

Revista Venezolana de Análisis de Coyuntura, 2022 Vol. XXVIII, No. 1 (ene - jun), pp.35-57
ISSN 1315-3617 – E-ISSN 2665-010X

EXPLORANDO LA NATURALEZA DEL CAOS Y LA COMPLEJIDAD EN LAS TEORÍAS DE SISTEMAS

EXPLORING THE NATURE OF CHAOS
AND THE COMPLEXITY IN SYSTEMS THEORY

EDUARDO RAFAEL VIVAS URBÁEZ*
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA, VENEZUELA
<https://orcid.org/0000-0003-2562-1906>

Fecha de recepción: 08/08/2021 Fecha de aceptación: 21/03/22

<https://doi.org/10.54642/RVAC.2022.28.2>

* Profesor agregado de pregrado y postgrado en la Universidad Central de Venezuela (UCV). Jefe del Departamento de Ciencias Económicas y Sociales en la Escuela de Administración y Contaduría de la UCV y jefe de la Cátedra de Metodología en la misma escuela. Licenciado en Administración Comercial, especialista en Gerencia de Proyectos de Investigación y Desarrollo y doctorando en Ciencias Sociales, también en la UCV. Fundador de la cátedra de Ciudades Inteligentes en la UCV. Otras publicaciones incluyen *Innovaciones Urbanas en el Siglo XXI: Sostenibilidad, Ubicuidad y Ciudades Inteligentes* (2020); y *Aproximaciones Teórico-prácticas al Estudio de la Ciudad Inteligente* (2018). Email: eduvivas07@gmail.com, eduardo.vivas@ucv.ve

Resumen

Las teorías de sistemas como cuerpo de conocimiento científico han atravesado sucesivas etapas de desarrollo en más de medio siglo. El estudio de aquellos fenómenos que manifiestan conductas caóticas y complejas caracteriza la etapa más reciente y revela un conjunto de grandes posibilidades y expectativas al momento de formular modelos y explicaciones que den cuenta de su comportamiento. No obstante, existen ambigüedades en el tratamiento de los conceptos de caos y complejidad, en especial desde las ciencias sociales, lo que se traduce en imprecisiones conceptuales, semánticas y teóricas. En consecuencia, es propósito de esta investigación proveer una sólida base teórica a investigadores sobre la relación, significado y alcance de los conceptos de caos y complejidad en las teorías de sistemas. Se lleva a cabo un examen crítico de diferentes aspectos que entrelazan a los sistemas caóticos y complejos, como las interacciones no lineales, el dinamismo y la organización emergente. En conclusión, caos y complejidad son conceptos complementarios, cuya base teórica común es indispensable comprender al estudiar fenómenos que presenten estos comportamientos, sean sociales o naturales.

Palabras clave: *teorías de sistemas, complejidad, caos, sistemas complejos.*

Códigos JEL: A12, B50

Abstract

Systems theory as a body of scientific knowledge has undertaken several stages of development over half a century. Study on phenomena involving chaotical and complex behavior characterizes the more recent stage and also reveals a set of possibilities and expectations at the time of devising models and explanations which accounts for their behavior. However, there are uncertainties dealing with chaos and complexity, specially from social sciences, that lead to semantic, conceptual and theoretical misunderstandings. Therefore, this paper aims to provide a theoretical foundation to other researchers concerning the relationship, meaning and scope among the terms of chaos and complexity in systems theory. Critical assessment about several features linking chaotical and complex systems is performed, such as nonlinear interactions, dynamism and emergent organization. To sum up, chaos and complexity are complementary concepts, whose common theoretical foundation is important in order to study phenomena exhibiting such behavior, whether they are social or natural.

Keywords: *systems theory, complexity, chaos, complex systems.*

JEL codes: A12, B50

INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo XX, las teorías de sistemas se han empleado progresivamente en el estudio de una extensa gama de fenómenos y aplicaciones, tan diferentes entre sí que abarcan desde los circuitos integrados en los dispositivos electrónicos hasta las situaciones de equilibrio no cooperativo entre agentes económicos. Posteriormente, la introducción de los conceptos de caos y complejidad abrió un nuevo abanico de posibilidades para comprender determinados sistemas, entre ellos algunos de carácter social. Las sucesivas etapas recorridas por una sociedad, desde las bandas de cazadores-recolectores hasta la consolidación del Estado, muestran signos de conducta caótica y compleja. Igualmente se observan dichos signos en las fluctuaciones de los mercados de valores en las economías modernas o en el crecimiento de las ciudades.

Sin embargo, cuando se estudian estos y otros sistemas sociales, suelen presentarse ambigüedades al momento de discutir el significado, alcance y grado de relación entre los términos de caos y complejidad dando como resultado imprecisiones o incluso distorsiones de carácter conceptual, semántico y teórico. El conocimiento científico se caracteriza por la claridad y precisión en sus postulados, reduciendo al mínimo los equívocos sobre los términos, significados y teorías que lo constituyen. En ese sentido, esta investigación pretende explorar la interacción entre las nociones de caos y complejidad y suministrar una sólida base teórica para aquellos investigadores interesados en el estudio de estos sistemas, especialmente aquellos provenientes de las ciencias sociales.

Como punto de partida se muestra una breve cronología de los enfoques más destacados en las teorías de sistemas. Seguidamente, se explican los fundamentos teóricos tras los conceptos de caos y complejidad, revelando sus relaciones y diferencias. Posteriormente, y apoyándonos en variadas ejemplificaciones, se analiza la no linealidad y el dinamismo como propiedades de gran importancia en el estudio de sistemas caóticos y complejos. Por último, se determinan los rasgos distintivos de los sistemas complejos, subrayando la importancia de la conducta emergente.

EVOLUCIÓN DE LAS TEORÍAS DE SISTEMAS

El enfoque de sistemas, o pensamiento sistémico, ha experimentado grandes transformaciones a lo largo de su historia que bien vale la pena mencionar brevemente. Sawyer (2005) explica que la trayectoria evolutiva del enfoque de sistemas, especialmente en el área social, puede dividirse en tres grandes olas. La primera de ellas tiene como epicentro a la teoría estructural-funcional de Talcott Parsons, formulada a fines de la década de los cuarenta del siglo XX, la cual se fundamenta ampliamente en los estudios sobre cibernetica llevados a cabo por

Norbert Wiener, específicamente en dos características: la visión del sistema como una estructura jerárquico-funcional y la modularidad. Esta última hace referencia a la capacidad de cada componente del sistema para actuar de manera independiente y, aunque actúan en conjunto para cumplir el propósito del sistema como totalidad, dicha acción en conjunto –o grado de influencia mutua– es limitada y claramente definida. *"In such a system, the behavior of any part is intrinsically determined: it is possible to determine the component's properties in isolation from the other components, despite the fact that they interact"* (Sawyer, 2005, pág. 12).

