

Especificidad de las ciencias de la complejidad y otros mundos posibles

CARLOS EDUARDO MALDONADO

Como pretexto inicial, bien vale la pena hacer un comentario sobre el mapa de la complejidad, que Brian Castellani publica desde 2018 (véase Castellani, 2018) y que actualiza de tanto en tanto. Es el hecho de que se trata de un mapa equivocado por lo parcial y sesgado, y es altamente reduccionista, algo que va totalmente en contra del espíritu y la letra de las ciencias de la complejidad. Para un *outsider*, el *roadmap* de Castellani es de ayuda, sin duda, para establecer desarrollos, actores, tiempos. Pero su validez no vas más allá de una mirada a ese continente que es Internet, y en su caso particular a eso que denomina “complejidad”.

El mapa de Castellani sirve para introducir dos ideas que justifican este texto. Una, que será el objeto solo de reflexiones indirectas, y la otra, que constituye el núcleo de este capítulo. Se trata de, en un caso, en el mejor espíritu del Círculo de Viena (Stadler, 2011), trabajar, al interior de la “familia complejidad”, una familia grande, pues,¹ a la fecha, ciertamente, en *criterios de demarcación*. No es lo mismo la ciencia de sistemas (o los enfoques sistémicos) (*systems science*) que la cibernética, que el pensamiento complejo, que las ciencias de la complejidad, en fin, por ejemplo, que la autopoiesis y que la autoorganización, por mencionar tan solo los ejemplos más gruesos. Digámoslo de forma franca: la ciencia de sistemas es originaria y filosóficamente ciencia del control. Nada más opuesto a las ciencias de la complejidad.

1. Una observación de entrada: en la expresión “la familia de complejidad”, usaré siempre “complejidad” entre comillas para significar que el uso de complejidad por parte de los demás miembros de la familia es genérico, vago, impreciso. En muchas ocasiones, se usa el término como adjetivo o adverbio.

En toda familia —especialmente numerosa—, siempre hay, por decir algo, la prima boba, el primo rico, el hermano astuto, el que tiene dinero y muchos otros casos más. Incluso, en familia que se respete, siempre está aquella persona de la que nadie quiere hablar, pero que está siempre presente, o el que se quiere hacer notar a toda costa, pero al cabo, es un bobalicón, por ejemplo. Nada distinto sucede en esa familia amplia que se quiere llamar a sí misma “complejidad”, pero que quieren heredar un nombre que no les pertenece en rigor.

Esta es una tarea de la que me ocuparé amplia y directamente en otro lugar. Y es exactamente a esto a lo que denomino trabajar en criterios de demarcación. Nada semejante ha sido elaborado hasta la fecha, en ningún idioma. Aquí abordo el asunto de manera indirecta, a la manera de efecto Doppler, si cabe.

Antes bien, mi objetivo en este texto es el de trazar algunos rasgos específicos, distintivos, de las ciencias de la complejidad. Desafortunadamente, por razones de espacio, no podré ser prolijo en los aspectos más característicos de las ciencias de la complejidad; esto es: ¿qué son las ciencias de la complejidad que no son los demás miembros de la familia? Con una observación fundamental: mi objetivo no es aquí ni contraponer ni jerarquizar dos ideas bastante ajenas al espíritu del estudio de los fenómenos, sistemas y comportamientos de complejidad creciente.

De entrada, hay que decir una cosa: no todas las cosas son complejas; es más, la mayoría de los fenómenos en el mundo *no* son complejos. Así, las ciencias de la complejidad no se ocupan de todas y cada una de las cosas del mundo. Una ciencia que lo explica todo no explica nada, y eso es exactamente pseudo-ciencia (son ejemplos la astrología y la numerología, pero muchos otros pueden nombrarse también). Es más, no es ni bueno ni necesario ni provechoso que las cosas sean complejas. Para efectos prácticos, en numerosos casos en la vida, tanto mejor que las cosas no sean complejas. Y si no son complejas, sencillamente no sucede nada —nada grave, nada preocupante, nada alarmante.

Las ciencias de la complejidad —así, en plural, en notable contraste con la expresión “el pensamiento complejo” (¡Género y número!, decían los medievales, que de lógica algo sabían)—, tan solo se ocupan de los fenómenos o comportamientos del mundo cuando son o se hacen complejos, y no siempre las cosas son o se vuelven complejas.

La tesis que quiero sostener con este texto es que las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida, aunque lo contrario no se pueda afirmar con igual validez. Desde cualquier punto de vista —intuitiva, conceptual, categorialmente, etétera—, el fenómeno de máxima complejidad conocida e imaginable es la vida; esto es, los sistemas vivos. Y este es el núcleo duro de las ciencias de la complejidad. Como se aprecia, se trata entonces de un desplazamiento fuerte de un interés eminentemente antropocéntrico, antropomórfico y antropológico, por una comprensión más biocéntrica o ecocéntrica. Quiero decirlo de manera directa: todos los otros miembros de la familia “complejidad” son antropocéntricos, y eso es, hoy por hoy, muy poco. He argumentado en este sentido en otros lugares (Maldonado, 2019b).

En las ciencias de la complejidad, cualquier preocupación, comprensión o visión del ser humano no desaparece en absoluto. Simplemente se integra en un conjunto más amplio que lo comprende y lo hace posible: la naturaleza, la vida. Sabemos que existen numerosos humanismos. Pues bien, cualquiera que es el humanismo —el humanismo griego, el humanismo renacentista, el humanismo cristiano, el humanismo católico, el humanismo musulmán, el humanismo marxista, o cualquier otro—, no desaparece sino queda inscrito, en una dimensión inmensamente más amplia, la preocupación por la naturaleza o por la vida.

La tesis mencionada se articula en cuatro argumentos principales que contribuyen a elucidar el título y el objetivo de este texto; así, en primer lugar, se afirma que las matemáticas de la complejidad son las matemáticas de sistemas discretos y se aportan explicaciones al respecto. Sobre esta base, en segundo lugar, se sostiene que pensar en complejidad (= ciencias de la complejidad) implica incluir a las lógicas no-clásicas, una idea que no ha sido expuesta antes en ningún lugar y que sin embargo, ya cuenta con algunos antecedentes propios. De pasada, es conocido que existen diferentes relaciones entre matemáticas y lógicas. El tercer argumento sostiene que las ciencias de la complejidad no se ocupan exclusiva y ni siquiera principalmente por lo real, en cualquier acepción de la palabra. Antes bien, pensar en complejidad significa pensar en posibilidades. Sobre la base anterior, y de forma aún más radical, el cuarto argumento afirma que pensar, trabajar e investigar en complejidad es, adicionalmente, pero cada vez más, trabajar y pensar en función de lo imposible. Al final se extraen algunas conclusiones.

