo camino podremos encontrar una mayor y mejor reconciliación con la naturaleza, el universo y la sociedad. Aunque el camino aún se anuncie demasiado largo y no siempre claro ni desprovisto de obstáculos.

Referencias bibliográficas

- Andrade, E. (2003). *Los demonios de Darwin. Semiótica y termodinámica de la evolución biológica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia
- Anderson, P. W. (1999). "The Eightfold Way to the Theory of Complexity". In: Cowan, G. A., Pines, D., Meltzer, D., (Eds.). *Complexity. Metaphors, Models, and Reality*. Cambridge, MA: Perseus Books.

- Arthur, W. B., Durlauf, S. N., Lane, D. (Eds.) (1997) *The Economy as an Evolving Complex System, II*. Westview Press.
- Ash, A., and Gross, R. (2008). *Fearless Symmetry. Exposing the Hidden Patterns of Numbers*. Princeton and Oxford: Princeton University Press
- Axelrod, R., and Cohen, M. D. (1999). *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientific Frontier*. New York: The Free Press
- Bak, P. (1996). *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus.
- 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.
- Barrat, A., Barthélemy, M., Vespignani, A. (2008). *Dynamical Processes on Complex Networks*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Barrow, J. D., Davies, P. C. W., Harper, Jr, C. J. (Eds.) (2004). *Science and Ultimate Reality. Quantum Theory, Cosmology and Complexity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Bar-Yam, Y. (2004). *Making Things Work. Solving Complex Problems in a Complex World*. NECSI-Knowledge Press.
- Barrow, J. D. (1998). *Impossibility. The Limits of Science and the Science of Limits*. Oxford: Oxford University Press.
- Barzun, J. (2000). *From Dawn to Decadence. 500 Years of Western Cultural Life. 1500 to the Present*. New York: HarperCollins Publishers.
- Blume, L. E., and Durlauf, S. N. (2005). *The Economy as an Evolving Complex System, III: Current Perspectives and Future Directions*. Oxford: Oxford University Press.
- Brockman, J., (1995). *The Third Culture: Beyond the Scientific Revolution*. S.I.: Simon & Schuster
- Bruce, C. (2004). *Los conejos de Schrödinger. Física cuántica y universos paralelos*. Biblioteca Buridán.
- Campos Romero, D., Isaza Delgado, J. F. (2002). *Prolegómenos a los sistemas dinámicos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Cartwright, N. (2005). *Dappled World. A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Castells, M. (1998). *La era de la información. Economía sociedad y cultura*. Vol. 1: la sociedad red; vol. 2: el poder de la identidad; vol. 3: fin de milenio. Madrid: Alianza Editorial.

- Chaisson, E. J. (2001). *Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature*. Cambridge, MA- London: Harvard University Press.
- Churchland, P, and Churchland, P., (1999). *On the Contrary*. The MIT Press
- Clark, K. (2005). *Civilisation. A Personal View*. London: John Murray.
- Cowan, G. A., Pines, D., Meltzer, D., (Eds.) (1999). *Complexity. Metaphors, Models, and Reality*. Cambridge, MA: Perseus Books.
- Chaitin, G. (2007). *Meta Maths. The Quest for Omega*. London: Atlantic Books.
- D'Ottaviano, I. (2009). "Non Classical Logics and Applications". En: Maldonado, C. E. (2009). *Complejidad, Ciencia y Lógica*. Bogotá: Universidad del Rosario.
- De Rosnay, J. (2000). *The Symbiotic Man. A New Understanding of the Organization of Life and a Vision of the Future*. New York: McGraw Hill.
- Érdi, P. (2008). *Complexity Explained*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- Gabbay, D. M., and Guenther, F. (2001). *Handbook of Philosophical Logic*. Vols. 1-8. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers.
- Gell-Mann, M., Tsallis, C., (Eds.) (2004). *Non Extensive Entropy. Interdisciplinary Applications*. Oxford: Oxford University Press.
- Gleick, J. (1988). *Caos. La creación de una ciencia*. Barcelona: Seix Barral.
- Goble, L. (Ed.) (2005). *The Blackwell Guide to Philosophical Logic*. Blackwell Publishing.
- Gould, S. J. (1994). *El pulgar del panda. Reflexiones sobre historia natural y evolución*. Barcelona: Crítica.
- Gray, J. J. (2005). *El reto de Hilbert. Los 23 problemas que desafiaron a la matemática*. Barcelona: Crítica.
- Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening. Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hodges, A. (2008). *One to Nine. The Inner Life of Numbers*. New York – London: W. W. Norton & Co.
- Horgan, J. (1998). *El fin de la ciencia. Los límites del conocimiento en el declive de la era científica*. Barcelona: Paidós.
- Jablonka, E., and Lamb, M. (2005). *Evolution in Four Dimensions. Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Jaquette, D. (Ed.) (2006). *A Companion to Philosophical Logic*. Blackwell Publishing.