Posteriormente, en las décadas de los sesenta y setenta, se produjeron exhaustivos intentos para encauzar el enfoque sistémico hacia una posición epistemológicamente más sólida, desarrollando principios y fundamentos de aplicación general a las diferentes disciplinas científicas. La clasificación propuesta por Kenneth Boulding ilustra esta idea agrupando diversos tipos de sistemas de acuerdo con su nivel de complejidad en nueve categorías que, en orden ascendente, van desde los más simples a los más trascendentales. Johansen (1982) resume dicho ordenamiento así:

- Primer nivel: constituido por las estructuras estáticas. Ejemplo: la estructura de los electrones dentro del átomo.
- Segundo nivel: conformado por los sistemas dinámicos simples. Ejemplo: el sistema solar.
- Tercer nivel: integrado por los sistemas ciberneticos o de control. Ejemplo: un presostato.
- Cuarto nivel: compuesto por los sistemas abiertos. Ejemplo: las células.
- Quinto nivel: denominado genético social. Ejemplo: las plantas.
- Sexto nivel: conformado por los animales.
- Séptimo nivel: integrado únicamente por el ser humano.
- Octavo nivel: compuesto por las estructuras sociales. Ejemplo: una institución o una empresa.
- Noveno nivel: constituido por los sistemas trascendentales, aquellos que aún se desconocen.

La célebre obra del biólogo alemán Ludwig von Bertalanffy titulada *Teoría General de Sistemas*, es completamente representativa de esta segunda ola formulando isomorfismos (del griego “formas iguales”), esto es, las pautas estructurales o de comportamiento similares que se encuentran en diferentes fenómenos no relacionados. Por ejemplo, el patrón descrito por la curva exponencial constituye un isomorfismo que explica fenómenos estudiados por disciplinas muy distintas. Al respecto, Bertalanffy argumenta:

En matemáticas, la ley exponencial se denomina "Ley de crecimiento natural", y con $a_1 > 0$ es válida para el aumento del capital por interés compuesto.

Biológicamente se aplica al crecimiento individual de ciertas bacterias y animales. Sociológicamente, es válida para la multiplicación sin restricciones de poblaciones vegetales o animales, en el caso más sencillo la multiplicación de bacterias al dividirse cada individuo en dos, que dan cuatro, etc. En la ciencia social se llama ley de Malthus y representa el crecimiento ilimitado de una población cuya tasa de natalidad es superior a la de mortalidad. (Bertalanffy, 1976, pág. 63)

A diferencia de la anterior etapa del pensamiento sistémico concentrada en la estructura y la estabilidad del sistema, esta segunda ola enfoca su atención en el cambio y el carácter dinámico de los sistemas abiertos. Bertalanffy (1976) define este sistema abierto como aquel que se "...mantiene en continua incorporación y eliminación de materia, constituyendo y demoliendo componentes, sin alcanzar, mientras la vida dure, un estado de equilibrio químico y termodinámico, sino manteniéndose en un estado llamado uniforme (*steady*) que difiere de aquél" (pág. 39). En suma, esta segunda ola incorpora la interacción entre el sistema y su ambiente, el cambio constante, la noción de ausencia de equilibrio estable y la adición de los conceptos del caos y la complejidad, los cuales servirán de basamento para los trabajos ulteriores sobre las teorías de sistemas.

La tercera ola del pensamiento sistémico es la más reciente y su desarrollo se encuentra estrechamente vinculado a los avances en las tecnologías de la información, la informática y la teoría social contemporánea. Gharajedaghi (2011) argumenta que esta tercera ola del pensamiento sistémico se encuentra determinada por la interacción entre los conceptos de interdependencia, autoorganización y decisión en los sistemas socioculturales. Sawyer (2005) expresa que "*What social scientists want to better understand is how successive symbolic interactions among autonomous individuals result in the emergence of collective phenomena*" (pp. 21-22). En ese sentido, tanto el concepto de emergencia como el interés en observar sistemas sociales, pueden evidenciarse en las construcciones teórico-metodológicas en esta ola mediante la profundización del estudio de las interacciones entre los componentes del sistema, producidas en varios niveles; y las propiedades emergentes globales, que se manifiestan en la totalidad.

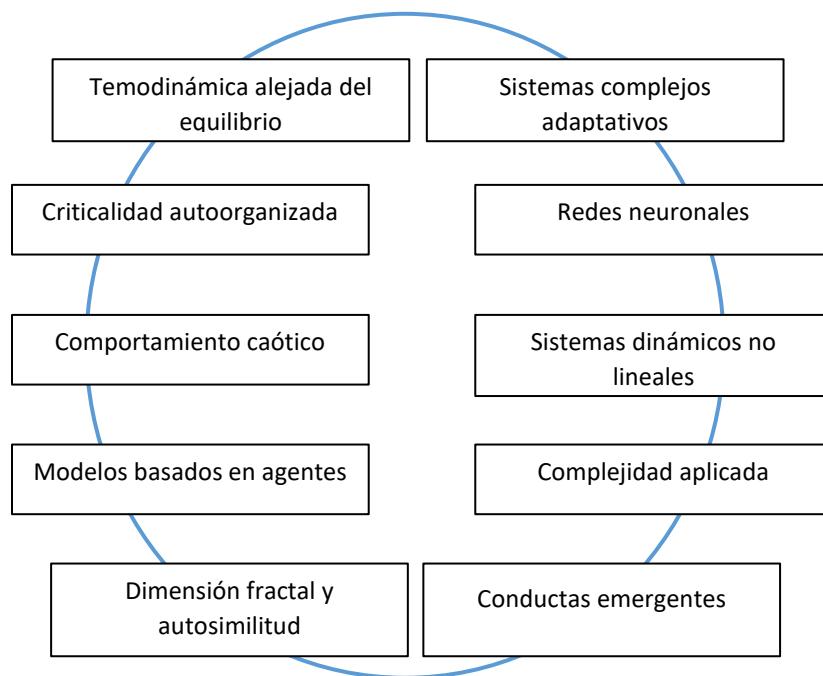
Estas aproximaciones se agrupan frecuentemente bajo los términos genéricos de "teoría de la complejidad" o "estudios de la complejidad". Si bien es cierto que la noción de complejidad –y sistema complejo– es fundamental en el pensamiento sistémico contemporáneo, vale la pena advertir sobre sus implicaciones conceptuales, puesto que dichos términos tienden a simplificar y reducir el alcance y los múltiples campos cubiertos por esta ola. A manera de ejemplos, podemos citar las redes neuronales como producto interdisciplinario de la neurociencia o la teoría de las redes y las catástrofes, siendo ambos enfoques diferentes y aplicados en campos distintos. Además, sobre el término de teoría de la complejidad, Sawyer (2005) agrega que "...this term conflates the second and

third waves and elides important distinctions between modeling technologies such as nonlinear dynamical equations and multi-agent systems” (pág. 23).