Va de suyo que los cuatro argumentos mencionados constituyen una unidad orgánica e indisoluble, y que por tanto existen varios vasos comunicantes entre ellos.

MATEMÁTICAS Y COMPLEJIDAD

Como es sabido, el concepto de ciencias de la complejidad fue originalmente acuñado a raíz de la fundación del Instituto Santa Fe (SFI), en Nuevo México. La pretensión inicial era la de encontrar las leyes fundamentales que subyacían a la complejidad. Se realizó un importante seminario en el que se formuló y posteriormente se evaluó el programa (Cowan, Pines & Meltzer, 1999).² Al cabo del tiempo, el SFI le fue bajando el tono al programa formulado, genéricamente se siguió usando el concepto de ciencias de la complejidad, pero la búsqueda de las leyes fundamentales de la complejidad terminó finalmente siendo opacada por un prudente silencio, dado el fracaso.³

Hasta la fecha, con todo y la estructura e infraestructura de un instituto tan prestigioso, las leyes de la complejidad jamás lograron, ni siquiera en un esbozo general, ser identificadas. La ciencia también avanza a través de fracasos. Personalmente creo que el término de ciencias de la complejidad puede ser efectivamente usado independientemente de la búsqueda de las leyes de la complejidad. Al fin y al cabo, la complejidad es una verdadera revolución científica en sentido kuhniano.⁴

Pues bien, una de las especificidades de la buena ciencia, en general, es el acceso, el conocimiento, el diálogo —como se quiera—, con las matemáticas. Dicho de forma fuerte y directa, es imposible hacer ciencia —esto es, buena ciencia— al margen de las matemáticas; tanto menos en el mundo de hoy, tanto menos en el contexto de la complejidad. Complejidad sin matemáticas es simplemente un *discurso*; en el mejor de los casos, un discurso epistemológico.

2. La voz más directa en la búsqueda de las leyes de la complejidad fue, sin duda, la de Stuart A. Kauffman (1995).

3. La última vez que se habló expresamente, en algún sentido, acerca del programa de búsqueda de las leyes fue en Melanie Mitchell (2009).

4. Que las ciencias de la complejidad son una revolución científica, por ejemplo, en el sentido kuhniano, ha sido un tema que he trabajado en Carlos Maldonado (2009).

Desde otro punto de vista, un autor ha llamado la atención acerca del peligro del “hombre anumérico” (Paulos, 2016). Al hombre anumérico lo manipulan fácilmente con diversas estrategias. La más reciente se llama *fake news*, pero la historia exhibe una batería de otras formas de engaños y manipulación, todas, resultado de un miedo fantasma a las matemáticas (análogamente a como hay dolores fantasma, y miembros fantasma, por ejemplo).

Hay que decir que existen, grosso modo, dos clases de matemáticas: las matemáticas de sistemas continuos y las matemáticas de sistemas discretos. Los componentes o articuladores de las primeras son las funciones, la noción de límite, el cálculo (integral y diferencial), los procesos estocásticos, la teoría de la estabilidad y, en general, todo el análisis. Esto es que, dicho de manera ligera, las matemáticas que se fundan en o dan lugar a fórmulas (mucho más que a ecuaciones). Este tipo de matemáticas corresponde a una filosofía y a una visión bien determinada del mundo y de la realidad, a saber: la creencia de que el tiempo es continuo, el espacio es continuo, la naturaleza y la vida son sistemas continuos; esto es, carentes de rupturas y quiebres (sin soluciones de continuidad).

Sin embargo, a comienzos del siglo XX, pero anticipado por la obra colosal de Gerog Cantor, tiene lugar un giro radical: nacen las matemáticas de sistemas discretos. La circunstancia de su nacimiento fue la aparición de la física cuántica, la cual exigió crear nuevas matemáticas hasta entonces imaginadas. La ciencia clásica asistió, así, a una verdadera revolución. Desde entonces hasta la fecha, *todas* las matemáticas de punta en el mundo de hoy son matemáticas de sistemas discretos.

Los componentes o articuladores de estas matemáticas incluyen a los siguientes aspectos:

- Conjuntos parcialmente ordenados.
- Conjuntos extremos.
- Geometría discreta y combinatoria.
- Teoría discreta de probabilidades.
- Problemas de complejidad combinatoria (complejidad combinatoria).
- Teoría de juegos y teoría de la decisión racional.
- Topología.
- Algunas lógicas no-clásicas.

- Las matemáticas de sistemas computacionales (criptografía, teoría de la complejidad computacional).
- Grafos e hipergrafos.
- Teoría de números.
- Teselados.
- La teoría de la información.

Como se aprecia sin dificultad, una buena comprensión de todo el espectro cultural tecnológico y científico del mundo de hoy es imposible al margen del conocimiento de las matemáticas de sistemas discretos. Pues bien, más radicalmente, las matemáticas de sistemas discretos son las matemáticas de la complejidad (Maldonado, 2019a). Huelga decir que, en general, las matemáticas no son una ciencia sino un *lenguaje*; más exactamente el lenguaje que le permite una alta capacidad de comprensión (compresibilidad; y dicho en términos lógicos: la capacidad de expresividad de un lenguaje) a las ciencias.⁵

Contra el temor fantasma que tienen los seres humanos anuméricos, pero que también produce personas anuméricas, las matemáticas de la complejidad se expresan en grafos, hipergrafos, redes y otras formas y estructuras semejantes. No en última instancia, el modelamiento y la simulación, una de las herramientas específicas de las ciencias de la complejidad, consisten exactamente en *lenguajes*, a saber: lenguajes de programación.

Sobre la base anterior, surge un problema sensible. Se trata de la aleatoriedad. La inmensa mayoría de los demás miembros de la familia de la “complejidad” no saben de aleatoriedad, o lo que dicen es equivocado por pobre. En realidad, el desconocimiento del papel de la aleatoriedad los hace deterministas, sin que ellos lo sepan. La obra de Andréi Kolmogorov resulta aquí imprescindible, si bien, en un plano perfectamente diferente, también se puede hacer referencia a Gregory Chaitin y la Teoría de la Información Algorítmica (TAI, por sus siglas en inglés).

