

Capítulo 4

Ciencias de punta y tecnologías disruptivas en el ciberespacio y como marco y condición para la ciberdefensa de Colombia*

DOI: <https://doi.org/10.25062/9786287602700.04>

Carlos Eduardo Maldonado

Universidad el Bosque

Resumen: Este capítulo problematiza la importancia de las ciencias de la complejidad, sus ejes, temas y problemas en el marco de la digitalización del mundo y de la sociedad y, en consecuencia, respecto de la seguridad y defensa nacional; sostiene que las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida que se ocupan exactamente de todo aquello de lo cual la ciencia normal se desentiende; señala que existe, asimismo, una tensión esencial entre ciencia y tecnologías, a saber, la ciencia tradicionalmente comporta un principio de democracia, mientras que, por su parte, la historia de la tecnología fue siempre la de tecnologías *prima facie* militar, y concluye que las ciencias de la complejidad permiten superar o resolver esta tensión.

Palabras clave: ciencias de la complejidad; computación; digitalización; vida.

* Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación "Tecnologías disruptivas, logística, seguridad y defensa nacional en el ciberespacio", del grupo de investigación "Ciberespacio Tecnología e Innovación", de la Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto", categorizado C por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias) y registrado con el código COL0181179. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no necesariamente reflejan los de las instituciones participantes.

Carlos Eduardo Maldonado

Posdoctorado Visiting Scholar, Universidad de Pittsburgh, Estados Unidos. Posdoctorado Visiting Research Professor, Catholic University of America, Estados Unidos. Academic Visitor, Facultad de Filosofía, Universidad de Cambridge, Inglaterra. Doctor en Filosofía, K. U. Leuven, Bélgica. Profesor titular, Universidad El Bosque, Colombia. Profesor titular, Universidad del Rosario.

<https://orcid.org/0000-0002-9262-8879> - Contacto: maldonadocarlos@unbosque.edu.co

Citación APA: Maldonado, C. E. (2024). Ciencias de punta y tecnologías disruptivas en el ciberespacio como marco y condición para la ciberdefensa de Colombia. En M. E. Realpe Díaz, & A. M. González González (Eds.), *Tecnologías disruptivas, logística y seguridad y defensa nacional en el ciberespacio* (pp. 111-142). Sello Editorial ESDEG. <https://doi.org/10.25062/9786287602700.04>

TECNOLOGÍAS DISRUPTIVAS, LOGÍSTICA Y SEGURIDAD Y DEFENSA NACIONAL EN EL CIBERESPACIO

ISBN impreso: 978-628-7602-69-4

ISBN digital: 978-628-7602-70-0

DOI: <https://doi.org/10.25062/9786287602700>

Colección Ciberseguridad y Ciberdefensa

Sello Editorial ESDEG

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"

Bogotá D.C., Colombia

2024



Introducción

Toda la historia de la tecnología es la historia de tecnología *prima facie* militar, esto es, para efectos de defensa, protección, control, ataque, seguridad. La historia de la tecnología es la historia de tecnología militar, belicista o guerrerista; para el caso, da igual. Desde la invención del fuego, pasando por la rueda, la aguja de tejer o hilar, el hacha, hasta hace poco. Con una notable excepción: el nacimiento de internet. Si bien diversos intentos de orígenes de internet tenían una intención militar —es toda la historia de Arpa, primero, en 1958; luego la historia en torno a Arpanet, en 1969—, internet nace como un asunto eminentemente civil y para beneficio de la humanidad, gracias al CERN —el Centro Europeo de Investigación Nuclear—, en 1989. Este hecho marca una inflexión singular en toda la historia de la tecnología.

Diversos Estados, fuerzas y corporaciones han intentado controlar internet, con distintas motivaciones y justificaciones. Es sencillamente imposible. Si bien, la inmensa mayoría de la sociedad permanece aún ignorante acerca de estos procesos, intentos y políticas, así como de un uso inteligente de internet. Quizás la mejor expresión de intento de control sobre internet sea la red Eschelon (Maldonado, 2019a). El control o la imposibilidad de control sobre internet forma parte, sin la menor duda, de una de las más álgidas aristas de la complejidad, del mundo y del conocimiento. ¿Complejidad del mundo y del conocimiento? La pregunta remite inmediatamente a las ciencias de la complejidad.

Este capítulo presenta y discute las articulaciones más importantes de las ciencias de la complejidad; genéricamente llamadas también *ciencias de punta*; en marcado contraste con la ciencia normal, hegemónica o clásica; tres maneras diferentes de apuntar en una sola y misma dirección. El “paradigma dominante”, diría Thomas Kuhn, en una expresión —paradigma— con la que él mismo,

posteriormente no estuvo de acuerdo; frente al cual Kuhn habría destacado o bien la idea de “nuevo(s) paradigma(s)”, o bien, mucho mejor, la revolución científica.

Por su parte, desde su nacimiento en la Grecia antigua —específicamente, en el tránsito de la Grecia arcaica a la Grecia clásica—, la ciencia siempre ha implicado democracia; una implicación que, sin embargo, no es fácil ni directa. Como habremos de ver posteriormente. En efecto, la ciencia nace en la Grecia clásica después de la Tiranía de los Treinta, y gracias al gobierno de Solón y Pericles. Nacen, primero los humanistas —que eran exactamente los sofistas; con los cuales Platón y Aristóteles se disputaban—, y luego también nace lo mejor de la filosofía, la astronomía, la geometría, la lógica, la aritmética y la medicina; y con ellas, claro, lo mejor de las artes. Esta historia de las relaciones entre ciencia y democracia ha sido suficientemente escrita a lo largo de la historia tanto como de la geografía.

Así las cosas, asistimos a una tensión esencial. Se trata de la tensión entre la ciencia y tecnología. Aquella, de corte marcadamente democrático en el sentido filosófico de la palabra. Este sentido se condensa en la expresión: *logos didomai* que en griego significa tanto pedir o demandar razones como dar, suministrar o aportar razones. Que era lo que se hacía, originariamente, en la plaza pública; en el ágora. Y luego se tecnifica en el Liceo y en la Academia. La tecnología, en general, por el contrario, con un espíritu distintivamente beligerante, defensivo y guerrero en la acepción sociológica de la palabra.

Toda la historia ha sido la tensión y la complementariedad, según el caso y el momento entre ciencia y tecnología. Significativamente, cuando T. Kuhn escribe su famoso libro sobre las revoluciones científicas, en 1962, las relaciones entre revoluciones científicas y revoluciones técnicas o tecnológicas eran de uno a cuatro. Es decir, por cada revolución teórica o conceptual había cuatro revoluciones técnicas o tecnológicas. Basta con recordar, digámoslo de pasada, que la revolución de Watson y de Crick y el descubrimiento de la estructura del ADN, importante como es o como fue, no fue una revolución teórica; sino técnica o tecnológica. Pues bien, para 2012, la relación entre revolución científica y revolución tecnológica había aumentado en una proporción de uno a diecisiete.

Asistimos a un enorme avance del conocimiento. Pero la gran mayoría de estos avances son técnicos, por minimalistas. Necesitamos una magnífica revolución teórica o conceptual. No es este el lugar para ahondar en ello.

Simple y llanamente, estamos haciendo muchas cosas, sin que necesariamente entendamos lo que estamos haciendo o cuáles son las consecuencias de lo que hacemos, o cuáles los marcos y contextos de lo que hacemos (*big picture*). O lo que es equivalente, todo parece indicar que la gestión del conocimiento en general —*knowledge management*— pareciera estar poco preocupada por la dimensión teórica del conocimiento —esto es, la investigación básica— y favoreciera mucho mejor la investigación experimental y aplicada.

Como quiera que sea, hoy no existen ya dos cosas: la ciencia, de un lado, y las tecnologías, de otra parte. No en vano, fue G. Hottois quien acuñó consiguientemente el concepto de *tecnociencia*. Las tecnologías adquieren el manto, mucho más adecuado, de ingenierías. Y la ingeniería es ciencia aplicada.

Este trabajo pivota en torno de las ciencias de la complejidad, su importancia y su sentido, en este caso, los estudios sobre seguridad y defensa. A partir de la emergencia del liberalismo, de un lado; asimismo, de otra parte, subsiguientemente, con la constitución del Estado-nación, los temas de seguridad y defensa se abrogaron, en general al Estado; y los organismos y fuerzas pertinentes.

Pues bien, ya desde sus orígenes en Locke, Hobbes y Rousseau, notablemente, los temas de seguridad y defensa hacen referencia a la protección y el cuidado de la vida. No del Estado o de un tipo de gobierno. (Habría que volver a leer a los clásicos del pensamiento liberal). Así las cosas, la tesis de este capítulo es que existen y se vienen desarrollando ciencias y tecnologías de punta que resultan altamente necesarias y pertinentes para el cuidado y la afirmación de la vida. Debemos poder conocerlas y apropiárnoslas, todos. En Colombia, a la fecha, estas ciencias y tecnologías son ampliamente desconocidos por todos los sectores gubernamentales y estatales. Bastaría una mirada cuidadosa, desde los documentos Conpes hasta los programas de desarrollo (PND); desde las distintas jurisprudencias de las altas Cortes, hasta los documentos más sensibles de las Fuerzas Militares y de Policía; o bien, desde las declaraciones y documentos del episcopado, hasta los más importantes centros del sector privado, como la Andi, y muchos más; en fin, desde las leyes aprobadas en el Congreso de la República hasta los documentos de las distintas misiones de ciencia y tecnología habidas; por ejemplo. Las ciencias de la complejidad permanecen, a la fecha, como un plato propio de las comunidades académica y científica. Los más cercano que han llegado algunos es al pensamiento sistémico. Y eso es aún muy lejano de la complejidad. Esta es la novedad de este texto.