En suma, las ideas más relevantes de esta tercera ola son abundantes y altamente diversificadas y cuyo desarrollo persigue una orientación claramente interdisciplinaria y, en algunos casos, transdisciplinaria. “*The field is inherently interdisciplinary, drawing from sociology, genetics, economics, ecology, immunology, city planning, mathematics, embryology, computer science, politics, and many other fields*” (Tranquillo, 2019, pág. 5).

Asimismo, tal interdisciplinariedad constituye una gran fortaleza debido a que, como exponen Torres, Blevins, Bassett & Eliassi-Rad (2021) “...we benefit from the creativity of those [frameworks] from a variety of disciplines, and the resulting myriad approaches make complexity science an adaptable and cutting-edge field” (pág. 437). Reynoso (2006) sintetiza algunas de las ideas más representativas al referirse a “...los sistemas alejados del equilibrio, las estructuras disipativas [...], la dinámica no lineal en la teoría del caos y luego todo eso junto, más o menos armonizado, por piezas enteras o en fragmentos, en el paradigma integral de la complejidad” (p. 11). Algunos de los fenómenos estudiados en esta tercera ola se observan en la figura 1.

Figura 1: Breve síntesis de fenómenos estudiados en la tercera ola del pensamiento sistémico



Fuente: Elaboración propia

DEBATE ENTRE CAOS Y COMPLEJIDAD

Uno de los puntos de controversia epistemológica y metodológica en las teorías de sistemas se encuentra en torno a la relación entre los términos de complejidad y caos. Ya se ha señalado que la complejidad como concepto "paraguas" puede ser un tanto ambiguo y conllevar a imprecisiones (Sawyer, 2005). Sin embargo, también se ha discutido que la complejidad actúa como un paradigma integral (Reynoso, 2006) en el que un cúmulo de aproximaciones diferentes encuentran algún común denominador.

Como en la mayoría de los debates existen posiciones extremas. Por un lado, Paul Cilliers (1998) en su obra *La complejidad y el posmodernismo*, argumenta que el estudio del caos no tiene relación con los sistemas complejos e, incluso, es

inútil para comprenderlos: “*My claim is rather that chaos theory, and especially the notions of deterministic chaos and universality, does not really help us to understand the dynamics of complex systems*” (pág. IX). Por otro lado, Carlos Reynoso (2006) en su texto *Complejidad y caos*, explica que los estudios del caos se concentran en los fractales, los atractores extraños y la dinámica no lineal mientras que los estudios de la complejidad abarcan las propiedades emergentes y las cualidades de los sistemas complejos adaptativos. No obstante, apunta que “...el problema es que los más interesantes de éstos [los sistemas complejos] son los que exhiben conducta caótica, atractores extraños y no linealidad.

Hay zonas inciertas entre ambos espacios, por cierto; el más notorio concierne a los fenómenos de auto-organización, criticalidad y emergencia” (Reynoso, 2006, pág. 204). Asimismo, Joe Tranquilo (2019) comenta que al encontrarnos con sistemas complejos “*Along the way, we will study tools that include chaos and fractals, game theory, networks, agent-based models and information theory. These tools will help us approach some important questions in new ways and find common patterns...*” (pág. 1).

Desde este punto de vista, la complejidad –o ciertos sistemas complejos– pueden presentar características caóticas, evidenciándose una sólida relación entre ambos conceptos. El bioquímico Roger Lewin y el científico computista Christopher Langton, perteneciente al Instituto Santa Fe (SFI por sus siglas en inglés)¹, argumentan que los estudios del caos pueden considerarse como un subconjunto de la complejidad, en la medida que se trabaja con sistemas dinámicos no lineales (Lewin, 1995). Con excepción de la posición extremadamente excluyente expuesta por Cilliers, se concluye no sólo la existencia de una relación entre la complejidad y el caos, sino una complementariedad entre ambos conceptos que impulsa una aproximación mixta hacia diversos fenómenos con la finalidad de desarrollar una aprehensión más acertada de la realidad. Un término repetido en este artículo es el de sistema dinámico no lineal. Examinemos inicialmente la noción de sistema dinámico.

Un sistema dinámico hace referencia a todo sistema que evoluciona en el tiempo de acuerdo con una regla concreta que determina su comportamiento. Desde una perspectiva matemática, una variable que cambia a lo largo del tiempo es un sistema dinámico, y esto puede cotejarse fácilmente con una función iterada. Esto es, “...we start with a number and apply a function to it to get a new number. Then we take that new number and apply the function to it to get yet another number. Then we apply the function to this new number, and so on” (Feldman, 2012, pág. 17). Por ejemplo, para iterar la función cuadrática $f(x) = x^2$ se selecciona un valor que servirá como variable inicial, a la cual denominaremos

¹ El SFI es una institución científica con sede en Nuevo México, EUA, fundada en 1984 con el objetivo de desarrollar investigación exhaustiva e interdisciplinaria sobre los sistemas dinámicos no lineales, complejos y adaptativos que forman parte de múltiples campos de la realidad.

“semilla”. Supóngase entonces que esta semilla es $x_0 = 3$. Al realizar la iteración se obtiene:

$$\begin{aligned}x_0 &= 3 \\x_1 &= 9 \\x_2 &= 81 \\x_3 &= 6561 \\x_4 &= 43046721\end{aligned}$$

Estas iteraciones constituyen una órbita o itinerario y representan los cambios en el tiempo experimentados por el sistema. En este caso, es válido expresar que, para cualquier semilla mayor a 1, la órbita resultante tenderá hacia el infinito, evidenciándose así la regla que rige el comportamiento del sistema. Más allá de las abstracciones matemáticas se presentan fenómenos concretos que cumplen estas condiciones. Los planetas dentro del sistema solar modifican su posición con el tiempo, el corazón de un ser vivo late con un ritmo periódico y el clima del mundo obedece a ciertas reglas; todos estos son ejemplos de sistemas dinámicos (Mitchell, 2009).

NO LINEALIDAD: PROPIEDAD FUNDAMENTAL EN CONDUCTAS CAÓTICAS Y COMPLEJAS

La noción de linealidad es modular en el estudio de los sistemas dinámicos y su origen se halla también en la disciplina matemática. En una función lineal la propiedad aditiva se cumple, esto es: $f(kx) = kf(x)$ lo que implica que la variación en el tiempo de la función es proporcional, dando como resultado una línea recta si decidiera graficarse. ¿Qué consecuencias genera esto en un sistema concreto? Mitchell (2009) lo explica claramente al afirmar que “*A linear system is one you can understand by understanding its parts individually and then putting them together [...] The whole is equal to the sum of the parts*” (págs. 22-23). Mientras que Feldman (2012) añade “...*for a function to be linear it must be the case that if A is a solution then cA is as well, where c is any number*” (pág. 151). De manera que, en un sistema lineal, la interacción entre los componentes puede expresarse como un conjunto de agregados, siendo la totalidad una sumatoria de las interacciones entre los componentes. En consecuencia, la modularidad es una característica presente en los sistemas lineales.