Sin entrar en aspectos técnicos, baste con reconocer que un fenómeno o sistema complejo implica el reconocimiento expreso de la longitud del programa más corto para describirlo o comprenderlo. Así, el tema que emerge es

5. Véase el hermoso volumen de François Guénard y Gilbert Lelièvre (1999), con textos, entre otros, de J.P. Dieudonné, J. Fraïssé, M. Mandelbrot y R. Thom.

el de la complejidad algorítmica, y con ella, y más allá de ella, la hipercomputación biológica; esto es, la comprensión de que los sistemas vivos procesan información de tal manera que los diferencia de la mejor máquina posible imaginada hasta ahora (Maldonado, 2017a, 2018a, Maldonado & Gómez-Cruz, 2010). Como es sabido, la mejor máquina jamás desarrollada hasta la fecha es una Máquina de Turing (MT); con todo y el reconocimiento de que existen diferentes (MT) (determinista, oráculo, indeterminista, etcétera).

Sin más, la complejidad de un fenómeno es directamente proporcional a la aleatoriedad que exhibe o que contiene. De manera puntual, la presencia o no de algoritmos en las formas de vida de los seres humanos y, más ampliamente, de los seres vivos, define exactamente a la hipercomputación biológica. Un campo distintivo de las ciencias de la complejidad.

COMPLEJIDAD Y LÓGICAS NO-CLÁSICAS

La segunda gran especificidad de las ciencias de la complejidad es el conjunto de las lógicas no-clásicas. La primera vez que esta idea fue precisada expresamente fue en Carlos Maldonado (2016).⁶ Sin ambages, la tesis defendida y demostrada es que las lógicas no-clásicas son una de las ciencias de la complejidad.

En la mejor tradición de la mejor episteme, es imposible hacer buena ciencia sin un conocimiento básico de lógica. Ahora bien, las lógicas no-clásicas (LNCs) representan la más radical ruptura epistemológica con respecto a la tradición platónico-aristotélica. La idea de base es que hemos logrado desarrollar un pluralismo lógico, y el pluralismo lógico implica pluralismo de formas de racionalidad, pluralismo en los sistemas de verdad, en fin, un pluralismo de mundos, igualmente.

En efecto, si en el plano de las matemáticas cabe decir legítimamente que existe una infinidad de geometrías y cada geometría describe un mundo propio, análogamente, cada sistema lógico designa un mundo diferente y un sistema diferente de verdad. La más básica de las consecuencias es que, en adelante, deja de existir “la” realidad —la cual en realidad no es sino la

6. Este fue un texto entregado para su publicación en el año 2010, pero el libro tardó varios años en ser publicado. Un desarrollo más orgánico de este texto se encuentra en Carlos Maldonado (2017b).

asunción en lenguaje laico de la idea medieval de que solo existe y solo es posible un solo Dios (con mayúsculas)—, en el marco de las ciencias de la complejidad y gracias a las lógicas no-clásicas, mucho mejor, podemos sostener sin ambages que existen diversas realidades o, lo que es equivalente, diversos modos o grados de realidad. Aquí está justamente la complejidad.

Como es sabido, el rasgo más básico de la complejidad es que dada una multiplicidad cualquiera, si la misma es compleja, entonces es irreducible —matemática, estadística, física, epistemológicamente— a unidades más básicas o simples. Dicho inversamente, allí en donde una multiplicidad es reductible de alguna manera, allí no hay complejidad. De esta suerte, complejidad es antípoda de reduccionismo.

Las lógicas no-clásicas constituyen uno de los capítulos constitutivos del pensamiento *abstracto*. Como es sabido, lo específico del pensamiento abstracto es que permite, y consiste en *pensar*; que otros tipos de pensamientos son aptos para *conocer*. Otros elementos constitutivos del pensamiento abstracto son las matemáticas, la filosofía, la química teórica, la física pura, la música. Las ciencias de la complejidad nacen originariamente de la necesidad de pensar, comprender y explicar fenómenos, sistemas y comportamientos caracterizados, por ejemplo, por inestabilidades, autoorganización, bucles de retroalimentación positivos y negativos, no-linealidad, fluctuaciones y otros rasgos semejantes. La historia del nacimiento y desarrollo de las ciencias de la complejidad ha sido narrada varias veces (*Cfr.* Casti, 1994; Gleick, 1998; Lewin, 1995).

De manera muy significativa, en marcos, contextos o con problemas bien definidos como complejos propiamente dichos⁷ la idea de base en esta sección es que debe ser posible evitar pensar y trabajar con cuantificadores universales; esto es, el tipo de cuantificadores como “todos”, “siempre”, “nunca”, “nadie”... Por el contrario, mucho más difícil, pero inmensamente más significativo, las LNCs enseñan a aprender a pensar y explicar el mundo en términos de cuantificadores particulares; esto es, “algunos”, “algunas veces”, “hay quienes sí y quienes no”, y muchos otros semejantes. Sin ambages, la

7. No todo problema es complejo, y por lo demás no tiene por qué serlo. El estudio de cómo o por qué un problema es complejo es el objeto específico de la teoría de la complejidad computacional. Me he ocupado de la misma en Carlos Maldonado (2013).

gama de cuantificadores particulares es bastante más amplia y rica que la de los cuantificadores universales.

En estrecha relación con la observación anterior, las LNCs permiten distinguir entre enunciados triviales y no-triviales, un asunto de que, desde el punto de vista metodológico, es el más importante y difícil de todos. En ciencia como en la vida, la inmensa mayoría de enunciados son triviales; esto es, son semánticamente vacíos; si se quiere, el predicado no le agrega nada que ya no esté contenido en el sujeto; en fin, se trata de enunciados tautológicos, en el sentido exacto de la crítica del Teorema de Gödel, inmediatamente al programa de Hilbert, y más allá de David Hilbert, a toda la racionalidad occidental desde siempre. Por lo demás, a algo semejante es a lo que una versión de Humberto Maturana denomina “lenguajear”, es decir, hablar por hablar, establecer simple y llanamente contacto con el canal. En este punto precisamente se fundan las críticas más fuertes a la banalidad de las redes sociales (Lanier, 2015).

Contra el rigor estricto y muchas veces cerrado, o bien, en contra de una laxitud que coincide con la imprecisión de la lógica formal clásica, las LNCs tienen el mérito de ampliar de manera muy significativa los umbrales del pensamiento y del lenguaje, lo cual permite, de manera más que idónea, ver, comprender y trabajar con la complejidad; complejidad que, como es sabido, consiste en características tales como pluralidad, diversidad, irreductibilidad, emergencia, no-linealidad, fluctuaciones, interacción no-lineal entre diversos agentes, y otros rasgos semejantes.

Digámoslo de manera fuerte y directa: la complejidad *avant la lettre* puede haber existido, como es efectivamente el caso; sin embargo, estrictamente hablando, con las ciencias de la complejidad se trata del tipo de ciencia —dicho de manera general— que corresponde a un mundo alta y crecientemente entrelazado y con múltiples conexiones e interdependencias, inmediatas y de mediano y largo alcance, en el que hemos aprendido a pensar inmensamente mejor que de forma simplemente sistémica o sistemática. En una palabra, un mundo diferente de suma cero.