Revoluciones científicas y tecnológicas (o industriales)

La expresión *ciencias de punta* es una manera genérica de señalar un abanico, un mosaico de ciencias y disciplinas, de técnicas y tecnologías, cada vez más entrelazadas, que han venido emergiendo con fuerza. Existe, hoy por hoy, un muy evidente avance en el conocimiento. Crecientemente emergen nuevas ciencias y disciplinas, nuevas tecnologías y comprensiones. La razón no es difícil: nunca había habido en la historia de la humanidad el número de matemáticos, biólogos, ingenieros y demás que hay hoy. Y jamás había habido tanta gente con maestrías y doctorados. En numerosas áreas podría decirse algo semejante. Vivimos, literalmente, una edad de luz.

Comprender la ciencia y la tecnología comporta poner, abiertamente, sobre la mesa, las tres revoluciones científicas habidas hasta la fecha (Maldonado, 2020a). La primera, la revolución de la ciencia clásica o moderna, cuyos dos ápices son la revolución copernicana y el desarrollo de la mecánica clásica, un trabajo que va desde Galileo hasta Newton; y con Newton, más recientemente, el desarrollo de la mecánica estadística en el siglo XIX con los trabajos de Maxwell y Gibbs. La Primera Revolución Científica tardó cuatro siglos en llevarse a cabo y produjo, como grandes construcciones, la mecánica clásica, la termodinámica, la microbiología, todas las ciencias sociales y humanas a partir del programa formulado por A. Comte, el padre del positivismo, y con muchas dificultades, la biología. *Grosso modo*, abarca desde los trabajos de Bacon, Descartes y Galileo, hasta 1905, exactamente. En las postrimerías de la ciencia clásica, comienza a nacer la ecología.

En el plano de la tecnología, se trató de la máquina de vapor, inventada por Watt en 1769 y la consiguiente maquinización del trabajo y de la sociedad. Esta circunstancia da lugar a la Primera Revolución Industrial. La maquinización de la sociedad se extiende, crecientemente, a prácticamente todos los planos de la sociedad.

La Segunda Revolución Científica va desde 1900 hasta la fecha. Consiste en la teoría cuántica. Esta comprende, cronológicamente, a la física cuántica, la química cuántica, todas las tecnologías basadas en principios o en comportamiento a cuánticos, la biología cuántica y, más recientemente, las ciencias sociales cuánticas (Maldonado, 2019b). A su vez, la teoría cuántica conoce dos momentos. El primero, que cabe denominar *clásico*, que va desde 1900 hasta 1934, con el famoso *paper* EPR, en referencia a sus autores, Einstein, Podolsky y Rosen. El segundo abarca desde los trabajos de Bohm y Feynman hasta la fecha. Y que da lugar a la

computación cuántica, el procesamiento cuántico de la información, la teleportación, el estudio de los fenómenos de tunelamiento y la criptografía. El factor que traza la división entre los periodos de la cuántica es el nacimiento de la física nuclear, a raíz de la Segunda Guerra Mundial, el Proyecto Manhattan y el subsiguiente desarrollo de la Guerra Fría, que tiene como punto de inflexión la invención de la bomba de hidrógeno por parte de la entonces URSS, en 1952.

La Segunda Revolución Científica tarda décadas en llevarse a cabo. En la escala tecnológica, el fenómeno más importante fue el nacimiento del computador y de la computación, no sin antecedentes, gracias a A. Turing. Sin la menor duda, el computador y la computación es la más importante de todas las herramientas y tecnologías jamás desarrolladas por los seres humanos, incluso por encima del dominio del fuego, la invención de la escritura, la rueda o la aguja de tejer o de hilar.

Finalmente, la Tercera Revolución Científica comienza en 1948 con el famoso artículo de Shannon y Weaver. Se trata de la revolución de la información y que se extiende hasta la fecha dando lugar a las redes sociales, nacidas todas hacia 2012. Esta revolución tarda años en efectuarse.

Tecnológicamente, entre aproximadamente los mismos tiempos, tienen lugar la Segunda, la Tercera y la Cuarta Revoluciones Industriales.

La Segunda consiste en la producción en serie y sucede a partir de los años 1910, en el marco de la Primera Guerra Mundial. La Segunda Revolución Industrial es formulada en 2011 y consiste en la importancia de internet. Con la red, se trata del nacimiento de la inteligencia artificial. La Tercera Revolución Industrial es identificada en 2016 y consiste en la síntesis de las dimensiones física, biológica y digital del mundo y de la sociedad.

Existe un alejamiento entre la Primera y la Segunda Revoluciones Industriales con respecto de la Tercera y la Cuarta y, al mismo tiempo, existe una tendencia de aproximación entre la Tercera y la Cuarta Revoluciones Industriales.

Pues bien, hay, al mismo tiempo, un distanciamiento cada vez mayor entre la Segunda y la Tercera Revoluciones Científicas, y un acercamiento entre la Tercera y la Segunda Revoluciones Científicas.

Este es el panorama grueso de la ciencia y la tecnología. Sin embargo, algunas particularidades significativas tienen lugar también. Quizá la más importante es la siguiente.

Hacia los años 1960 nacen nuevas ciencias —atención al plural—, fundadas en problemas de frontera. Cronológicamente, estas ciencias como síntesis son la siguientes:

Ciencias cognitivas

Nacen originalmente en el MediaLab del MIT hacia los años 1960. Se definen por un problema, a saber: qué es el conocimiento, para lo cual introducen un neologismo: *cognition* (cognición), para diferenciarlo del conocimiento (*knowledge*). Mientras que este es claramente antropológico, la cognición sirve para designar un problema consistente en el hecho de que las bacterias conocen, las plantas y los animales, al igual que los seres humanos, pero, además, los computadores son también susceptibles de conocimiento.

Ciencias de la Tierra

En los años 1970 se confirma una idea formulada en los años 1930 por Wegener: la tectónica de placas y la deriva continental. La Tierra es un sistema dinámico. Al mismo tiempo, la exploración del espacio exterior, un programa de investigación inaugurado por la antigua Unión Soviética pone de manifiesto que puede haber otros planetas como la Tierra. Nacen la exobiología, la astroquímica y la astrofísica. Ya en 1964 había nacido la cosmología como ciencia, conocida como la teoría inflacionaria del *big-bang*.

Ciencias del espacio

Estrechamente relacionadas con las anteriores, las ciencias del espacio consisten en la dúplice investigación sobre el espacio exterior en la búsqueda de exoplanetas, tanto como en la exploración del ecosistema en el que se encuentra el sistema solar y, a su vez, la Vía Láctea. Desde una perspectiva terrestre, se busca si eventualmente existen ciclos biogeoquímicos. Los agujeros negros y la búsqueda de comprensión del origen del universo constituyen algunas de las aristas más importantes.

Ciencias de la salud

Después del nacimiento de la medicina científica en el siglo XIX como fisiología, se produce una magnífica eclosión de ciencias y disciplinas vinculadas a la medicina y al estudio de la enfermedad. De un lado, todas las especializaciones médico-clínicas y médico-quirúrgicas y, de otro lado, el nacimiento de campos anexos y el fortalecimiento de la industria farmacéutica constituye una dimensión fantástica con enormes logros en numerosos campos, hasta la fecha.

Ciencias de materiales

A partir de los años 1980 hasta la fecha, el avance en la física e ingeniería de materiales no conoce descanso, con impactos en todas las áreas de la vida de la sociedad. Actualmente, el grafeno cobra una importancia singular, permeando lo mejor de la tecnociencia. La nanotecnología adquiere un papel singular en este espectro.

Ciencias de la vida

Estrechamente vinculadas con las ciencias de la salud, las ciencias de la vida consisten en la hibridación entre geología y microbiología, paleontología, botánica y geografía física. Es prácticamente imposible girar la cabeza y no encontrar vida; desde los extremófilos, pasando por los virus y bacterias hasta la escala humana. Significativamente, más allá de la escala humana, se trata, recientemente, también de la inteligencia y la vida artificiales.

Ciencias de la complejidad

En 1984 nacen las ciencias de la complejidad —sobre las cuales volveremos en la sección inmediatamente siguiente— dedicadas al estudio de dinámicas no-lineales, radicalmente distintas de toda la ciencia clásica o moderna. Luego de su nacimiento, en los más importantes centros e institutos de investigación, universidades, estamentos de los Gobiernos nacionales y ocasionalmente también en el sector privado, se crean espacios dedicados expresamente al estudio de sistemas de complejidad creciente.

Es importante resaltar que existen numerosos vínculos entre las ciencias como síntesis señaladas, posibles a partir de problemas de frontera.