En cambio, en una función no lineal las variaciones en el tiempo no son proporcionales. Respecto a este planteamiento, Pérez (2015) acota que “...en una función no lineal la función de una suma no es la suma de las funciones. El ejemplo más sencillo de función no lineal es x^2 , ya que $(x_1 + x_2)^2 \neq x_1^2 + x_2^2$ ” (pág. 94). Por tanto, en una función no lineal la propiedad aditiva no se cumple. En ese orden de ideas, Mitchell (2009) señala que “*A nonlinear system is one in which the whole is different from the sum of the parts*” (pág. 23).

La relación de interdependencia entre los componentes impide que el sistema pueda descomponerse en sus partes y expresarse como la sumatoria de las mismas (Feldman, 2012), por lo tanto, la modularidad en estos sistemas es muy reducida o inexistente. Podría suceder que pequeñas interacciones entre los componentes den lugar a profundos cambios en la totalidad, o viceversa, violentas relaciones entre los componentes apenas alteran la totalidad del sistema. Un caso especial se produce cuando la totalidad manifiesta propiedades únicas y exclusivas –de orden superior– que no pueden ser reproducidas por los componentes –de orden inferior– confiriéndole al sistema un comportamiento singular.

Estos son los sistemas complejos, aquellos donde la totalidad es expresada como una estructura emergente y mayor a la suma de los componentes del sistema. Por ejemplo, a través del aprendizaje y el uso repetido de un conjunto limitado de signos y reglas, los integrantes de un grupo social logran materializar una totalidad potencialmente infinita de expresiones y significados, el lenguaje, como estructura emergente en el proceso comunicacional. En palabras de Atkinson, Mills y Smith (2019), podemos consider la “*...complexity as an inherent and objective property of a linguistic system*” (pág. 2).

La noción de no linealidad es fundamental para los estudios tanto de complejidad como del caos, puesto que los sistemas escrutados por ambos manifiestan dicha propiedad. Todo sistema complejo y caótico presenta un comportamiento no lineal, no obstante, el recíproco lógico no aplica, puesto que no todo comportamiento no lineal implica la existencia de un sistema complejo o caótico. Por ejemplo, el ya mencionado sistema dinámico de la función cuadrática x^2 exhibe un comportamiento no lineal pero no caótico.

Es importante subrayar un aspecto sobre la linealidad que ha sido ampliamente difundido en cierta literatura académica y de divulgación, “...en el área de influencia de la filosofía de corte posmoderno tergiversar la idea de no-linealidad se ha vuelto un lugar común, tan común que las desmentidas correspondientes han devenido un pujante género literario” (Reynoso, 2009, pág. 21). Ciertamente, se ha desarrollado una narrativa concentrada en la asignación de otro significado al concepto de linealidad, y éste consiste en una clase particular de razonamiento sobre la realidad o un enfoque específico para enfrentar una situación. Al respecto, Feldman (2012) argumenta:

But there is a somewhat more metaphorical and less literal sense in which “linear” and “nonlinear” are used to describe ways of thinking and approaches to problems. In this usage, a linear approach is often associated with reductionism, while nonlinear approaches are associated with less reductive or holistic views. (pág. 148)

Desde esta perspectiva, la relación linealidad-reducciónismo se convierte en un adversario indeseable que empaña la acción cognitiva y distorsiona la

percepción de los fenómenos en su totalidad. En uno de sus conocidos textos, el sociólogo Edgar Morin afirma que esta visión simplifica considerablemente la realidad y que sólo mediante el desarrollo de la complejidad se logran suprimir las "...consecuencias mutilantes, reduccionistas, unidimensionalizantes y finalmente cegadoras de una simplificación que se toma por reflejo de aquello que hubiere de real en la realidad" (Morin, 1990, pág. 11). El "pensamiento lineal" es así concebido como un obstáculo al conocimiento, un remanente retrógrado del paradigma reduccionista que, aunque dio origen a la ciencia tal como la conocemos hoy en día, se muestra insuficiente y obsoleto para explicar los fenómenos actuales, a juicio de estos autores asociados al enfoque posmoderno. El filósofo Miguel Martínez sintetiza la esencia de esta perspectiva con gran precisión en el siguiente párrafo:

El método científico tradicional ha seguido la lógica lineal unidireccional, ya sea en una "línea" deductiva como en una inductiva. La mayor debilidad de la lógica lineal es su irreabilidad, es decir, su lejanía de la realidad concreta, especialmente si se trata de problemas de las ciencias humanas, donde no se da únicamente una variable independiente, una dependiente y una relación de causalidad, sino que siempre entran en juego docenas de variables que no son lineales, ni unidireccionales, ni solamente causales, sino variables que interactúan mutuamente y entre las cuales se da toda clase y tipo de relaciones: de causa, condición, contexto, soporte, aval, secuencia, asociación, propiedad, contradicción, función, justificación, medio, etcétera. (Martínez, 2009, pág. 78)

Puesto que nos encontramos analizando las implicaciones de conceptos importantes para las teorías de sistemas es menester aclarar estas tergiversaciones, especialmente en un término modular como la linealidad. El argumento de Martínez sostiene que la linealidad ha definido al método científico tradicional como si se tratara de un enfoque o aproximación epistemológica. Ya se ha comentado que la linealidad es una propiedad manifestada por un sistema –sea este físico, biológico, social o mecánico– que explica el grado de interdependencia entre la totalidad y los componentes. Si el sistema puede explicarse como la suma de las interacciones entre los componentes, es lineal. Por el contrario, si dicho sistema no puede explicarse como la suma de los componentes, entonces no es lineal. En consecuencia, la linealidad no es una aproximación epistemológica ni mucho menos una lógica de pensamiento particular.

Implícita en las ideas de Martínez y explícita en el planteamiento de Morin, se encuentra una profunda crítica al enfoque reduccionista, también denominado atomista o mecanicista, el cual fundamenta su acción en el análisis de los componentes y la formulación de leyes que explican su comportamiento para comprender la totalidad del fenómeno en estudio. Como contrapartida al reduccionismo surgió el holismo, definido como el enfoque "...that there are some complex systemic phenomena that must be studied in their own terms; that

mechanistic, reductionist methods are not applicable to such systems; and that no part can be understood except in its relation to the entire system" (Sawyer, 2005, pág. 28).

Las limitaciones del reduccionismo son confirmadas por las palabras de Bertalanffy (1976) "La tecnología y la sociedad modernas se han vuelto tan complejas que los caminos y medios tradicionales no son ya suficientes, y se imponen actitudes de naturaleza holista, o de sistemas, y generalista, o interdisciplinaria" (pág. xiv). Entonces, ¿se justifica la condena al reduccionismo de obsoleto e insuficiente? ¿Es el enfoque sistémico el holismo contemporáneo? Cuando se estudian sistemas no lineales como el tiempo atmosférico o la economía de una ciudad, donde la totalidad no es una suma de los componentes, sus interacciones particulares producen interesantes comportamientos generalmente contra intuitivos.