Vivimos un mundo con múltiples centros, con desplazamientos en la geografía y en la historia, con permanentes procesos de re-escritura y re-interpretación del pasado —en el que el pasado cesa, por tanto, de ser algo ya sucedido e inmóvil—, un mundo en el que la temporalidad misma deja de

ser algo estático o unívoco, y en el que acaecen y coexisten niveles distintos de veracidad, de realidad, de experiencia.

Pues bien, en un mundo semejante, la lógica formal clásica (LFC) no es de ayuda en modo alguno, y se hace necesario el tránsito hacia las LNCs. Dicho de manera breve y directa, es imposible pensar bien si no se piensa de manera lógica, solo que pensar de forma lógica no es ya en absoluto a la manera de la LFC; mucho mejor, emerge ese continente, si cabe, de las LNCs, un tema que socio culturalmente o en términos educativos, sin embargo, permanece alejado de la gente. Como tendré la oportunidad de decirlo inmediatamente, pensar bien es pensar en todas las posibilidades.

De manera fundamental, la lógica —dicho en general— deja de ser tanto un órgano como una canónica que era lo que sucedía en los marcos de la LFC. Cesa de existir una canónica del lenguaje, una canónica del pensamiento, en fin, consiguientemente, una canónica en la forma de vivir. Desde las LNCs, existe un puente comunicante, por así decirlo, con la idea más importante de aquello en lo que consisten las ciencias de la complejidad, a saber: en estudiar los grados de libertad de un sistema, o bien, igualmente, en incrementar los grados de libertad de un sistema determinado.

Esta observación permite una distinción clave. La inmensa mayoría de los miembros de la familia de complejidad entienden, sin ninguna dificultad, que la complejidad es un pensamiento relacional —algunos dirían: un pensamiento nodal; hay incluso a quienes se les llena la boca hablando de “*religare*”—; en este sentido, repiten, casi como mantra, que el todo es mayor que la suma de las partes, una idea proveniente de Aristóteles, lo más opuesto en cualquier sentido a la complejidad.⁸ Desde el punto de vista estadístico, la comprensión de la complejidad como algo sistémico es la más popular (al respecto bien valdría la pena recordar el talante independiente de alguien como Richard Feynman, una de las bases indirectas de las ciencias de la complejidad).

Frente a la identificación o asociación entre complejidad y enfoques sistémicos mencionada, existe otra comprensión muy diferente, que es específica de las ciencias de la complejidad en sentido estricto. Se trata de la compren-

8. Aristóteles es y significa análisis, reduccionismo, determinismo y un fuerte antropocentrismo.

sión de la complejidad en términos directamente proporcionales a los grados de libertad —del sistema, fenómeno o comportamiento considerado.

En este sentido, el trabajo en complejidad se enfoca en inflexiones, rupturas, quiebres, discontinuidades, y es exactamente en este sentido que las ciencias de la complejidad saben de evolución (Gould, 2010). Dicho de manera técnica, el interés, antes que en los aspectos sistémicos y relacionales, se encuentra en las transiciones de fase: transiciones de fase de primer orden y, particularmente, transiciones de fase segundo orden. Esta idea empata fuertemente con lo que se dirá en la sección siguiente de este texto. Una transición de fase es sencillamente el concepto empleado para designar o bien un cambio cualitativo en un fenómeno, o bien un cambio radical en la historia de un fenómeno, respectivamente. Pues bien, las transiciones de fase son procesos mediante los cuales los fenómenos o sistemas ganan en grados de libertad.

En cualquier caso, debe ser claro que una especificidad de las ciencias de la complejidad es el conocimiento y trabajo con las LNCs, y que estas apuntan directa e inmediatamente a la idea de grados de libertad, y, por consiguiente, a la vida misma: la vida no es, en absoluto, un asunto de control, en cualquier acepción de la palabra sino de grados crecientes de libertad. Una idea radical como pocas.

COMPLEJIDAD Y POSIBILIDADES

Quizás el rasgo más determinante de las especificidades de las ciencias de la complejidad, en marcado contraste tanto con la ciencia normal (Thomas Kuhn), como con los restantes miembros de la familia de “complejidad”, es el hecho de que los complejólogos no trabajan tanto sobre lo real; esto es, lo que existe, lo que sucede, lo que está allí afuera, por ejemplo; mucho mejor y más exactamente, el trabajo en ciencias de la complejidad consiste en el trabajo con las posibilidades.

A fin de entender esta idea, es preciso recordar uno de los relatos acerca de los orígenes de las ciencias de la complejidad. Dicho brevemente, de acuerdo con Heinz R. Pagels (1991), las ciencias de la complejidad son el resultado de la aparición, sociológica y culturalmente hablando, del computador y de las ciencias de la computación, y contribuyen a su vez, activamente, a su desarrollo. El computador y la computación son instrumentos

culturales —son una “herramienta conceptual”, estrictamente hablando: esto es, como es sabido, el computador tiene sintaxis, semántica, tiene memoria, aprende, toma decisiones, y cuando sale de su “carcaza” se convierte en robot y actúa “libremente” por el mundo— que han venido a hacer a la ciencia, la información, la sociedad y el conocimiento mejores y más posibles.

El modelamiento y la simulación no son otra cosa que la instrumentación de experimentos mentales; esto es, el juego con la imaginación y la fantasía (Maldonado & Gómez-Cruz, 2010), de pompas de intuición y de una buena formulación de problemas gracias al trabajo con lenguajes de programación (Wolfram, 2002). La atmósfera, si cabe la metáfora, es precisamente el trabajo con matemáticas. Al fin y al cabo, es posible señalar dos orígenes claros de este enfoque e interés: de un lado, se trata de los trabajos de David Hilbert que se concentran justamente en los espacios de Hilbert —designados habitualmente como H —, y de otra parte, igualmente, se trata del trabajo con espacios de fase (Gray, 2005; Odifreddi, 2006). Los espacios de fase tanto como los espacios de Hilbert no pertenecen al espacio o a la geometría euclidiana. Por el contrario, se trata de espacios de más amplias dimensiones a los cuales se accede, básicamente, mediante la imaginación.

De esta suerte, lo real es comprendido tan solo como un elemento o un subconjunto de un conjunto inmensamente mayor que lo comprende y lo hace posible: el espacio de las posibilidades. Si el fenómeno de máxima complejidad conocida —la vida, o la naturaleza, tiene sentido, es precisamente en virtud de las posibilidades que contiene, que forma o que anticipa, en cualquier caso. Nada tiene mayor interés para la vida, o los sistemas vivos, que las posibilidades imaginables.