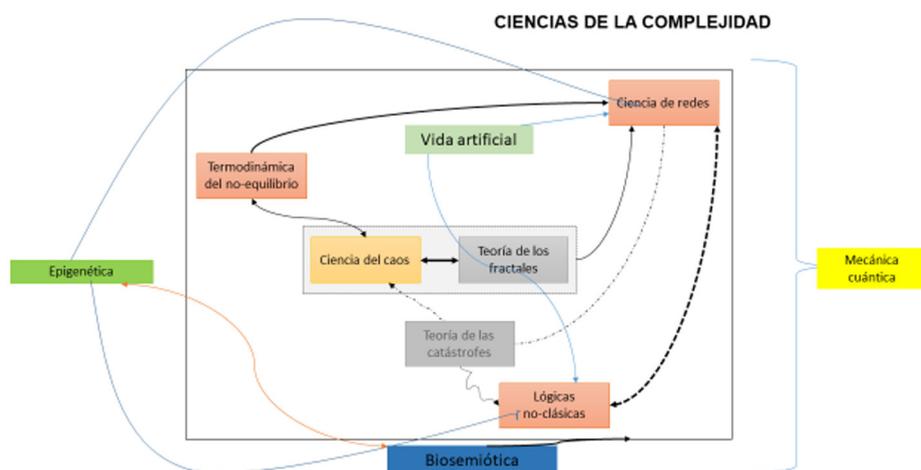
Por lo demás, en otro plano, entre finales del siglo XX y comienzos del siglo XXI aparecen las tecnologías convergentes. Estas son conocidas con el acrónimo NBIC+S. Se trata, respectivamente, de la nanotecnología, la biotecnología, las tecnologías de la información, las tecnologías del conocimiento y la dimensión social de la tecnología. (Hablar hoy por hoy de las TIC es un arcaísmo, por decir lo menos).

Sintetizando, una revolución científica es una revolución en la cosmovisión, en la forma de comprensión del mundo, la naturaleza y el universo, y del propio ser humano, dicho en general. Por su parte, una revolución industrial es una revolución en la forma como se organiza el trabajo y, con él, la sociedad.

Ciencias de la complejidad. Caracterización

Las ciencias de la complejidad nacen, conceptual, semánticamente, en 1984. Sin embargo, sus orígenes se remontan —*avant la lettre*—, al descubrimiento del cálculo por parte de Leibniz y de Newton, a las contribuciones de Gödel y de Turing, y al siempre infaltable impacto de los trabajos distintos, como son entre sí, de Hilbert y de Poincaré. Este trabajo no quiere elaborar una historia de los antecedentes, directos e indirectos de las ciencias de la complejidad. Antes bien, se trata de su caracterización, de su especificidad. Dicho esto, debe quedar claro que toda la investigación de punta en el mundo (*spearhead science*) pasa, medularmente, por las ciencias de la complejidad. Entenderlas es *conditio sine qua non* para su estudio e implementación en cualquier plano o contexto. La Figura 1 presenta el panorama general de las ciencias de la complejidad.

Figura 1. Panorama general de las ciencias de la complejidad



Fuente: elaboración propia.

La primera de las ciencias de la complejidad, la teoría del caos, se caracteriza porque pone en evidencia que la complejidad de un fenómeno, sistema o comportamiento consiste en su impredecibilidad. Nacida en el contexto de la meteorología, el caos no solamente hace evidente que las cosas en general son, más pronto que tarde, impredecibles, que la impredecibilidad no puede en manera alguna ser descartada, sino, por consiguiente, hace de este un tema explícito de estudio e investigación.

Un sistema caótico es un sistema altamente ordenado, pero que es impredecible. ¿Existen fenómenos y comportamientos que son predecibles? Esto es, ¿mediana o aproximadamente predecibles? Desde luego. Allí no trabaja la complejidad. Para esa clase de fenómenos predecibles existen otras herramientas, que no tienen absolutamente nada de complejidad, tales como la planeación, la prospectiva, los estudios y la teoría de probabilidad. La impredecibilidad hace referencia al hecho de que las cosas pueden ser predecibles tan solo a corto plazo; y cuanto más corto plazo, mejor. Pero que a mediano y a largo plazo, los fenómenos son crecientemente impredecibles. Desde la meteorología, el estudio del caos se extiende de fenómenos y comportamientos naturales y sociales o humanos.

Dicho lo anterior, no todas las cosas son complejas. Es más, la inmensa mayoría de cosas no lo son. Las ciencias de la complejidad trabajan únicamente en esos fenómenos que pueden ser identificados como complejos; esto es, de complejidad creciente. De suerte que a la pregunta: ¿Qué es o por qué surge la complejidad? Aparece inmediatamente una (primera) respuesta: debido a la naturaleza impredecible de las cosas. Gracias a la ciencia del caos, estamos haciendo ciencia de la impredecibilidad, por primera vez en la historia de la humanidad.

Contemporánea con la ciencia del caos, en los años 1970, surge la geometría de fractales. Se trata del reconocimiento explícito de que la naturaleza posee una dimensión fractal, en contraste con la forma clásica de entender los fenómenos naturales, basada en la geometría euclidiana. Más exactamente, la geometría de fractales consiste, dicho de manera sucinta, en una doble característica. De un lado, en la dimensión fractal que quiere significar que la estructura de una parte se corresponde con la estructura del todo; técnicamente, ello se denomina *autosimilitud*; y es objeto de mediciones matemáticas, esencialmente, basadas en iteraciones.

De otra parte, al mismo tiempo, la geometría de fractales comporta la idea de que la naturaleza es irregular. Son las irregularidades las que dan qué pensar en el marco de esta geometría, y demanda, al mismo tiempo, la capacidad de ver irregularidades; patrones y rupturas de patrones. La geometría de fractales ha sido conformada en el estudio de fenómenos humanos, naturales y también de sistemas artificiales, notablemente tecnológicos.

Dicho lo anterior, es preciso advertir que existen innumerables geometrías y que cada geometría describe un mundo propio, aparte. En una circunstancia afortunada, pero fortuita, digamos que en 1977 nace otra de las ciencias de la complejidad: la teoría de *catástrofe*. Catástrofe es el término que se usa en una teoría de origen matemático para designar cambios súbitos, imprevistos, irreversibles.

Como se aprecia inmediatamente, no es del interés de las ciencias de la complejidad estudiar tendencias, vectores, matrices. Muy por el contrario, se trata de estudiar dinámicas, cambios, espacios, procesos que tienen lugar súbitamente y que son o pueden ser irreversibles y que son, por lo tanto, imprevistos. No es difícil ver las conexiones entre varias de las ciencias de la complejidad.

Aunque no es el objeto directo de este trabajo, hay que decir inmediatamente que las matemáticas de la complejidad no son matemáticas de sistemas continuos. Muy por el contrario, sin las matemáticas de sistemas discretos. Esto quiere decir que, de una parte, la estadística normal —distribuciones normales, de Gauss, de Poisson, de Bernoulli, gama y otras, no son del interés, en modo alguno, en complejidad—. Asimismo, de otro lado, campos como el cálculo, las ecuaciones diferenciales, la noción de límite, el estudio de funciones y otros más no entran en consideración en complejidad. Debe ser posible una profundización y apropiación de las matemáticas de sistemas discretos.

En 1977, I. Prigogine recibió el Premio Nobel de química por sus contribuciones a la termodinámica del no-equilibrio y por haber introducido en la ciencia lo que la ciencia no tenía: el tiempo (Prigogine, 2003). Los sistemas complejos, es lo que pone de manifiesto la termodinámica del no-equilibrio, son sistemas abiertos —no existen ni son posibles sistemas cerrados o aislados—, y lo más importante que les sucede es la flecha del tiempo, a saber: la flecha de un tiempo creciente, generador de vida, finalmente.

El equilibrio, en cualquier sentido y contexto, es siempre provisional. Más idóneamente cabe hablar de ausencia de equilibrios o, lo que es equivalente, de equilibrios dinámicos. El término técnico con el que se designan esta clase de fenómenos y sistemas es como estructuras disipativas.

Mientras que el tiempo fue un factor que siempre se descartó en el estudio de los asuntos del mundo, los estudios de Prigogine dejan ver que la complejidad existe debido justamente al tiempo. Y este no puede ser considerado como un marco de probabilidades o como un tema que va de suyo (*taken for granted*). Antes bien, el tiempo es el generador de dinámicas de no-equilibrio; en una palabra, no-lineales.

De otra parte, es la termodinámica de los fenómenos alejados del equilibrio la que pone en evidencia que las estructuras disipativas son autoorganizativas. Esto es, las cosas verdaderamente importantes en el mundo y en la naturaleza no son el objeto de sistema de control, en ningún sentido de la palabra, sino espontáneos y por ellos mismos, robustos. La autoorganización es un enfoque o aproximación altamente importante que forma parte de las ciencias de la complejidad (Camazine et al., 2003).

Otra de las ciencias de la complejidad es la vida artificial. Nacida en 1989 por iniciativa de C. Langton, se trata de un programa estrictamente filosófico con la ayuda de la computación. La vida artificial tiene como finalidad entender qué es la vida y cómo surge, cuáles son sus dinámicas y su lógica, análogamente a cómo, en sus orígenes, la inteligencia artificial hacía lo mismo respecto de la mente o la inteligencia, con el desarrollo de la máquina de Turing. Así, sin la menor duda, la inteligencia artificial y la vida artificial constituyen, por así decirlo, dos caras de una sola y misma moneda.

Esta observación permite resaltar que las ciencias de la complejidad son el resultado de la computación, tanto como que, a su vez, constituyen activamente al desarrollo de la computación (Pagels, 1991).

En este sentido, el trabajo con complejidad es, distintivamente, el trabajo con computación, simple y llanamente como una herramienta, a saber: como la mejor herramienta desarrollada para trabajar con posibilidades.