El tiempo atmosférico es extremadamente sensible a las condiciones de presión, temperatura y humedad presentes en su estado inicial –como se verá más adelante– y la economía refleja grandes redes de intercambio de bienes, dinero e información que afectan las decisiones individuales de cientos de miles o quizás millones de habitantes. No obstante, el análisis como herramienta figura en ambos casos.

Para generar un pronóstico meteorológico es necesario llevar a cabo una revisión minuciosa del área en cuestión, analizando a fondo sus componentes geográficos, hidrológicos, físicos, e incluso geofísicos, con la finalidad de construir una descripción razonable del sistema. De la misma manera, no se puede llegar a comprender el abundante flujo de toda clase de rubros y la constitución de redes sectoriales dentro de la economía de una ciudad sin antes estudiar los actores y estructuras que integran dichas redes (Vivas, 2020). Empresas, consumidores, entidades gubernamentales, bancos, industrias manufactureras, intermediarios y proveedores actúan dentro de un marco técnico-jurídico ajustado a reglas específicas, las cuales se determinan y analizan para entender el rol de cada elemento dentro del sistema completo que representa la economía.

Son acertadas las palabras de Feldman (2012) cuando argumenta que "*While reductionism should be approached with caution, I nevertheless think there is much good that can be said about reductive approaches. The reductive approach that has characterized much of modern physical science has been unarguably successful*" (pág. 149). Y no únicamente en la física, pues toda la ciencia ha desplegado su potencial para descifrar los más escurridizos misterios de la naturaleza y la cultura en sus variadas disciplinas, naturales y sociales respectivamente.

En ese sentido, el enfoque reduccionista no se encuentra obsoleto, sino que forma parte esencial del pensamiento sistémico contemporáneo junto con el enfoque holista –o emergente– que observa las propiedades de la totalidad global.

“Tension exists between the reductionistic and holistic approaches to understanding the world. One is not better than the other; they simply have different purposes” (Tranquillo, 2019, pág. 20). Así, abandonando las posiciones extremas y fundamentalistas, ambos enfoques, más que antagónicos, son complementarios en la comprensión de los sistemas. El propio Bertalanffy advertía de los efectos desastrosos producidos por estos radicalismos intransigentes sobre la actividad científica:

O, hablando más en general, el tipo analítico de mente, ocupado en lo que se llaman interpretaciones «moleculares» –la resolución, la reducción de fenómenos a componentes de índole elemental–, y el tipo holista, que labora con interpretaciones «molares» –que se interesa en las leyes que rigen el fenómeno como un todo. Mucho ha sido dañada la ciencia a fuerza de oponer un aspecto al otro, y así, en el enfoque «elementalista», desdeñar y negar caracteres ostensibles y de lo más importantes, o, en el caso holista, rechazar la importancia y necesidad fundamental del análisis. (Bertalanffy, 1976, pág. 250)

En el planteamiento de Martínez se hace referencia a la relación entre linealidad, número de variables y multicausalidad. Que un fenómeno sea producido por una o varias causas no tiene en absoluto que ver con la propiedad de la linealidad. Ni la unicausalidad ni la multicausalidad se correlacionan con la linealidad. Además, en dicho argumento se evidencia una utilización imprecisa del concepto de variable, el cual parece asociarse, por una parte, a los eventos que condicionan el comportamiento del sistema y, por otra, a los componentes de éste que interactúan mutuamente.

Vale aclarar qué son los componentes –o elementos– aquellos que interactúan dentro del sistema y son susceptibles de manifestar atributos. Las variables y las constantes forman parte de los atributos de un sistema, esto es, las propiedades que lo distinguen. “Los atributos invariantes o constantes son los que permanecen en el tiempo y espacio objeto de estudio, mientras los variables son los que cambian con el tiempo y/o espacio” (Thonon, 2014, pág. 55). Otra noción compartida en la narrativa posmoderna es que un comportamiento no lineal implica muchos elementos y relaciones dentro del sistema, mientras que la “simplicidad” de las conductas lineales no admite tales interacciones. De hecho, una enorme cantidad de elementos no implica de ninguna manera un comportamiento no lineal.

El famoso problema de los tres cuerpos constituye un ilustrativo ejemplo. “El problema de los tres cuerpos consiste en encontrar las trayectorias de tres cuerpos masivos sometidos a mutua atracción gravitatoria” (Pérez, 2015, pág. 19). Las órbitas descritas por los planetas del sistema solar manifiestan esta situación viéndose afectadas sus trayectorias debido a las interacciones gravitacionales entre, por ejemplo, dos planetas y el sol. Con el paso del tiempo, la suma de las variaciones en las órbitas en cuestión no da como resultado una trayectoria

proporcional a dichas variaciones, en su lugar, el sistema presenta un comportamiento completamente diferente, el cual no atiende a la propiedad de la linealidad y provoca efectos aparentemente erráticos e incluso aleatorios.

No obstante, estos efectos son ciertamente aparentes, puesto que el comportamiento del sistema se ajusta a unas reglas establecidas por la dinámica no lineal y caótica. Al respecto, Pérez (2015) explica “Y esas trayectorias no regulares impedían resolver de manera general el problema de los tres cuerpos y, por extensión, el del sistema solar como un todo. Hoy en día llamaríamos caóticas a estas soluciones” (pág. 20). Por lo visto, un sistema con sólo tres elementos puede manifestar una conducta no lineal.

Examinemos ahora cómo otro sistema con una cantidad algo mayor de elementos puede exhibir una conducta completamente lineal. Un teléfono celular actual es un sistema diseñado para desempeñar una amplia gama de funciones, las cuales van desde transmitir y recibir todo tipo de mensajes (voz, texto, imágenes, videos) hasta calcular la posición geográfica y sincronizar datos en tiempo real. Para ello, el dispositivo está constituido por un cúmulo de totalidades interdependientes y que cuentan a su vez con elementos, relaciones y propiedades específicas. Así, “...para que un sistema σ' sea un subsistema de σ , es necesario que los elementos y las relaciones de σ' sean también elementos y relaciones de σ , y que el ambiente de σ' incluya el ambiente de σ ” (Thonon, 2014, pág. 45). Por lo tanto, dichas totalidades las trataremos como subsistemas.

En este caso de estudio, el teléfono celular *Samsung Galaxy S3 GT-I9300* está integrado por los siguientes subsistemas: encendido, procesador y memoria, WiFi, radio FM, programa de audio, transmisión y recepción, control de periféricos, sensores (magnético, acelerómetro, barómetro, giroscopio y procesamiento de imagen RGB), micrófono, posicionamiento geográfico (GPS), NFC², pantalla LCD, cámara principal y cámara secundaria (Samsung Electronics, 2012). De acuerdo con los datos suministrados en el manual de servicio del modelo estudiado, un total aproximado de 900 partes discretas y circuitos integrados se encuentran contenidos en este sistema. No obstante, cabe acotar que un circuito integrado puede contener desde unos pocos componentes hasta miles de ellos, por lo que esa cifra puede incrementarse a millares o incluso decenas de miles de componentes.