Esta idea tiene una consecuencia importante. Cabe distinguir entre ciencias probabilísticas y ciencias posibilísticas. Incluso con el reconocimiento acerca de la distinción entre la teoría clásica de probabilidades —por ejemplo, la teoría bayesiana— y la teoría discreta de probabilidades —propia de las matemáticas de sistemas discretos—. Pues bien, dicho lo anterior, hay que decir que, en este sentido, las ciencias de la complejidad son ciencias posibilísticas (o de posibilidades). Una idea que, por lo demás, no ha sido expresamente expuesta en la bibliografía especializada en el tema.

Los espacios de Hilbert y los espacios de fase pueden resumirse ulteriormente como el interés por transiciones de fase. Precisamente por ello, dicho de manera genérica, en complejidad se habla de dinámicas, de procesos, de

evolución. La realidad es tan solo un momento, una fase o un componente de una dimensión inmensamente más amplia que, por así decirlo, se bifurca como lo posible y lo imposible. Al fin y al cabo, en el mundo real no es que todas las posibilidades pueden llevarse a cabo; es que cualquier posibilidad puede cumplirse. Esta, como se aprecia, es una exigencia al mismo tiempo ética e intelectual: debe ser posible anticiparse a las posibilidades porque, al cabo, alguna posibilidad podría ser nociva, perjudicial o implicar un punto de no retorno. Exactamente en este sentido, en las ciencias de la complejidad, trabajamos con, y distinguimos, tres umbrales: el umbral de criticalidad, el de subcriticalidad y el de supracriticalidad. El eje del trabajo, simple y sencillamente, consiste en el trabajo con puntos críticos y estados críticos.

Un estado crítico o un punto crítico es el momento en el que se produce un cambio cualitativo en un fenómeno; en otras palabras, es cuando un fenómeno determinado se encuentra, literalmente, en el filo del caos, a partir del cual se produce una inflexión en su historia y el fenómeno deja de ser o de encontrarse en el estado en el que se encontraba anteriormente. Como se comprende, por numerosas razones o motivaciones, debe ser un imperativo estudiar y comprender dicho punto crítico o estado crítico *antes* de que acontezca. Es una exigencia tanto ética como intelectual. El interés por lo real se desplaza hacia y se nutre, a su vez, por el de lo posible.

Pues bien, existe, por lo menos, una triple forma de estudiar y comprender los estados críticos. Se trata de las matemáticas —específicamente los sistemas $2n^k$, el modelamiento y simulación, y el trabajo con algunas lógicas no-clásicas—. Pues bien, en la base de este triple camino se encuentra la importancia de los experimentos mentales, las pompas de intuición, en fin, la fantasía. Cabe aquí una observación puntual con respecto al modelamiento y la simulación: siempre es indispensable (= ideseable!) resolver primero el problema, y luego sí, escribir el código. Es así como, dicho grosso modo, se hace buena ciencia.

Una derivación importante en el estudio de los fenómenos en estado o en punto crítico es el tema de la criticalidad auto-organizada, descubierta originariamente por Per Bak (1996). El núcleo de este tema es el reconocimiento expreso de que todo fenómeno de criticalidad autoorganizada:

- Implica un distanciamiento radical con respecto al principio de causalidad.

- Exhibe o se funda siempre en una ley de potencia.
- Consiguientemente, es una forma de autoorganización.

Esta última observación pone de manifiesto un problema conceptual, categorial y científico importante: en las ciencias de la complejidad, el tema de base es el de la autoorganización y, por consiguiente, es preciso distinguir a esta, de manera bien precisa, de la idea de autopoiesis. De manera genérica, los demás miembros de la familia de “complejidad” confunden autopoiesis y autoorganización y los tratan como equivalentes. Un error craso.

Esta sección puede ser terminada con una observación puntual. Como se aprecia sin dificultad, el concepto de grados de libertad coincide o empatía —como se prefiera—, con el interés y el foco en posibilidades —e imposibilidades— y no ya única y principalmente por lo real, en cualquier acepción de la palabra. La idea misma de realidad tiene tras de sí un muy delicado supuesto de orden teológico o religioso (*Cfr.* LeShan & Margenau, 1996).

Si las ciencias de la complejidad son una auténtica revolución científica —por ejemplo, en el sentido kuhniano de la palabra—, entonces debe ser posible mostrar sus especificidades, los contrastes y rupturas con la ciencia normal, esto es, con lo que se ha denominado como el paradigma clásico —cuyo epítome es sin duda la mecánica clásica—. Ahora bien, si esta idea tiene sentido, entonces el llamado o la invitación a elaborar y trabajar con criterios de demarcación no es para nada baladí. Ello a pesar de que parece haber miembros de otros integrantes de la familia de “complejidad” que reaccionan con recelo o algo semejante.

Existe un muy fuerte vaso comunicante entre la ciencia clásica y la ciencia de sistemas, a saber: el interés por el control; esto es, por los mecanismos de control existentes o subyacentes a los comportamientos humanos y otros. En la sombra, este mismo rasgo puede ser extendido, sin ninguna objeción, a otros miembros de esa familia que, acaso de manera ecléctica, presenta Brian Castellani en su mapa de la “complejidad”.

A veces, las familias necesitan establecer distinciones entre integrantes suyos, y entre ramas y sub-ramas de la misma familia. Como muchas veces sucede en la vida real, muchos quieren asimilarse sin más al más prestigioso o destacado de los miembros de la familia, y se reclaman del mismo como de sus propios logros.

PENSAR LA COMPLEJIDAD ES PENSAR LO IMPOSIBLE Y TRABAJAR CON ÉL

Dicho lo anterior, no obstante, hay una especificidad que es aún más radical. Se trata del hecho de que, bien entendidas, las ciencias de la complejidad no se limitan únicamente al estudio de posibilidades. Mejor aún, se trata del reconocimiento expreso de que, además, y acaso principalmente, pensar en complejidad es pensar en imposibilidades. La puerta que permite el acceso a este argumento es la cohomología, un campo particular, especializado, anexo a la topología.⁹

Sin embargo, antes es preciso hacer una observación de orden histórico y cultural a fin de entender lo que sigue a continuación. Toda la antigüedad, la Edad Media y hasta el Renacimiento se caracterizan porque estuvieron volcados hacia el pasado. Ya sea en la forma de añoranza, de búsqueda o de ejemplos. La modernidad y, en general, toda la ciencia normal se define, por el contrario, por un marcado interés por lo real; esto es, lo que hay, lo que sucede, lo que acaece, lo que está allí afuera. Justamente por ello esa forma de hablar: “la realidad”.