En efecto, la complejidad no se ocupa de lo real, lo que está a la mano, lo existente, en cualquier acepción de la palabra. Para eso no hace falta complejidad. Basta la ciencia normal. Muy por el contrario, el más importante de todos los rasgos metodológicos y heurísticos de las ciencias de la complejidad es que estudian espacios de fase de fenómenos reales. Esto quiere decir, que se trata de estudiar los espacios de posibilidades de evolución de un fenómeno cualquiera. Nunca comprenderemos nada si no atendemos a los espacios de fase. Técnicamente dicho, estos espacios de fase se conocen como el *espacio de Hilbert*, en referencia a D. Hilbert. Otra manera como se ha interpretado a los espacios de fase, que permiten entonces trabajar con transiciones de fase de primero y de segundo orden, es como adyacentes posibles.

Lo real, en cualquier sentido del término, aparece por consiguiente tan solo un subconjunto de un conjunto mayor que lo comprende y lo hace posible, a saber, el mundo de las posibilidades. De las posibilidades y no de las probabilidades. Al cabo, pensar lo posible mismo comporta incluso pensar en imposibilidades. Las ciencias de la complejidad son ciencia incluso de lo imposible. Estamos haciendo ciencia de lo imposible, hoy en día (Maldonado, 2021).

En los años 2001 a 2003 nace otra de las ciencias de la complejidad: la ciencia de redes complejas. De esta suerte, la complejidad de un fenómeno se encuentra en función de las redes en las que se inscribe o a las que da lugar. Básicamente, las redes complejas son de tres tipos: redes de mundo pequeño, redes aleatorias y redes libres de escala. Vivimos un mundo alta y crecientemente conectado en

muchos sentidos, y son estas redes las que permiten entender por qué la complejidad. Esto es, por ejemplo, por qué la impredecibilidad o los cambios súbitos e imprevistos o la ausencia de equilibrios.

Quizás el mayor o mejor descubrimiento de la ciencia de redes sean los fenómenos de sincronía o sincronización, que suceden en todas las escalas de la naturaleza; incluso ya desde los sistemas físicos inanimados. Esta sincronización es conocida técnicamente como el *efecto Kuramoto*. La sincronía es un fenómeno espontáneo, que no necesita de centralidad ni de jerarquías para ser entendido.

A *fortiori*, existen fenómenos de sincronización en los sistemas naturales tanto como en los sistemas humanos. La complejidad permea a la naturaleza y, por lo tanto, la no-linealidad.

Esta es la mayor dificultad que plantean las ciencias de la complejidad y sus tecnologías y herramientas para una estructura mental formada clásicamente. Existen dinámicas espontáneas (*order-for-free*, se dice en el lenguaje técnico). Existen fenómenos de autoorganización, de abajo hacia arriba (*bottom-up*), que no requieren, en absoluto, procesos verticales, de arriba abajo (*top-down*). Este es un tema que tiene que ver directa y necesariamente con la topología que es, si cabe la expresión, el basamento matemático de la complejidad.

Como se aprecia sin dificultad, se trata de una serie de estructuras, dinámicas, procesos que nada tienen que ver con la cultura clásica: emergencias, no-linealidad, autoorganización, sincronización, orden espontáneo, ausencia de jerarquía y centralidad. Son estos rasgos y estructuras mentales las que permiten entender por qué la mayoría de las empresas, los Estados y las instancias de gobierno alrededor del mundo saben de complejidad, se han enterado de alguna manera, pero tienen serias dificultades para asumirla, implementarla, desplegarla enteramente. Manifiestamente, se trata de una revolución científica.

Un rasgo común a todas las ciencias de la complejidad aparece inmediatamente, después del panorama anteriormente presentado, ante una mirada sensible. La complejidad consiste en ver los fenómenos, dinámicas, procesos o estructuras o bien como sistemas vivos, o bien como sistemas que exhiben vida. En manifiesto contraste con toda la ciencia clásica, determinantemente mecanicista y determinista. Una radical transformación de cualquier mirada en cualquier plano o contexto que se quiera.

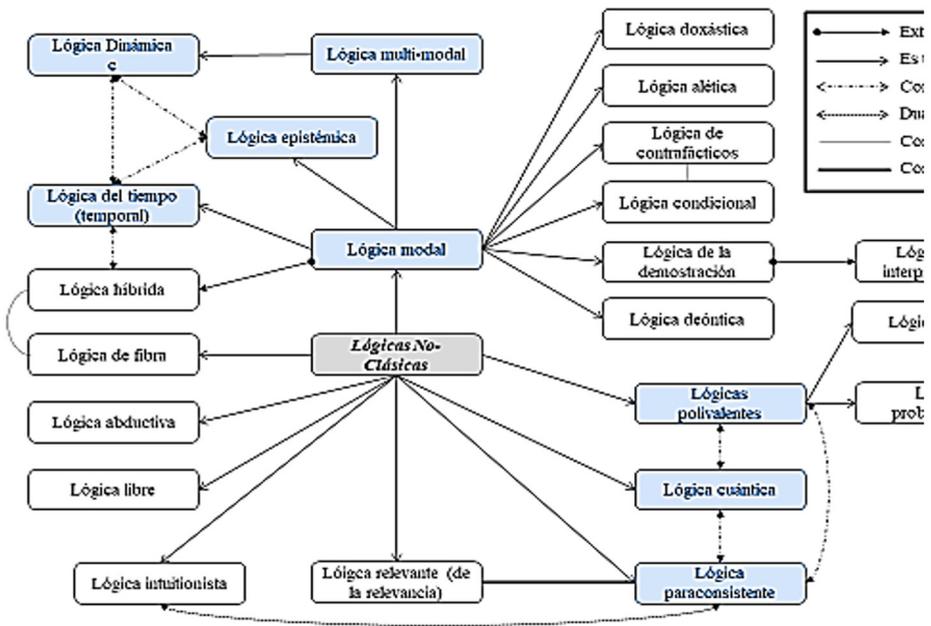
Adicionalmente, siguiendo siempre la Figura 2, otra de las ciencias de la complejidad son las lógicas no-clásicas (LNC). Hay que decir que esta idea es específicamente latinoamericana, en general, y constituye una de las contribuciones de

América Latina a la historia de la ciencia, por ejemplo, análoga al concepto de autopoiesis de Maturana y de Varela, o a las lógicas paraconsistentes de N. da Costa, o igualmente a las economías de escala, introducidas originariamente por M. Max Neef —*economías de pies descalzos*, las denominaba Max Neef—, por ejemplo. Nunca, nadie más, ni del lado de los lógicos, ni tampoco del lado de los complejólogos vio y estableció esta relación.

Las LNC constituyen un continente amplio de lógicas alternativas, la mayoría, y unas cuantas, complementarias a la lógica formal clásica también llamada *lógica estándar*. Se trata de la lógica que puede ser designada de cuatro maneras, así: como lógica matemática, lógica proposicional, lógica simbólica o lógica de predicados. Es, en cualquier caso, lógica de primer orden.

Las LNC ponen inmediatamente sobre la mesa el reconocimiento de que existe un pluralismo lógico; por lo tanto, un pluralismo de sistemas de verdad. En otras palabras, no existe una verdad única. Ciertamente un motivo de escándalo para la visión clásica. La Figura 2 ilustra el panorama de las LNC.

Figura 2. Panorama de las lógicas no-clásicas (LNC)



Nota: La Figura 2, sin embargo, no pretende ser completa.

Fuente: elaboración propia con base en Maldonado (2020b).

La idea fundamental es que existe un pluralismo lógico. Por consiguiente, varios mundos son posibles, lógicamente hablando. Es importante atender al hecho de que la semántica de las LNC es la semántica de mundos posibles. Se entiende así, y se refuerza, la idea de que pensar y trabajar con complejidad consiste en trabajar con posibilidades e incluso con imposibilidades.

Tal es, podemos decir, sucintamente el panorama clásico de las ciencias de la complejidad. Hay una manera apropiada de comprenderlas, dicho de forma negativa. Las ciencias de la complejidad pueden ser idóneamente comprendidas como el rechazo a cualquier forma de dualismo, determinismo, mecanicismo y reduccionismo.

Pues bien, exactamente en esta misma atmósfera y espíritu, hay dos ciencias que pueden idóneamente ser incluidas entre las ciencias de la complejidad. Se trata de la epigenética y a biosemiótica.

La epigenética, no sin antecedentes, nace en 2005 y tiene el mérito de superar la dualidad cultura-naturaleza. No solamente heredamos y transmitimos genes; además heredamos y transmitimos experiencias. Para 2005 estaba establecido que sucede hasta tres generaciones. Para 2021, queda establecido que es un proceso que abarca hasta ocho generaciones. La epigenética ha sido confirmada en plantas, animales y seres humanos.

Como se entiende sin ninguna dificultad, la escisión entre ciencias naturales y ciencias humanas, o entre ciencias exactas y artes, o igualmente entre naturaleza y cultura es hoy por hoy perfectamente insostenible. Cualquier acción o decisión sobre un plano afecta inmediatamente al otro plano.

Por su parte, la biosemiótica se articula en tres dominios principales: la antroposemiótica, la zoosemiótica y la fitosemiótica. En todos los casos, el tema es el de la producción de signos, señales, códigos, patrones y mensajes en las escalas de los sistemas vivos. Los sistemas vivos leen signos y señales, los interpretan y correspondientemente crean nuevas señales y mensajes, constituyendo así un fantástico campo informacional que atraviesa, constituye y comprende la dinámica de los sistemas vivos en general: plantas, animales y seres humanos, dicho en general.

Como quiera que sea, es fundamental observar a la izquierda de la Figura 1. Se trata de la mecánica cuántica. La mecánica cuántica es, sin la menor duda, el punto de apoyo arquimédico de todo el edificio científico y tecnológico del mundo, hoy. Se trata de la más robusta, la más conformada, la más verificada, la más falseada de todas las teorías científicas. Ha sido confirmada y falseada hasta el onceavo

decimal: 0.00000000001. No hay absolutamente ninguna teoría que tenga semejante solidez.