De tal manera que cada subsistema se encuentra conformado por una considerable cantidad de elementos, con atributos y relaciones muy diversas entre ellos. En ese sentido, el teléfono celular es un sistema altamente sofisticado, extraordinariamente variado y compuesto por un increíble número de elementos, pero que puede ser comprendido a partir de la sumatoria de todos sus

² NFC o Comunicación de Campo Cercano por sus siglas en inglés, es una tecnología inalámbrica que permite al teléfono celular intercambiar datos mediante radiofrecuencia (RF), sin necesidad de utilizar internet.

componentes; por lo tanto, es un sistema lineal. Para concluir sobre este punto, Reynoso (2009) expresa que “La linealidad no es inherente a una mecánica simplista ni es el estigma de una inteligencia inferior; tampoco la no linealidad identifica a lo complejo, ni siquiera en las acepciones laxas de la palabra” (pág. 20).

EL CAOS COMO UNA CLASE DE SISTEMA DINÁMICO NO LINEAL

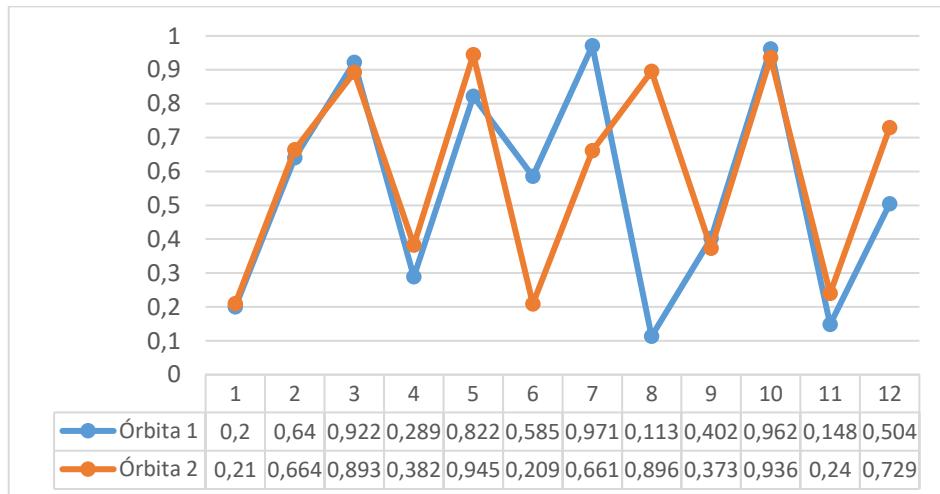
La no linealidad y el dinamismo son condiciones necesarias más no suficientes para que un sistema sea comprendido como complejo o caótico. Pero ¿cuáles condiciones son suficientes para definir a estos sistemas? En lo que atañe a un sistema caótico, el propio término de caos debe ser aclarado para no dejar lugar a ambigüedades. Tradicionalmente, se emplea el caos como sinónimo de indeterminación, anarquía y confusión. Incluso el diccionario de la RAE (2018), en sus dos primeras acepciones, define al caos como un estado desordenado previo al nacimiento del cosmos y como una situación de confusión y desorden, respectivamente. Sin embargo, desde el punto de vista científico, el caos hace referencia a un sistema “*...governed by fixed, precise rules, nevertheless behaves in a way which is, for all practical purposes, unpredictable in the long run*” (Feldman, 2012, pág. 3). Pérez (2015) añade que “El caos determinista se presenta cuando un sistema sometido a leyes o reglas perfectamente determinadas se comporta de manera errática y, aparentemente, aleatoria” (p. 9).

De tal manera que un sistema regido por un conjunto de normas explícitas y precisas puede dar origen a una conducta impredecible en el tiempo, no obstante, dicha imprevisibilidad no se ajusta a los parámetros estudiados por el análisis estadístico, “El comportamiento dinámico de un sistema caótico determinista tiene características diferentes a las de un sistema puramente aleatorio” (Pérez, 2015, pág. 9). Incluso, durante el inicio de la tercera ola del pensamiento sistémico entre las décadas de los setenta y noventa, se crearon numerosas herramientas que “*could distinguish between random and chaotic and as a result a number of systems that were previously thought of as random being reclassified as chaotic*” (Tranquillo, 2019, pág. 86).

Si bien la definición de sistema caótico ya ha tomado forma, aún hace falta incluir un aspecto sumamente importante: la noción de dependencia sensible a las condiciones iniciales, también conocida como “efecto mariposa”. Feldman (2012) sostiene que “*The main idea of SDIC [dependencia sensible a las condiciones iniciales por sus siglas en inglés] is that small changes in the initial condition can make a large difference in the orbit's behavior*” (pág. 89). Esto significa que el comportamiento de todo sistema caótico se encuentra fuertemente atado a las condiciones presentadas por éste al inicio, es decir, la semilla o variable x_0 . Veamos un ejemplo gráfico.

En la figura 2 se observan dos órbitas o itinerarios a lo largo de diez iteraciones. Ambas funciones poseen exactamente los mismos parámetros excepto sus condiciones iniciales (semillas)³. La primera órbita (curva azul) tiene como semilla a $x_0 = 0,2$ mientras que la segunda órbita (curva anaranjada) posee como semilla a $y_0 = 0,21$. Recordando que la semilla en un sistema dinámico corresponde a su condición inicial, entre ambas curvas apenas existe una diferencia de una centésima. No obstante, en la medida que se va iterando, la curva anaranjada se va separando más y más de la curva azul, mostrando un comportamiento completamente distinto. Para la quinta iteración, nadie podría suponer que dichas curvas partieron de unas condiciones iniciales casi idénticas. Esto implica, en palabras de Lewin (1995), que “En los sistemas no lineales, entradas pequeñas pueden tener consecuencias espectacularmente grandes. A menudo, se ha hecho referencia a esto con el nombre de efecto mariposa” (pág. 24). Por consiguiente, todo sistema caótico es determinista, no lineal y sensiblemente dependiente de las condiciones iniciales, aunque no son las únicas características, como señala Pérez (2015), “Además de la sensibilidad a las condiciones iniciales, los sistemas caóticos deterministas exhiben otras propiedades características como son la recurrencia, la autosimilaridad y la fractalidad” (pág. 9).

Figura 2: Dependencia sensible a las condiciones iniciales



Fuente: Elaboración propia

³ Se tomó como modelo la ecuación logística $f(x) = rx(1 - x)$, siendo la constante $r = 4$.