- Kauffman, S. (1998). *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization*. Oxford: Oxford University Press.
- Kauffman, S. (2000). *Investigations*. Oxford: Oxford University Press.
- Kauffman, S., (2004). "Autonomous Agents". In: Barrow, J. D., Davies, P. C. W., Harper, Jr, C. J. (Eds.) (2004). *Science and Ultimate Reality. Quantum Theory, Cosmology and Complexity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lewin, R. (1995). *Complejidad. El caos como generador del orden*. Barcelona: Tusquets.
- Magueijo, J. (2004). "A genuinely evolving universe". In: Barrow, J. D., Davies, P. C. W., Harper, Jr, C. J. (Eds.) (2004). *Science and Ultimate Reality. Quantum Theory, Cosmology and Complexity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Magueijo, J. (2006). *Más rápido que la velocidad de la luz. Historia de una especulación científica*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Maldonado, C. E. (2011). "Pensar la complejidad con la ayuda de las lógicas no-clásicas", en: L. Rodríguez (Coord.). *La emergencia de los enfoques de la complejidad en América Latina*, Buenos Aires: (en prensa).
- Maldonado, C. E. (2010). (Ed.). *Fronteras de la ciencia y complejidad*. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario
- Margaleff, R. (1993). *Teoría de los sistemas ecológicos*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- May, R. M. (1974). *Model Ecosystems*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Mitchell, S. (2003). *Biological Complexity and Integrative Pluralism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nicholis, G., Prigogine, I. (1994). *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*. Madrid: Alianza Editorial.
- Nowak, M. A. (2006). *Evolutionary Dynamics. Exploring the Equations of Life*. Cambridge, MA, and London: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Odifredi, P. (2004). *The Mathematical Century. The 30 Greatest Problems of the Last 100 Years*. With a Foreword by F. Dyson. Princeton and Oxford: Princeton University Press.
- Odum, E. P. (1997). *Ecology. A Bridge Between Science and Society*. Sunderland, MA: Sinauer Associates, Inc. Publishers.
- Ormerod, P. (2005). *Why Most Things Fail. Evolution, Extinction and Economics*. New York: Pantheon Books.

- O'Shea, D. (2008). *The Poincaré Conjecture. In Search of the Shape of the Universe*. Penguin Books.
- Pagels, H. (1989). *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa.
- Palau, G. (2002). *Introducción filosófica a las lógicas no-clásicas*. Barcelona: Gedisa-UBA.
- Peña, L. (1993). *Introducción a las lógicas no clásicas*. México: UNAM.
- Prigogine, I. (1980). *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*. San Francisco: W. H. Freeman and Co.
- Priest, G. (2008). *An Introduction to Non-Classical Logic*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Richardson, K. A., Goldstein, J. A., Allen, P. M., Snowden, D. (Eds.) (2005). *E:CO. Emergence, Complexity and Organization*. Manfield, OH: ISCE Publishing.
- Sastry, S. (1999). *Nonlinear Systems. Analysis, Stability, and Control*. Berlin: Springer Verlag.
- Scott, A. C. (2007). *The Nonlinear Universe. Chaos, Emergence, Life*. Berlin: Springer Verlag.
- Smith, J. M. and Szathmáry, E. (2003). *The Major Transitions in Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- Smith, J. M., and Szathmáry, E., (2001). *Ocho hitos de la evolución. Del origen de la vida a la aparición del lenguaje*. Barcelona: Tusquets.
- Stewart, I., (1998). *De aquí al infinito. Las matemáticas de hoy*. Barcelona: Crítica.
- Strogatz, S. (2003). *Sync. How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature, and Daily Life*. New York: Theia.
- Tiezzi, E., (2006). *La belleza y la ciencia. Hacia una visión integradora de la naturaleza*. Barcelona: Icaria.
- Waldrop, M. M. (1993). *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York: Touchstone.
- Wallerstein, I. (Coord.) (2006). *Abrir las ciencias sociales*. México: Siglo XXI Editores.
- Wallerstein, I. (2005). *Las incertidumbres del saber*. Barcelona: Gedisa.
- Watts, D.J. (2002). *Six Degrees. The Science of A Connected Age*. New York-London: W. W. Norton & Co.
- Zurek, W. H. (Ed.) (1990). *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*. Volume VIII, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Westview Press.