La mecánica cuántica es (sencillamente) un muy técnico y difícil aparato matemático dedicado a estudiar fenómenos y comportamientos cuánticos. Se trata de fenómenos caracterizados, entre otros rasgos, por no-localidad, superposición, indeterminación, complementariedad, entrelazamiento, teleportación, superposición, tunelamiento, exclusión de Pauli y otros más. Manifiestamente, se trata de una teoría altamente contraintuitiva que, literalmente, no se funda para nada en el peso de la percepción natural o de los sentidos.

La mecánica cuántica es la mejor teoría jamás desarrollada para explicar fenómenos como: el universo, el mundo, la naturaleza, los seres humanos, la vida, en cualquier acepción o sentido de la palabra. Simple y llanamente, es imposible hoy llevar a cabo una explicación, una comprensión, y mucho menos una decisión, al margen de un conocimiento, por lo menos básico, pero sólido de la mecánica cuántica.

Digámoslo sin ambages: las ciencias de punta, dicho en general, y las ciencias de la complejidad, dicho en particular, son imposibles al margen de la mecánica cuántica. Pues bien, es justamente esta la que se articula en cinco dominios: la física, la química, las tecnologías, la biología y las ciencias sociales cuánticas.

Sería deseable presentar las disciplinas y aproximaciones de las ciencias de la complejidad. Por ejemplo, la inteligencia de enjambre, que hace referencia a que, en la naturaleza, tanto como en sistemas naturales, hay momentos en que hay colectivos que deciden actuar como un individuo, ya que así obtienen mejores resultados que si actuaran colectivamente. Los cardúmenes, los pájaros, los insectos sociales, las partículas subatómicas o las gacelas, por ejemplo, han sido ejemplos bien estudiados. Los seres humanos no han terminado de aprender estos comportamientos; ciertamente no aquellos que se rigen por los modos occidentales de pensar y de vivir.

Asimismo, habría que hacer referencia al concepto y los procesos de emergencia. Pensar en complejidad es todo lo contrario a pensar en términos de causalidad e incluso de multicausalidad; sus variantes, tales como “análisis multivariado o multidimensional” y otros. Propiedades o comportamientos emergentes quiere significar que no hay ninguna proporcionalidad entre el *input* y el *output*. El *output* es mucho más y muy diferente al *input*.

Una observación final se impone. Es perfectamente distinto *sistémico* de *complejo*, una confusión muy extendida que impera, allá afuera, incluso en el mundo

científico y académico. No es este el lugar para subrayar criterios de demarcación (Maldonado, 2023a).

Como quiera que sea, un muy claro rasgo de familia permea y define a las ciencias de la complejidad. Se trata de pensar los fenómenos como sistemas vivos o bien, lo que es equivalente, como sistemas que exhiben vida. Esta idea tiene muy serias consecuencias de orden al mismo tiempo epistémico y moral.

Herramientas matemáticas de la complejidad

Las ciencias de la complejidad son esencialmente dos cosas. De un lado, un muy robusto aparato epistemológico compuesto por diferentes ciencias, disciplinas, aproximaciones y comprensiones. Un somero panorama acaba de ser esbozado. Asimismo, son un conjunto de técnicas y herramientas muy sofisticadas. Me ocupo a continuación de estas últimas.

A título introductorio para esta sección hay que decir que existen tres clases de ciencia hoy en día que se corresponden con tres métodos o metodologías, perfectamente distintos. Se trata de la ciencia por inducción, la ciencia por deducción —las cuales corresponden a los modelos de ciencia de la Primera Revolución Científica— y la ciencia por modelamiento y simulación. Correspondientemente, cabe hablar genéricamente de tres formas principales de métodos científicos, así: métodos cualitativos, métodos cuantitativos —ocasionalmente, métodos mixtos o híbridos, que son la combinación de los anteriores— y el modelamiento y simulación como método científico.

De manera significativa, el trabajo en ciencia, mucho más que en campos, áreas, comportamientos o dinámicas, consiste en el trabajo, discusión y desarrollo de modelos. Son tres los ejes de trabajo al respecto: 1) cómo surge o se formula un modelo; 2) cómo se sostiene o se mantiene un modelo, y 3) cómo se tumba o se echa abajo un modelo. Naturalmente, puede tratarse de un modelo económico, político, educativo, financiero u otros. Pues bien, una taxonomía de modelos comprende las siguientes configuraciones:

Un modelo conceptual

Por defecto, este queda ya, en principio, siempre incluido. Se trata de la elaboración que resulta de la puesta en claro de un estado-del-arte. El modelo puede ser, genéricamente, dicho, un modelo teórico o conceptual. En los proyectos de investigaciones justamente lo que se designa como el marco teórico o como el marco conceptual. Es lo mínimo que una buena investigación puede o debe tener. Es lo normal, en todo caso.

Un modelo matemático

Existen, *grosso modo*, dos tipos de matemáticas. Las matemáticas de sistemas continuos y las matemáticas de sistemas discretos. Así las cosas, el modelo matemático comprende dos opciones. Como queda dicho, las matemáticas de la complejidad son matemáticas de sistemas discretos. Volveré sobre esta idea a continuación.

Un modelo lógico

Existen dos grandes dimensiones de la lógica. La lógica formal y las lógicas no-clásicas (LNC). Por consiguiente, un modelo lógico admite dos posibilidades. Todo depende de la fuerza de innovación o de la apuesta de riesgo del investigador. Como queda dicho, las LNC admiten una diversidad de opciones. Al respecto, todo depende de las capacidades propias de cada investigador.

Un modelo informacional

Hace referencia al uso de lenguajes de programación ya existentes. Hay numerosos lenguajes de programación para distinto uso.

Un modelo computacional

Hace referencia no ya al uso de un lenguaje de programación, sino, adicionalmente, al desarrollo de código. Esto es, debe ser posible que una buena investigación escriba código, en el estudio y explicación de un fenómeno, problema o sistema.

Quisiera decirlo de manera expresa. Una investigación debe, por lo menos, tener dos de los modelos anteriores. Por defecto, ya tiene uno: el modelo conceptual o teórico. Adicionalmente debería tener otro más. Todo depende de las fortalezas y capacidades de aprendizaje de un investigador o grupo de investigación.

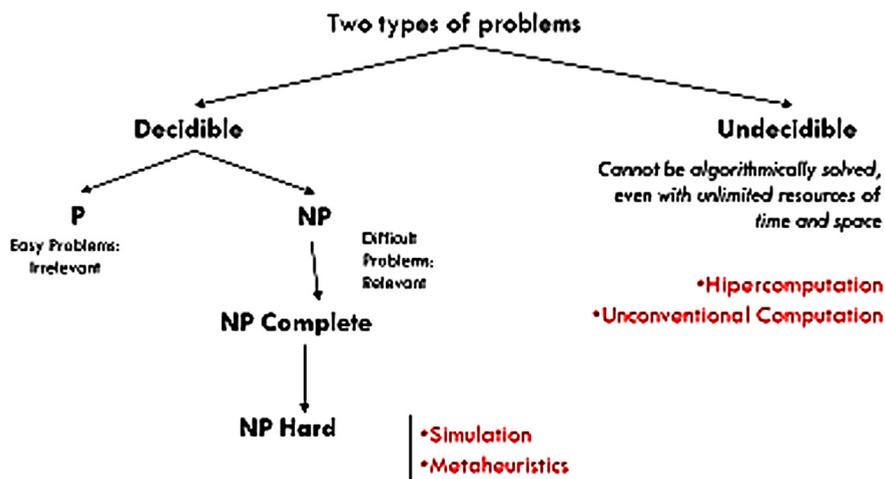
Dicho lo anterior, es importante atender a una distinción fina, pero no difícil, para nada. Una cosa es el modelamiento y otra, muy distinta, es la simulación. Los sistemas lineales pueden modelarse. Solo los sistemas no-lineales pueden simularse. Dicho esto, no es, para nada imposible, que existan vínculos entre el modelamiento y la simulación. En otras palabras, la finalidad del modelamiento es la aplicación o puesta en marcha de un modelo. Por su parte, la finalidad de una simulación es comprender o explicar muy bien un sistema determinado.

Sin ser exhaustivo, presento a continuación, de manera sumaria, las principales herramientas de la complejidad. Vale señalar que estas son herramientas exclusivas o distintivas de las ciencias de la complejidad. De esta suerte, es absolutamente indispensable al mismo tiempo desarrollar una estructura mental con

base en el corpus teórico (= las ciencias de la complejidad) y las herramientas. No una cosa más que la otra.

Una primera herramienta fundamental es la teoría de la complejidad computacional. La Figura 3 ilustra en qué consiste:

Figura 3. Teoría de la complejidad computacional



Fuente: elaboración propia con base en Maldonado y Gómez (2011).

La idea de base no es difícil. Todos los problemas se resuelven en un tiempo dado. Pues bien, la forma más básica de designar los tiempos de resolución de un problema hace referencia a la (capacidad de) computación (respecto de un problema). Así, todos los problemas, en ciencia o en la vida, pueden dividirse, desde este punto de vista en dos grupos: los problemas indecibles y los decidibles. La indecibilidad —o decidibilidad— de un problema no quiere significar para nada que no se puedan decidir o que no se puedan decir. Antes bien, en el caso de los problemas indecibles se trata de la dificultad —mucho mejor, la imposibilidad— de resolverlos en un tiempo, un espacio, con insumos cualesquiera, dado un algoritmo real o posible. En otras palabras, es imposible saber si un problema puede resolverse o no y cuándo, puesto que no existe ni es posible un algoritmo para ello.