EL REINO DE LA COMPLEJIDAD

En un sistema no lineal la totalidad no puede ser comprendida como una sumatoria de los componentes del sistema. Como caso especial, aparecen algunos sistemas donde la totalidad resultante involucra propiedades de orden superior las cuales distinguen claramente a dicha totalidad de las interacciones producidas entre los componentes. Chris Langton lo explica diciendo que "...las interacciones en un sistema dinámico producen un orden global emergente, con todo un conjunto de propiedades fascinantes" (Lewin, 1995, pág. 25).

Este comportamiento especial caracteriza a los denominados sistemas complejos que gran atención han merecido en las últimas décadas y cuyo estudio constituye el eje de la tercera ola del pensamiento sistémico. Por ejemplo, fenómenos como "...cellular reactions in photosynthesis, food webs in ecology, transactions in local markets, interconnected worldwide trading in economics, and various technologies such as the Internet and the power grid" (Torres et al, 2021, pág. 437). Aunque en párrafos anteriores se ha discutido el significado del "paradigma de la complejidad" y cómo este podía servir de concepto aglutinador para múltiples concepciones epistemológicas y metodológicas afines –incluyendo el caos–, es preciso para el propósito de esta investigación aclarar el concepto y liberarlo de posteriores ambigüedades y malinterpretaciones.

El acercamiento a la complejidad no es tarea sencilla. "*The literature abounds with different, and sometimes conflicting, definitions. To some it is structural complexity (...) To others it is functional complexity (...) complexity to a game theorist means something different than it does to a thermodynamicist*" (Tranquillo, 2019, pág. 364). En una divertida anécdota, Melanie Mitchell, siendo profesora del SFI en 2004, narra la estupefacción producida en todos los nuevos estudiantes la discusión sobre la definición del concepto de complejidad durante un seminario de bienvenida al instituto, en el cual cada uno de los profesores ofreció una definición diferente sobre complejidad. "...*the faculty of the Santa Fe Institute –the most famous institution in the world devoted to research on complex systems– could not agree on what was meant by complexity...*" (Mitchell, 2009, pág. 94).

A la definición del concepto se añade otra dificultad, su medición. Aunque pareciera un esfuerzo fútil, determinar las operaciones y procedimientos necesarios para medir una variable podría arrojar luces sobre un concepto teórico que aún no ha sido captado del todo, y es justamente esto la esencia de la definición operacional (Hernández Sampieri, Fernández, & Baptista, 2010). De hecho, Murray Gell-Mann (1995), reconocido físico y especialista en sistemas complejos, argumenta que "*In fact, a variety of different measures would be required to capture all our intuitive ideas about what is meant by complexity and by its opposite, simplicity*" (pág. 16).

En efecto, la complejidad es medida desde diferentes perspectivas, tal como lo expresa el investigador del MIT, Seth Lloyd, en un breve artículo titulado

Measures of Complexity: A Nonexhaustive List. Lloyd (2001) explica que al momento de abordar la complejidad del objeto de estudio –sin importar cuál sea éste– los investigadores suelen realizarse estas preguntas: ¿Qué tan difícil es su descripción? ¿Qué tan difícil es su creación? ¿Cuál es su grado de organización? A partir de estas preguntas se generan más de 40 medidas distintas de la complejidad agrupadas en cuatro categorías. Veamos algunas de ellas:

- Dificultad en la descripción: información, entropía, dimensión, longitud mínima de descripción, contenido de información algorítmica.
- Dificultad de creación: complejidad computacional, profundidad termodinámica, costo.
- Grado de organización: complejidad efectiva, dimensión fractal, complejidad gramatical, información almacenada, organización.
- Términos relacionados: autoorganización, el filo del caos y sistemas complejos adaptativos.

Así, la complejidad en un sistema puede ser medida mediante la cantidad de información que produce, la entropía que alcanza, su capacidad de organizarse, etc. La ausencia de consenso en la medición de una variable modular como la complejidad podría generar, para algunos, serias dudas acerca de la eficacia de los estudios sobre los sistemas complejos.

¿Son realmente efectivos? Para responder esta pregunta valdría la pena pasearse por diferentes disciplinas científicas y examinar con mirada aguda los conceptos, definiciones y teorías que las integran. Se descubrirá que en gran número de ellas prevalecen pluralidad de concepciones, divergencias entre los especialistas y abundantes definiciones sobre, incluso, los términos más básicos. Pregunte a un antropólogo por el significado de cultura, a un psicólogo por el significado de mente, a un astrónomo por el de planeta⁴ o a un físico por el de tiempo y obtendrá tantas aproximaciones como especialistas consultados. Cada definición toma en consideración referentes distintos e intenta aprehender una parte de la esencia del concepto, por lo tanto, es imposible formular una definición que contemple absolutamente todas las aristas de un término. En ese orden de ideas, Mitchell (2009) argumenta que “*The diversity of measures that have been proposed indicates that the notions of complexity that we’re trying to get at have many different interacting dimensions and probably can’t be captured by a single measurement scale*” (pág. 111).

En su artículo publicado originalmente en 1948, el matemático Warren Weaver (1991), reconocido por sus aportes a la teoría de la comunicación, explica que la

⁴ Sobre este punto bien vale acotar que en el año 2006 aún no había una definición estandarizada del concepto de planeta, fecha en que la Unión Astronómica Internacional propuso su formulación. Hasta ese momento, Plutón era considerado el noveno planeta del sistema solar; pero, a raíz de la nueva definición ya no lo es. Ahora, el sistema solar cuenta con ocho planetas y Plutón pertenece a la categoría de “planeta enano”.

ciencia ha estudiado tres clases de problemas: los relacionados a la simplicidad, los de complejidad desorganizada y los de complejidad organizada. Respecto a la primera clase, los problemas de simplicidad, tratan fundamentalmente de las teorizaciones y relaciones entre sistemas de pocas variables, elementos que asentaron la práctica científica, en especial la física, desde el siglo XVII hasta los inicios del XX y dieron al mundo invalables tecnologías como el teléfono, la radio, el motor de combustión interna, el avión, la planta de energía hidroeléctrica, entre otras (Weaver, 1991).

La segunda clase comprende los problemas de complejidad desorganizada en los que se introducen los métodos de la disciplina estadística, de vital importancia para el estudio de situaciones que exceden largamente el número de variables de los problemas simples –tres o cuatro variables– y, en su lugar, presentan cientos, miles o millones de variables. En un escenario de estas características la descripción y predicción del comportamiento de una variable se vuelve extremadamente difícil o imposible, sin embargo, no sucede lo mismo con los grandes grupos de variables (por ejemplo, los clientes de un restaurante y la probabilidad de que pidan el mismo postre), los cuales actúan como una “totalidad” y obedecen a tendencias y patrones. Al respecto, Weaver (1991) sostiene:

It is a problem in which the number of variables is very large, and one in which each of the many variables has a behavior which is individually erratic, or perhaps totally unknown. However, in spite of this helter-skelter, or unknown, behavior of all the individual variables, the system as a whole possesses certain orderly and analyzable average properties. (pág. 451)

A manera de ejemplo, imagínese un globo, el cual es llenado progresivamente con gas de helio para que aumente de tamaño. No se produce ninguna interacción entre los componentes del helio dentro del globo más allá de la estrictamente molecular, por lo tanto, no hay una organización ni un principio de orden específico. Como sucede con todo gas en un espacio cerrado, las partículas del helio irán ocupando todo el espacio disponible y su distribución obedecerá a las leyes estadísticas de las probabilidades.