En contraste, hace relativamente muy poco tiempo, la ciencia, la cultura y la historia en general se vienen volcando hacia lo posible, incluso lo probable, lo que hay adelante, lo que puede acontecer mañana o pasado mañana. Pues bien, aún mucho más recientemente, existe también un interés y preocupación por lo imposible mismo. Es exactamente en este marco que emergen las ciencias de la complejidad y se desarrollan de la forma como lo han hecho hasta la fecha.

Algunos ejemplos notables de un interés científico y cultural por lo imposible puede apreciarse en la geometría de politopos desarrollada inicialmente por Donald Coxeter, la obra de Maurits Cornelis Escher, buena parte de la obra de René Magritte, el estudio de teselados y la cohomología, ya mencionada, en fin, el descubrimiento de los cisnes negros (Taleb, 2008). Nassim Taleb, uno de los autores que ha llegado a ser incorporado como parte del *corpus* de las ciencias de la complejidad, lo destaca bien en el subtítulo de su

9. Uno de los padres más importantes en los estudios sobre cohomología es Roger Penrose. Entre sus muchos libros quisiera destacar Penrose, 2010.

libro *El cisne negro (El impacto de lo altamente improbable)*. Digamos, incluso a título editorial, que son las cosas que podemos saber, las que no podemos hacer y las que no podemos ver, en fin, es eso que no podemos ser jamás, lo que define al universo y a la existencia misma de manera mucho más aguda y precisa que aquellas cosas que sí podemos y conocemos. La complejidad emerge con vistas a lo posible y, mucho más radicalmente, la complejidad consiste en lo imposible mismo.¹⁰

En efecto, es posible indicar, por lo menos, tres puertas básicas de acceso a la idea de imposibilidad. La primera es el llamado principio de incertidumbre de Werner Heisenberg, el cual afirma que es imposible conocer o determinar al mismo tiempo el lugar y la dirección de una partícula. O se sabe una o se sabe la otra, pero es imposible establecer ambas al mismo tiempo. Una traducción del principio de incertidumbre de Heisenberg en el corpus de la complejidad es la que hace Ilya Prigogine (1997) en el sentido expreso de que el futuro no está dado de una vez y para siempre, y ciertamente jamás de antemano.

La segunda puerta de acceso a la imposibilidad como un asunto propio de las ciencias de la complejidad es la teoría del caos. De acuerdo con los descubrimientos de Edward Lorenz, es imposible predecir el futuro, y ciertamente tanto más a mediano y a largo plazo. En el mejor de los casos, una buena predicción es a corto plazo y cuando más a corto plazo, tanto mejor. Pequeños errores iniciales tienen consecuencias totalmente impredecibles. La razón de base es que permanentemente tienen lugar *amplificaciones* en los comportamientos de los fenómenos, y son estas mismas amplificaciones las que dan a lugar, sin más, a la mariposa de Lorenz.

La complejidad del mundo tiene lugar debido a la existencia de atractores extraños, un concepto originariamente introducido por David Ruelle (1995) (Cabe recordar que es justamente Ruelle quien asimila y plantea subsiguientemente la correlación entre azar y caos).

La tercera puerta a la imposibilidad es el teorema de imposibilidad de Kurt Gödel. De acuerdo con el matemático austriaco, es imposible que un conjunto de enunciados, o un sistema formal, sea al mismo tiempo

10. Sin la menor duda, el título más agudo de este tema es el azar o la aleatoriedad, que es, psicológica, emocional y cognitivamente, el más difícil problema para los seres humanos. Actualmente, me encuentro trabajando en un texto al respecto, naturalmente, como el núcleo mitocondrial mismo de la complejidad.

consistente y completo. O bien es consistente y entonces es incompleto, o bien es inconsistente y entonces es tautológico, y por tanto es completo. El cisma que representó el teorema de Gödel es algo que no ha sido plenamente estudiado o comprendido por parte de la mayoría de los miembros de la familia “complejidad”, y ha sido asumido simplemente como un dato histórico, en el mejor de los casos.

Los ejemplos podrían ampliarse sin dificultad a otros campos y casos. Así, por ejemplo, la formulación de la teoría de la relatividad por parte de Albert Einstein significa, en este contexto, exactamente que es imposible que cualquier cuerpo supere la velocidad de la luz, de lo contrario, no es posible organizar y discriminar información alguna. Si, como sostenía Einstein, el mayor misterio del universo es que sea comprensible y explicable, ello se debe justamente a que la velocidad de un cuerpo cualquiera es imposible que supere la velocidad de la luz; así, la información en general, adquiere sentido y significación.

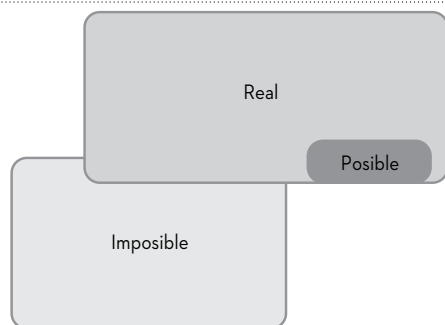
De manera general, cabe decir que es perfectamente posible explorar y explicar al mundo y a la naturaleza en un contexto definido por eventos imposibles. Mucho mejor aún, la imposibilidad emerge como un pre-requisito para comprender la complejidad misma de la naturaleza, el mundo y la sociedad. Este es acaso el rasgo más elegante, sutil o refinado de las ciencias de complejidad y de lo mejor de la investigación científica en el mundo al día de hoy.

Como quiera que sea, una especificidad de las ciencias de la complejidad se resume en el esquema de la figura 9.1.

De esta suerte, queda en claro que el interés principal en complejidad es el trabajo con posibilidades antes que y por encima de cualquier (sano) interés por la realidad, en cualquier acepción de la palabra. Y, más radicalmente, incluso por lo imposible antes que, y por encima de lo real.

De manera significativa, hay cosas que sabemos que no podemos saber o conocer, y hay también cosas que no sabemos que no sabemos. El título genérico para este conjunto de cosas y la actitud que implica es el de cisnes negros, un concepto, un problema, un abordaje específico de las ciencias de la complejidad (Taleb, 2008). De suerte que, como hemos mencionado, desde el punto de vista histórico, y por tanto, heurístico, la mirada se vuelca del pasado hacia el presente, y del presente hacia lo posible, desde donde, inmediatamente también, aflora lo imposible. Dicho en el lenguaje de la metodología

FIGURA 9.1 RELACIONES ENTRE LO REAL, LO POSIBLE Y LO IMPOSIBLE EN LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD



de investigación científica y de la filosofía de la ciencia, las ciencias de la complejidad constituyen ese espectro gracias al cual las descripciones y comprensiones del mundo y la naturaleza conducen inevitablemente a teorías y explicaciones que saben predecir lo que no pueden predecir. Es exactamente lo que acontece con la teoría del caos, se proyecta a la termodinámica del no-equilibrio y define, si cabe, a las lógicas no-clásicas, al modelamiento y a la simulación y a la ciencia de redes complejas, por ejemplo.