La distinción entre problemas decidibles e indecibles se deriva del décimo problema formulado por D. Hilbert, conocido como el problema de la detención (*das Haltungsproblem*) (Gray, 2003).

Los problemas indecidibles convocan, consiguientemente, para su comprensión y resolución computación no-convencional. Quizás el caso más conspicuo al respecto sea la hipercomputación, cuya expresión más acabada es la hipercomputación biológica. Algunos ejemplos de problemas indecidibles son: la inequidad, la pobreza, el conocimiento, la salud, la vida.

Por su parte, los problemas decidibles son aquellos que, o bien disponen de un algoritmo, o bien es posible desarrollar algún algoritmo para su resolución; así no exista aún. P hace referencia a un tiempo polinomial; NP, a un tiempo no-polinomial. Técnicamente, se los conoce como los problemas P versus NP. Estos forman parte, a su vez, de los problemas del Premio Milenio, que son los últimos problemas en matemáticas por resolver, de acuerdo con el Instituto Clay. La expresión más elemental de los tiempos polinomiales son los tiempos físicos o cronológicos, susceptibles de ser manejados en términos de agendas, cronogramas, organigramas y otras distribuciones semejantes. Sería largo y prolijo explicar las derivaciones de los problemas NP en términos de los problemas duros y los completos. Sin embargo, la bibliografía al respecto es prolija y, en muchos aspectos, no muy técnica.

Ahora bien, es importante señalar que la teoría de la complejidad computacional formal parte de una teoría de mucho mayor calado, a saber: la teoría de los problemas complejos (Maldonado, 2022), supuesto que emerge el problema, altamente sensible, de distinguir cuáles y por qué razón unos problemas pueden propiamente ser designados como problemas complejos. Digámoslo de manera explícita: no todos los problemas son complejos, en el sentido preciso de la palabra. Es más, la mayoría de los problemas, en ciencia como en la vida, no son rigurosamente complejos.

En general y de manera clásica, cada ciencia o disciplina posee una heurística. Esta consiste básicamente en la capacidad de resolución de un problema. Con frecuencia, se la asimila, asimismo, a la capacidad de innovación de una ciencia o disciplina. Pues bien, hacia los años 1980-1990 emergen, exactamente en el estudio de sistemas y comportamientos caracterizados por complejidad, las metaheurísticas. Estas son un de las herramientas distintivas de la complejidad.

Su rasgo más sobresaliente consiste en la identificación —con diferentes criterios, algunos de los cuales son técnicos, como homeomorfismos— de grupos de problemas en búsqueda de espacios de solución. El énfasis se sitúa en el plural.

Digámoslo de manera directa y precisa. Cuando en investigación en general se formula la delimitación de un problema —por ejemplo, en términos de delimitación metodológica y demás—, se hace ciencia normal. La ciencia normal existe

para no resolver —verdaderamente— los problemas. Tan solo para desplazarlos o posponerlos. La idea de *revoluciones científicas* se entiende muy bien. Ya sea en la perspectiva de T. Kuhn o bien en la propia de la tradición francesa, con los trabajos de Koyré, Bachelard y Canguilhem.

Las metaheurísticas, si se quiere, son mucho más eficaces, ya que reúnen grupos de problemas, sin limitarse a un problema cada vez, y se buscan espacios de soluciones para problemas que comparten criterios semejantes (Maldonado, 2013).

Las metaheurísticas, a su vez, se articulan en una variedad de aproximaciones y estrategias tales como las metaheurísticas multinivel, híbridas, P, y NP —en conexión directa con los problemas P versus NP antes mencionados—, evolutivas, inspiradas en la naturaleza, de búsqueda local o global, de búsqueda estocástica o dispersa y varias más. Se trata, manifiestamente, de un terreno amplio, sugestivo y distintivamente complejo.

Por lo demás, queda dicho, las matemáticas de la complejidad son matemáticas de sistemas discretos. Sus principales articulaciones incluyen los conjuntos parcialmente ordenados (*posets*, en inglés). Las cosas, en el mundo, en ocasiones, no pueden resolverse u ordenarse sino de manera provisional y parcial. Pues bien, en esto consiste este capítulo. Adicionalmente, las matemáticas de la complejidad abarcan los conjuntos extremos, la geometría discreta y combinatoria, la teoría de probabilidades discretas, todos los problemas combinatorios igualmente conocidos como complejidad combinatoria, la teoría de juegos —incluyendo los juegos evolutivos— y a teoría de la decisión racional, la topología (ya mencionada), algunas de las LNC y todas las matemáticas de los sistemas computacionales, que incluyen a los grafos y los hipergrafos.

Como se aprecia sin dificultad, se trata de una arena amplia y sugestiva. Es evidente, así, que se trata de tecnologías disruptivas en toda la línea de la palabra. El carácter disruptivo hace referencia al distanciamiento respecto de las técnicas y herramientas tradicionales y en boga.

Una observación se impone aquí. Es siempre importante distinguir en ciencia en general lo trivial y lo no-trivial. Es trivial hacer uso de herramientas existentes. Es no-trivial darse a la tarea de desarrollar nuevas herramientas e instrumentos. Es trivial hacer generalizaciones, con las justificaciones que se quiera. Es no-trivial hacer uso de cuantificadores particulares e incluso singulares. Esta idea de lo trivial y lo no-trivial merece un espacio propio en ámbitos como la metodología de la investigación científica, la lógica y la epistemología de la ciencia; claro, con sus derivaciones aplicadas y experimentales.

Tres herramientas fundamentales deben ser mencionadas en este mismo contexto. Las tres tienen que ver con mediciones.

De un lado, se trata de un asunto importante, aunque difícil que es la medición de la entropía. Como es sabido, la entropía de un sistema define —cuantitativamente— el desorden del sistema considerado. Pues bien, genéricamente dicho, existen tres aproximaciones, cronológicamente consideradas: la medición de Boltzmann, la de Shannon y la de Zurek. Las dos primeras hacen referencia a la termodinámica clásica o de sistemas aislados o cerrados. La de Zurek, por el contrario, se ocupa de la termodinámica de sistemas complejos. Es fundamental al respecto tener en cuenta que la termodinámica es una sola ciencia; que o bien considera sistemas aislados, en cuyo caso la entropía es inevitable o más bien segura; y en otro caso, en la termodinámica de los sistemas complejos, o incluso de los sistemas cuánticos, los procesos de información admiten graduaciones dinámicas (Zurek, 1990).

De otra parte, al mismo tiempo, existe el problema de la medición de la incertidumbre de un sistema. Más propiamente, se trata —en realidad— de la medición de la indeterminación, para lo cual el referente necesario es W. Heisenberg. Y con él, una vez más, el entronque entre complejidad y cuántica. Es sencillamente imposible medir al mismo tiempo el lugar y la dirección de un fenómeno cualquiera, incluso en el mundo clásico. En el mundo clásico, todo parece indicar que los seres humanos necesitan seguridades y certezas de toda índole. La indeterminación es un rasgo ontológico del mundo mismo o del universo. Todo apunta, dicho sin más ni más, al papel del azar en la economía del universo y de la vida.

Pues bien, estrechamente relacionado con la medición anterior, la tercera medición importante en los marcos del estudio de los sistemas dinámicos no-lineales es la medición de la aleatoriedad. Pues bien, existe un camino tripartito al respecto gracias a los trabajos de Kolmogorov, Gödel y Chaitin; el primero, en el marco de las matemáticas; el segundo, en el de la lógica, y el tercero, en el de los sistemas computacionales. No escapa a una mirada sensible la estrecha conexión entre estas tres áreas.

Finalmente, una herramienta conspicua y perfectamente distintiva de las ciencias de la complejidad es una distribución estadística absolutamente singular de la complejidad: las leyes de potencia (*power law*). Originalmente llamada también como la ley de Zipf, por su descubridor, las leyes de potencia aparecen a plena luz del día gracias a la geometría de fractales, en especial, debido a las contribuciones de Mandelbrot.

Las leyes de potencia son distribuciones estadísticas que trabajan en términos perfectamente distintos, a medias, medianas, promedios, tendencias, vectores o

matrices. Concentrada específicamente en escalas log/log, las leyes de potencia permiten identificar no solamente diversas escalas e impactos, sino lo que en la estadística normal se denominan *excepciones*; esto es, todo aquello que queda por fuera de las parametrizaciones.

Las leyes de potencia tienen el mérito de identificar, sin la menor duda, cuándo hay una dinámica compleja. En otras palabras, siempre que se identifica la presencia o dinámica de una ley de potencia, sin duda alguna, estamos ante la presencia de un fenómeno complejo. Esto es, un fenómeno con cualquiera de las características o atributos ya mencionado en este trabajo.

Las leyes de potencia permiten identificar no solamente la estructura de un sistema, sino, además, su dinámica en relación con otras semejantes o próximas, algo que las demás distribuciones estadísticas no hacen. La escala log/log hace referencia a la capacidad de concreción o condensación de mucha información (se trata de escalas logarítmicas).

Muy importante, adicionalmente: el estudio de fenómenos, sistemas o comportamientos que exhiben o se fundan en leyes de potencia pone de manifiesto que, en la naturaleza, tanto como en la sociedad, existen fenómenos de criticalidad autoorganizada (Bak, 1996).

La criticalidad autoorganizada empata perfectamente con varias aristas de las ciencias de la complejidad; notablemente, con el estudio de fenómenos alejados del equilibrio, técnicamente llamados *equilibrios puntuados*, con la vida artificial y con fenómenos y propiedades emergentes. Esta idea es fundamental desde el punto de vista epistemológico, y todo lo que ello comporta. La complejidad se sitúa en la antípoda de la causalidad, en cualquier acepción de la palabra. En verdad, la causalidad solo existe, tan solo, a escala local y bajo condiciones controladas. Pero a niveles meso y macro y en condiciones que no se controlan, la causalidad deja de existir por completo. Es entonces cuando emergen otras semánticas, otras herramientas, otras ciencias y disciplinas que son justamente las de las ciencias de la complejidad.

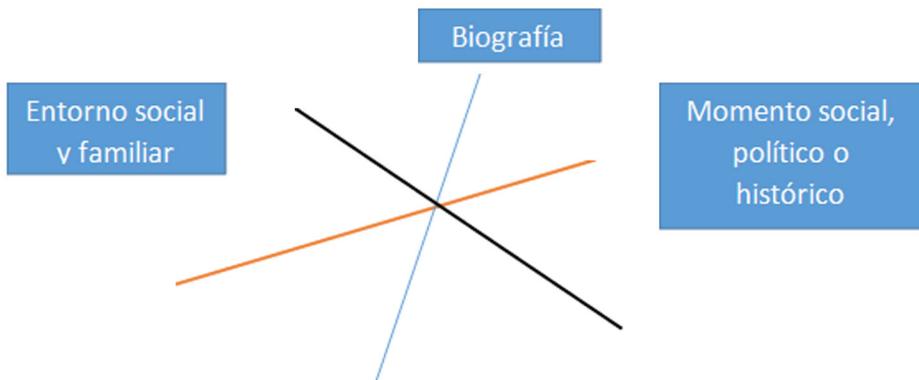
El debate internalismo vs. externalismo en ciencia

Hay un aspecto altamente sensible en la forma de entender la ciencia en general —la ciencia y la tecnología— y de gestionarlas. Se trata de lo que en el marco de la

historia y la filosofía de la ciencia es conocido como el *debate entre internalismo y externalismo*. Esto es, la discusión sobre si los avances en ciencia y tecnología son el resultado de discusiones sobre conceptos, herramientas, experimentos y demás, o bien, si, adicional y en ocasiones principalmente, los avances o retrocesos se explican también por factores externos al pensamiento y a la investigación, y que tienen que ver con circunstancias sociales, económicas, culturales, militares o políticas, principalmente. La historia de la ciencia es prolífica al respecto.

La buena comprensión de lo que sea la ciencia en general y cómo sea posible consiste en la articulación de estos dos aspectos; algo que se dice fácilmente, pero que es sumamente difícil de llevar a cabo. La Figura 4 ilustra en qué consiste la buena explicación y gatillamiento de la ciencia:

Figura 4. Ejes definitorios de la ciencia y su gestión



Fuente: elaboración propia.

La Figura 4 permite entender qué es en general la investigación, en cualquier campo o área del conocimiento, cómo emerge y cómo se hace posible. El triunfo o el fracaso de una idea, de un personaje, de una teoría es el resultado del cruce entre tres factores: la biografía, el entorno social o familiar y el momento social o político o histórico.

Manifiestamente, las experiencias personales de cada quien, en toda la extensión de la palabra: afectos, sexualidad, aprendizajes, dificultades y azares marcan el primer eje de la investigación. Asimismo, el entorno familiar y social, la educación recibida, por lo tanto, el aprendizaje de idiomas extranjeros, la formación en música o las destrezas físicas, por ejemplo, constituyen referentes sutiles pero inescapables de la inteligencia de cada quien. Y, finalmente, las eventualidades sociales o

económicas, golpes de Estado o guerras, paz o concordia y armonía sociales son determinantes para el estudio y la formación de ideas e intuiciones. El estudio de las biografías de artistas, filósofos o científicos, el estudio de épocas, sociedades y momentos históricos, en fin, estudio de las teorías y modelos mismos están permeados, explícita o implícitamente, por estos tres ejes articuladores.

Pues bien, a los planes de educación, de investigación y las políticas públicas más les valdría ampliar sus ventanas de observación, por así decirlo, y admitir un esquema como el que sugiere la Figura 4. El éxito o el fracaso personal o colectivo, en cualquier escala y contexto, está definido por estos tres ejes. He aquí la complejidad de la articulación entre teoría, biografía y entorno social de la investigación, la ciencia y la tecnología.

Sin ambages, es imposible entender la ciencia de punta y las tecnologías emergentes únicamente desde una perspectiva internalista. Un delicado, sensible y dinámico balance con el externalismo es siempre recurrente; aunque nunca evidente.

Se entienden así, mucho mejor, dos ideas, dos ideas directrices de este trabajo: la ciencia en general siempre comporta democracia, mientras que la tecnología ha sido, hasta el nacimiento de internet, un asunto distintivamente militar. El balance entre la dimensión militar y la civil de la vida marca tensiones esenciales (Kuhn, 1996) en la complejidad de la vida y del conocimiento.

Dicho en otras palabras, una buena comprensión de la ciencia y la tecnología no es diferente a la comprensión, la vivencia y la gestión, en sentido amplio, de dimensiones como la psicología, la antropología, la salud y la estética. Sin estas nada bien se entiende de la ciencia y a la tecnología. En otras palabras, como se aprecia sin dificultad, se trata de una sensible y fina articulación entre las humanidades, las ciencias sociales y humanas, y las ciencias e ingenierías.

Aproximación al ciberespacio y la ciberdefensa

Los temas de seguridad y defensa hacen referencia, en el primero y más importante de los sentidos, a temas, dinámicas, problemas y actuaciones en medio de incertidumbre, con fenómenos esencialmente imprevisibles, con una inmensa capacidad de improvisación, mucho aprendizaje y rápido, en fin, de dinámicas no-lineales en toda la línea de la palabra.

Los temas de seguridad y defensa, quiero sostenerlo, hacen referencia mucho más que a la defensa de la institucionalidad, a la defensa del territorio y de la vida, de la naturaleza misma. Pues bien, es absolutamente indispensable que un Estado

cualquiera conozca a profundidad lo mejor de la investigación de punta, trabaje con ella y contribuya a divulgarla.

Dicho política y jurídicamente, las instituciones no se deben al Estado o la república, sino a la nación. Es decir, se deben a la gente, al territorio, a la protección y defensa de la naturaleza. Las instituciones son simple y llanamente medios, herramientas o instrumentos de cara al fin: la finalidad es la defensa, el cuidado, la exaltación, el posibilitamiento y la gratificación de la vida. De la vida humana, tanto como de la vida en general; por decir lo menos, en el marco de la geografía nacional. Y muchas veces, también más allá de la geografía.

Manifiestamente, es claro que las indicaciones anteriores están lejos de ser un lugar común en medio de una atmósfera institucionalizada en el mundo. Me refiero explícitamente al institucionalismo y el neoinstitucionalismo.

Nos encontramos, en el país y en el mundo, en el marco de las guerras de quinta generación. Todo es debido a un fenómeno social y cultural sin parangones en la historia de la familia humana. Se trata del tránsito de la analogización del mundo y de la sociedad a su digitalización.

Vivimos un mundo, hoy por hoy, inmensamente rico. Rico en datos. Hoy ya no existen, ni es posible hablar, de variables, en cualquier sentido de la palabra. Una cifra, un gesto, una letra, un movimiento, una relación, un nombre, por ejemplo, son datos. Y los datos se comprenden en el trasfondo de los sistemas informacionales y computacionales. La vida en general es imposible de espaldas a la computación, en general.

Como es suficientemente sabido, internet se articula en la información superficial —en la famosa analogía con un iceberg— y la información existente en la web profunda, que es, de lejos, la mayoría.

La inteligencia, *lato sensu*, pasa hoy por hoy por el conocimiento de los sistemas informacionales y computacionales y la navegación y conocimiento de internet, en toda la extensión de la palabra. Digámoslo de manera puntual: la inteligencia humana pasa hoy por hoy, medularmente, por desarrollar o adquirir una mentalidad de *hacker*. Hoy, las mejores empresas, universidades y corporaciones admiten en sus cuerpos directivos, por ejemplo, no solamente al vicepresidente de mercadeo, digamos, al responsable de logística, a la persona a cargo del personal en general y todos lo demás; además, se incluye la presencia de un *hacker*, que tiene dos funciones principalmente: una, impedir el *hackeo* de la propia empresa, organización o institución, cualquier que sea, o bien, igualmente, la de *hackear* a la competencia.

La ciberdefensa, dicho de manera genérica, no solamente atañe dimensiones estatales o gubernamentales; además, industriales, empresariales y de conocimiento. El conocimiento es el verdadero *asset* de cualquier organización. Es el *know-how* y vale, literalmente, un potosí.

Ayer, la principal forma de espionaje era exclusivamente militar. Hoy, además, es civil, industrial y demás. Esta idea implica un reconocimiento elemental.

La información no pesa nada; se la puede guardar el tiempo que sea necesario, acumular de muchas maneras y compartimentar según sea necesario; asimismo, la información puede ser compartida, sin perderla. Y siempre se puede hacer uso de ella con cualquier finalidad, en el momento en que se quiera. Todo ello apunta a la importancia de la huella digital. (Digamos, entre paréntesis, que la huella digital es imborrable; pero que sí se la puede ocultar; lo cual requiere conocimientos técnicos de computación e información).