Es sencillo, si los sistemas complejos son abiertos, la condición para verlos, explicarlos y comprenderlos es tener una estructura de mente abierta. Pues bien, exactamente en este sentido, lo imposible emerge como aquellos sistemas, fenómenos y comportamientos que retan a la tradición, acostumbrada a la predicción, al control, a las preocupaciones por lo real, por ejemplo.¹¹ No en otra cosa consiste la idea genérica de correr las fronteras del conocimiento, que es lo que define a la buena investigación de punta.

Una manera como en ocasiones se ha comprendido a las ciencias de la complejidad es que se trata del conjunto de ciencias, por tanto, de disciplinas y demás, ocupadas con las preguntas filosóficas que la ciencia tradicional no pudo formular y mucho menos resolver. Y sí: en las ciencias de la complejidad las fronteras entre ciencia y filosofía desaparecen absolutamente. Un buen científico de la complejidad es tanto como decir un estupendo filósofo

11. Cfr. Uno de los padres de las ciencias de la complejidad, René Thom (1993).

—que se ocupa con fenómenos, sistemas y comportamientos de complejidad creciente.

Es posible traducir todo lo anterior de una dúplice manera, así: la buena ciencia de punta ya no se preocupa, en absoluto, por las causas. Grosso modo, las causas están ya todas conocidas e identificadas. Mucho mejor, la buena ciencia de punta se preocupa por los efectos, esto es, por las consecuencias —lo que se sigue y puede seguirse de lo que acontece y en las formas de sus dinámicas—.

Asimismo, de otra parte, el vector, si cabe la metáfora, de la buena investigación científica y filosófica de punta consiste en explorar todos los caminos imaginables futuros de lo que precede y de lo que ahora está aconteciendo. De lo contrario, pueden acontecer comportamientos extraños, indeseables, negativos. Dicho sin más, la ciencia hoy se ocupa de la exploración de los futuros —en toda la gama y en toda la acepción de la palabra—. Al fin y al cabo, hoy disponemos, mucho más y mejor que nunca, de un impresionante y creciente arsenal de información: enormes bases de datos gracias a las cuales se trabaja no ya simplemente en términos de minería de datos sino, mucho mejor, de modelamiento y simulación de dichos datos.

Hoy por hoy es imposible hacer buena ciencia sin la ciencia de grandes bases de datos, la cual por lo demás, no tiene absolutamente nada que ver con las ciencias de la complejidad, pero sin la cual las propias ciencias de la complejidad no avanzan. Basta con una mirada desprevenida a los mejores centros, institutos de complejidad alrededor del mundo, a las mejores revistas sobre las ciencias de la complejidad, y demás. Es fácil: es imposible hacer buena ciencia sin un polo a tierra: ese polo a tierra son los datos a partir de los cuales se hace investigación. Esto, contra todas las apariencias y el nerviosismo de algunos, no tiene absolutamente nada que ver con el positivismo.

Una vez más, el trabajo con la ciencia de grandes bases de datos (*big data science*) pasa por y se funda en el aprendizaje de lenguajes de programación; habitualmente, en el estado actual de cosas, *R* y *Python*. Recabemos en esto: los demás miembros de la familia de “complejidad” no tienen absolutamente ningún trabajo en esta dirección. Mala ciencia, mala reflexión, por decir lo menos.

CONCLUSIONES

Dicho de manera genérica, la complejidad son dos cosas: un muy robusto aparato epistemológico y unas herramientas muy sofisticadas. El aparato consiste en un conjunto de ciencias —exactamente, las ciencias de la complejidad— las cuales incluyen a su vez una diversidad de disciplinas, de métodos, de metodologías, de aproximaciones y de lenguajes. Por su parte, las herramientas sofisticadas hacen referencia, además de las mencionadas en este texto, a las metaheurísticas (Maldonado, 2018b), y al modelamiento y simulación. Hoy por hoy, la buena investigación pasa por el modelamiento y la simulación, y en consecuencia, el aprendizaje de lenguajes de programación se hace imprescindible.

En este texto he trabajado las especificidades de las ciencias de la complejidad. Reitero expresamente que mi afán no es ni de oposición ni de jerarquización con los miembros de eso que se llama de forma muy ambigua la familia de “complejidad” (Cfr. Castellani, 2008, para una *ilustración*) sin importar exactamente de a qué se refiera la expresión. Estoy convencido que los problemas del mundo, hoy y hacia el futuro, solo se pueden comprender y resolver con base en mucha y muy buena información, en mucha y muy buena educación, en mucha y muy buena ciencia e investigación. Más y mejor. Por tanto, como se aprecia, sin dificultad, sin ser exhaustivos, el panorama de las especificidades de las ciencias de la complejidad constituye una amable invitación a la educación, el trabajo y la reflexión de la mano de estas “baterías de herramientas” que son las ciencias de la complejidad.

Tampoco pretendo decir que las ciencias de la complejidad constituyen lo mejor de la investigación de punta hoy (*spearhead science*). Hay otros grupos de ciencias definitivamente vitales para lo mejor de la reflexión y las explicaciones de punta actuales. Lo que sí es posible afirmar, sin embargo, es que la buena investigación de punta *pasa* —y *pasa* necesariamente— por las ciencias de la complejidad.

De manera genérica, las matemáticas no son otra cosa que el estudio de patrones posibles y de relaciones. En la base de la buena ciencia, se encuentran las matemáticas —en nuestro caso, y muy significativamente, las matemáticas de sistemas discretos—. Las ciencias de la complejidad están alimentadas también de matemáticas, y de mucha y buena lógica, solo que se trata de las lógicas no-clásicas; por decir lo menos.

Las ciencias de la complejidad también son ciencias formales en el sentido preciso de que son ciencias cuyo rigor no se negocia y no se compromete, a saber: el rigor sintáctico, el rigor semántico, el rigor metodológico, el rigor conceptual, en fin, el rigor lógico y científico o filosófico. El más drástico y radical de todos los criterios de demarcación es el rigor. Al fin y al cabo, de buena ciencia depende, parcialmente también, el decurso de la buena vida; de una buena vida.