Contra todas las apariencias, las cosas más importantes en el mundo suceden, ampliamente, en el ciberespacio, que es, exactamente el espacio de la digitalización del mundo y de la realidad. Con el reconocimiento expreso ya mencionado: la inmensa mayoría de la información se encuentra en la web profunda (*Deep web*). Si la Unesco ha señalado, con razón, que actualmente la principal forma de analfabetismo es el analfabetismo tecnológico, la inmensa mayoría de ciudadanos y sus organizaciones —de toda índole— permanecen como analfabetas funcionales debido, entre otras razones, a su ignorancia para navegar por la web profunda. Las políticas de datos abiertos (*open data*), tanto como de ciencia abierta (*open science*) pasan, medularmente por este ámbito.

Las ciencias de la complejidad así lo saben, lo trabajan y despliegan capacidades de investigación al respecto.

Existen relativamente numerosos trabajos sobre complejidad y temas militares; son sólidos los centros de investigación alrededor del mundo sobre estos dos ejes. Existe, asimismo, alguna revista especializada en el tema. Tirios y Troyanos saben de la importancia de las ciencias de la complejidad. *Lato sensu*, de cara a temas álgidos como democracia, libertad, interés nacional, posicionamiento geoestratégico, control, seguridad, defensa y ataque; y todas sus derivaciones e intertextos. No es este el centro del presente capítulo, sencillamente por razones de espacio. Un sólido estado-del-arte, que, si cabe la expresión, el A, B, C de una buena investigación, así lo pone/pondría en evidencia.

En cualquier caso, es evidente que en la medida en que la información va siendo depositada en forma digital, queda tanto asegurada como expuesta, por

paradójico que parezca. Los temas que aparecen entonces son los de encriptación, criptografía, decodificación y codificación, todo lo cual remite a la interfaz entre cuántica y complejidad (Maldonado, 2010).

El ciberespacio es el mundo de la criptografía, hoy por hoy. Actualmente, la batalla, por así decirlo, la van ganando los *encriptores* —un tema puntual apasionante es la criptografía cuántica—. Sin embargo, con el desarrollo de la computación cuántica la relación se revertirá en favor de los *desencriptores*; sin importar los tecnicismos usados por los primeros, siendo uno de los más confiables el trabajo con la función Z de Riemann.

La ciberdefensa, el ciberespacio y los temas relativos a ciberseguridad atraviesan transversalmente por la Figura 1, ya presentada.

Conclusiones

Asistimos actualmente a un magnífico desarrollo de las ciencias e ingenierías como jamás había sucedido en la historia de la humanidad. La más importante tarea de todos aquellos que, de alguna manera, pivotan en torno al conocimiento —esto es, el conocimiento, la información, la educación, la cultura en sentido amplio, la investigación— consiste en mantenerse al día, tanto como sea posible, en el estado-del-arte. La dificultad estriba en los ritmos y los entrelazamientos de dichos desarrollos. Afortunadamente, existen numerosos canales para poder hacerlo. Un solo ejemplo: los *briefings* de la revista *Nature* —una de las más importantes en el mundo— que podemos recibir cada día.

Quisiera subrayarlo: lo mejor de la investigación de punta en el mundo pasa por las ciencias de la complejidad. Basta con echar una mirada a los más importantes centros de pensamiento, en sentido amplio, alrededor del mundo.

Dicho negativamente, las ciencias de la complejidad se ocupan de todo aquello de lo cual la ciencia normal se desentiende. Por ejemplo, movimientos irregulares; o la incertidumbre y la indeterminación; o la impredecibilidad; o los cambios súbitos, imprevistos e irreversibles; o la ruptura de los equilibrios y de control; o bien, las posibilidades e incluso las imposibilidades de lo real; o bien, igualmente lo que queda por fuera de las parametrizaciones. La lista podría ampliarse, sin dificultad alguna.

Para ello, las ciencias han desplegado un dúplice aparato: uno, conceptual; y el otro, instrumental. Sin embargo, ambos son una sola y misma cosa. La distinción es puramente analítica.

Desde cualquier punto de vista, hoy por hoy, la buena inteligencia consiste en la articulación de dos planos, paralelos y complementarios: la inteligencia humana y la inteligencia técnica. La mejor expresión de esta última es la inteligencia artificial. La mejor expresión de la primera... aún no es enteramente claro en qué consista.

La inteligencia artificial configura una de las mejores sedimentaciones de las ciencias de la complejidad (Maldonado, 2023b). La Tabla 1 precisa esta idea:

Tabla1. Relaciones entre *inteligencia artificial* y *vida artificial*

INTELIGENCIA ARTIFICIAL	VIDA ARTIFICIAL
Turing Test: Distinguir la mente humana de la máquina	Entender la vida por medio de la computación
Turing Test: Distinguir la mente humana de la máquina	Entender la vida por medio de la computación
Asociativismo vs. Conexionismo	Algoritmos genéticos
Redes neuronales	<i>Bottom-up</i>
Top-Down	

Fuente: elaboración propia.

La idea que se sigue de la Tabla 1 no es difícil. La inteligencia artificial (IA) y la vida artificial (VA) son, al cabo, una sola y misma cosa; a pesar de sus orígenes en marcos y momentos diferentes.

Así las cosas, bien entendidos, los temas y problemas de ciberespacio y ciberdefensa se fundan en la IA/VA. Todo lo demás es sencillamente operacional.

Son tiempos turbulentos y fluctuantes; son dinámicas inciertas e inestables; en fin, son circunstancias y relaciones caóticas las que demandan nuevas y mejores herramientas de todo orden. Teóricas o conceptuales, tanto como de la mejor tecnología posible o imaginable. Son los retos y problemas los que nos quieren inteligentes; no los propósitos voluntaristas ni las ideas, por bien intencionadas que sean. Pues bien, la inteligencia no es otra cosa que el nombre que le damos a la clave para acceder, si cabe la metáfora, al aprendizaje y la adaptación.

Terminemos con una analogía sutil. Manifiestamente que las ciencias de la complejidad constituyen una revolución científica. Son, dicho sin más ni más, aún, actualmente, ciencia alternativa. La razón no es difícil y la explica mucho mejor la medicina o a biología: ante un cuerpo nuevo, extraño, todo organismo se cierra

inmediatamente al mismo y lo rechaza. El organismo quiere preservarse a sí mismo, y en principio cualquier cuerpo nuevo constituye una amenaza. Pues bien, en verdad, la amenaza no es el cuerpo nuevo: sino el propio organismo, que no pudo desplegar la inteligencia suficiente para conservarse a sí mismo: homeostasis. Lo que ignora el organismo es que no logra sanar y recuperarse, en absoluto, si no modifica sustancialmente su propio metabolismo. De eso va la vida: de procesos y redes metabólicos. Y sí, es posible transformar, modificar el propio metabolismo. Lo que está en juego es la salud y la vida.

Referencias

- Bak, P. (1996). How nature works: *The science of self-organized criticality*. Springer Verlag.
- Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N. R., Sneyd, J., Theraulaz, G., & Bonabeau, E., (2003). *Self-organization in biological systems*. Princeton University Press.
- Gray, J. J. (2003). *El reto de Hilbert: Los 23 problemas que desafiaron a la matemática*. Crítica.
- Kuhn, T. (1996). *La tensión esencial: Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*. Fondo de Cultura Económica.
- Maldonado, C. E. (2010). Una nota sobre criptología y complejidad: Un caso de complejidad y administración. *Innovar*, 20(38), 5-12. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/innovar/article/view/22280/23192>
- Maldonado, C. E. (2013). Un problema fundamental en la investigación: Los problemas P vs. NP. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 4(2), 10-20. <https://doi.org/10.22335/rlct.v4i2.186>
- Maldonado, C. E. (2019a). Sociedad de la información, políticas de información y resistencias: Complejidad, internet, la red Echelon, la ciencia de la información. Desde Abajo.
- Maldonado, C. E. (2019b). Quantum Theory and the social sciences. *Momento*, (59E), 34-47; <https://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/81645/0>
- Maldonado, C. E. (2020a). *Camino a la complejidad: Revoluciones científicas e industriales: Investigación en complejidad*. Asociación Rujotay Na'oj.
- Maldonado, C. E. (2020b). *Pensar: Lógicas no-clásicas* (2.ª ed.). Universidad El Bosque.
- Maldonado, C. E. (2021). Epistemología de la imposibilidad o ciencia de la indeterminación. *Cinta de Moebio*, (70), 44-54. <https://cintademoebio.uchile.cl/index.php/CDM/article/view/61586>
- Maldonado, C. E. (2022). Teoría de los problemas complejos. *Cinta de Moebio*, (74), 109-120. <https://doi.org/10.4067/S0717-554X2022000200109>
- Maldonado, C. E. (2023a). A systemic problem cannot be solved systemically. *Cinta de Moebio*, (77), 79-88. <https://doi.org/10.4067/S0717-554X2023000200079>
- Maldonado, C. E. (2023b). *Inteligencia artificial y ética*. Desde Abajo.
- Maldonado, C. E., & Gómez-Cruz, N. (2011). *El mundo de las ciencias de la complejidad*. Universidad del Rosario.
- Pagels, H. (1991). *Los sueños de la razón: El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Gedisa.
- Prigogine, I. (2003). *Is future given?*. World Scientific.
- Zurek, W. H. (Ed.). (1990). *Complexity, entropy, and the physics of information*: CRC Press.