Una observación final. La mejor teoría jamás desarrollada para comprender lo que es el mundo, la realidad física, el universo o la naturaleza, es la teoría cuántica. Pues bien, en la base de las ciencias de la complejidad, si cabe la expresión, como de hecho en la base de toda la ciencia de punta en general, se encuentra la teoría cuántica (no únicamente la física cuántica). Me he ocupado de las relaciones entre complejidad y teoría cuántica en otros lugares (*Cfr.* Maldonado, 2017b). *Ditto*: por razones de espacio, el tema de estas relaciones debe quedar aquí de lado.

Sociológica o culturalmente, hay otros miembros de la familia de “complejidad” que son bastante más populares —si ello es importante— que las ciencias de la complejidad en América Latina. Por ejemplo, los enfoques sistémicos, el pensamiento complejo y la cibernética. Ello se debe a una muy deficiente formación científica por parte de los estudiosos de la complejidad en general. Por ello, sus enfoques son preferencialmente epistemológicos y cualitativos. Pues bien, antes que una especificidad hay aquí una debilidad de parte de ellos, y por vía de contraste, una fortaleza del lado de las ciencias de la complejidad.

Debemos poder pensar lo posible del mundo y de la vida; pero también, los caminos imposibles que emergen o pueden surgir. Esta es una exigencia al mismo tiempo ética e intelectual.

REFERENCIAS

- Bak, P. (1996). *How nature works. The science of self-organized criticality*. Nueva York: Copernicus.
- Barrow, J.D. (1998). *Impossibility. The limits of science and the science of limits*. Oxford: Oxford University Press.
- Castellani, B. (2018). *Sociology and complexity science blog*. Recuperado el 13 de septiembre 2020, de <http://sacswebsite.blogspot.com>

- Casti, J.L. (1994). *Complexification. Explaining a paradoxical world through the science of surprise*. Nueva York: Harper Perennial.
- Cowan, G., Pines, D. & Meltzer, D. (1999). *Complexity. Metaphors, models, and reality*. Cambridge, MA: Perseus Books.
- Gleick, J. (1998). *Caos. La creación de una ciencia*. Barcelona: Seix Barral.
- Gould, S.J. (2010). *Ontogenia y filogenia. La ley fundamental biogenética*. Barcelona: Crítica.
- Gray, J.J. (2005). *El reto de Hilbert. Los 23 problemas que desafiaron a la matemática*. Barcelona: Crítica.
- Guénard, G. & Lelièvre, G. (1999). *Pensar la matemática*. Barcelona: Tusquets.
- Kauffman, S. (1995). *At Home in the universe. The search for the laws of self-organization and complexity*. Oxford: Oxford University Press.
- Lanier, J. (2015). *Contra el rebaño digital*. Madrid: Debate.
- LeShan, L. & Margenau, H. (1996). *El espacio de Einstein y el cielo de Van Gogh*. Barcelona: Gedisa.
- Lewin, R. (1995). *Complejidad. El caos como generador del orden*. Barcelona: Tusquets.
- Maldonado, C. (2009). *Complejidad: revolución científica y teoría*. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.
- Maldonado, C. (2013). Un problema fundamental en la investigación: Los problemas P vs. NP. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 4(2), 10–20.
- Maldonado, C. (2016). Pensar la complejidad con ayuda de las lógicas no-clásicas. En *La emergencia de los enfoques de complejidad en América Latina* (1ra ed., pp. 83–98). Buenos Aires: Comunidad Editora Latinoamericana.
- Maldonado, C. (2017a). Hipercomputación biológica y comunicación entre los seres vivos. En L.C. Arboleda (Ed.), *Un Festschrift para José Luis Villaveces* (pp. 109–124). Bogotá: Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Maldonado, C. (2017b). Matching the unmatchable. Complexity theory and quantum theory. *Neuroquantology*, 15(3), 125–129. Recuperado el 13 de septiembre de doi:10.14704/nq.2017.15.3.1046
- Maldonado, C. (2017c). *Pensar. Lógicas no-clásicas*. Bogotá: Ed. Universidad del Bosque.
- Maldonado, C. (2018a). Biological hypercomputation and degrees of freedom. En R. López Ruíz (Ed.), *Complexity in biological and physical systems – bifurcations, solitons and fractals* (pp. 83–93). Londres: IntechOpen.

- Maldonado, C. (2018b). Metaheurísticas de investigación en complejidad. En G.V.-Cuartas, M.L. Eschenhaguen, C.E. Maldonado & G. Guerrero Pino, *Construcción de problemas de investigación: diálogo entre el interior y el exterior* (pp. 210-239). Medellín: Universidad de Antioquia-UPB.
- Maldonado, C. (2019a). Las matemáticas de la complejidad son matemáticas de sistemas discretos. En M. Montealegre (Comp.), *Matemáticas y complejidad*. Neiva: Ed. Surcolombiana.
- Maldonado (2019b). Las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida. En M. Villegas, L. Caballero, E. Vizcaya (Eds.), *Biocomplejidad: facetas y tendencias* (259-277). Morelos, CDMX: Copit-arXives.
- Maldonado, C. & Gómez-Cruz, N. (2010). *Modelamiento y simulación de sistemas complejos* (vol.66). Bogotá: Facultad de Administración / Centro de Estudios Empresariales para la Perdurabilidad Editorial Universidad del Rosario.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: a guided tour*. Oxford: Oxford University Press.
- Odifreddi, P. (2006). *The mathematical century. The 30 greatest problems of the last 100 years. With a foreword by F. Dyson*. Princeton / Oxford: Princeton University Press.
- Pagels, H.R. (1991). *Los sueños de la razón: el ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa.
- Paulos, J.A. (2016). *El hombre anumérico: el analfabetismo matemático y sus consecuencias*. Barcelona: Tusquets.
- Penrose, R. (2010). *Cycles of time: an extraordinary new view of the universe*. Nueva York: Vintage Books.
- Prigogine, I. (1997). *El fin de las certidumbres*. Barcelona: Andrés Bello.
- Ruelle, D. (1995). *Azar y caos*. Madrid: Alianza Editorial.
- Stadler, F. (2011). *El Círculo de Viena: Empirismo lógico, ciencia, cultura y política*. México: Fondo de Cultura Económica-UNAM.
- Taleb, N.N. (2008). *El cisne negro. El impacto de lo altamente improbable*. Barcelona: Paidós.
- Thom, R. (1993). *Estabilidad estructural y morfogénesis. Ensayo de una teoría general de procesos*. Barcelona: Gedisa.
- Thom, R. & Noël, E. (1999). *Prédire n'est pas expliquer*. Paris: Champs Sciences.
- Waldrop, M.M. (1992). *Complexity. The emerging science at the edge of order and chaos*. Nueva York: A Touchstone Book.
- Wolfram, S. (2002). *A new kind of science*. Champaign, Il.: Wolfram Media.