La tercera clase corresponde a los problemas de complejidad organizada. Y es precisamente este último término, la organización, lo que distingue a estos problemas. Los clientes en el restaurante, los números ganadores en la ruleta de un casino o la distribución de un gas en el espacio constituyen totalidades cuyos componentes actúan con base a las leyes de la probabilidad y no a un conjunto de reglas específico.

Por su parte, el genoma de un organismo, el cerebro y la economía de una nación albergan elementos de muy diversa naturaleza que se organizan mediante elevadas redes de interacciones para producir una estructura más elaborada y, además, diferente de sus componentes, la cual no puede ser explicada

únicamente utilizando las leyes de las probabilidades. Weaver (1991) añade “*They are all problems which involve dealing simultaneously with a sizable number of factors which are interrelated into an organic whole. They are all, in the language here proposed, problems of organized complexity*” (pág. 452). La particular interrelación dentro del sistema es determinada por el nivel de organización de los componentes en su interior, los cuales originan esa “totalidad orgánica” emergente.

En ese sentido, la emergencia como propiedad de un sistema complejo se produce a partir de la interacción activa y organizada de sus elementos. Tranquillo (2019) reafirma la estrecha relación entre las interacciones y la emergencia al señalar que “*With each new connection, there is the possibility of new emergent behaviors*” (pág. 167). Por su parte, Holland (1998) argumenta que la “*Emergence is above all a product of coupled, context-dependent interactions [...] However, we can reduce the behavior of the whole to the lawful behavior of its parts, if we take the nonlinear interactions into account*” (pág. 122).

Esta enorme importancia concedida a los componentes de la que habla Holland es indispensable para comprender la dinámica de cualquier sistema complejo puesto que, a diferencia de los sistemas no emergentes, los componentes y sus acciones poseen un gran peso en el comportamiento de la totalidad compleja. En consecuencia, las múltiples interacciones entre los componentes, obedeciendo un patrón de organización, dan origen a una nueva estructura global emergente. Pero, posteriormente, esta estructura –con propiedades de carácter global para el sistema– afecta el comportamiento de los componentes. Veamos un ejemplo, con la institución social del matrimonio.

El matrimonio es un ritual practicado por miles de culturas alrededor del mundo y constituye la plataforma para la edificación de la familia en gran parte de la historia. Los individuos de un grupo social se organizan mediante el establecimiento de códigos, ritos, signos, instituciones y normas que regulan el comportamiento de cada persona dentro de esa sociedad. El matrimonio es un producto de esa organización, una institución emergente que manifiesta parte de la cosmovisión específica del grupo social y, en consecuencia, fija atribuciones, privilegios y restricciones para los cónyuges.

Por ejemplo, sólo pueden contraer matrimonio un hombre y una mujer; la adquisición de bienes pertenece a la comunidad conyugal; los hijos heredan el apellido de los padres; o el adulterio es censurado por el grupo social y es causal de disolución del matrimonio. Ahora bien, esta institución no solamente regula a las personas que forman actualmente parte de la sociedad, sino que se extiende a las próximas generaciones influyendo también sobre las percepciones y decisiones de estos individuos. Por lo tanto, la estructura emergente afecta a los componentes. Sin embargo, la historia no toca su fin. Dado que los individuos se encuentran en permanente interacción pueden suscitarse cambios que alteren la

organización del sistema. Las personas modifican sus concepciones e ideas desafiando el determinante global prohibitivo del matrimonio únicamente entre una mujer y un hombre. La interacción se intensifica, el conflicto se agudiza y, eventualmente, se logra una transformación en el patrón organizativo de la sociedad, el matrimonio igualitario o entre personas del mismo sexo. La estructura emergente ha sido modificada por los componentes.

CONCLUSIONES

Las teorías de sistemas (ciencias de sistemas o pensamiento de sistemas) son un cuerpo de conocimiento científico dedicado al estudio de los patrones que surgen de las interacciones entre agrupaciones de elementos. Dichas interacciones presentan semejanzas entre fenómenos de diversa índole, razón por la cual las teorías de sistemas enlazan diferentes disciplinas científicas. En más de medio siglo de historia reciente, el pensamiento sistémico ha atravesado tres etapas sucesivas de desarrollo significativo: la primera concentrándose en la estructura del sistema; la segunda en su relación con el ambiente; y la tercera en las interacciones no lineales y emergentes entre los componentes.

Existe una frontera difusa entre los comportamientos caóticos y complejos, lo que se evidencia en las controversias epistemológicas sostenidas por diferentes posiciones de especialistas, que recorren desde una separación absoluta entre ambos conceptos hasta la fusión de los mismos. No obstante, y basándonos en las explicaciones expuestas, caos y complejidad son conceptos complementarios que dan cuenta de conductas observadas en numerosos fenómenos sociales y naturales. En consecuencia, al abordar esta clase de sistemas no puede prescindirse de la base teórica sobre la que reposan ambos términos.

La linealidad en un sistema se refiere a la vinculación existente entre los componentes y la totalidad. Si el sistema puede definirse como la suma de las interacciones de sus componentes nos encontramos ante un comportamiento lineal. Por el contrario, si el sistema no puede definirse como la suma de sus componentes, estamos ante un comportamiento no lineal. En síntesis, el todo es diferente a la suma de las partes.

Los sistemas caóticos son deterministas y altamente sensibles a las condiciones iniciales. En ese sentido, leves modificaciones en dichas condiciones desencadenarán profundos cambios en su comportamiento a lo largo del tiempo.

Los sistemas complejos se definen por la propiedad de la emergencia, la cual consiste en el surgimiento de una totalidad organizada producto de las interacciones entre los componentes y sujeto a un conjunto de reglas específicas. En estos sistemas, la totalidad resultante es sustancialmente distinta de los componentes. Vale acotar que el grado de complejidad puede medirse

contemplando distintos referentes como cantidad de información, nivel de entropía, fractalidad, entre otros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, M., Mills, G., & Smith, K. (2019). Social group effects on the emergence of communicative conventions and language complexity. *Journal of Language Evolution*, 1-18. doi:10.1093/jole/lzy010
- Bertalanffy, L. V. (1976). *Teoría general de sistemas*. (J. Almela, Trad.) México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Cilliers, P. (1998). *Complexity and postmodernism. Understanding complex systems*. Nueva York, EUA: Taylor & Francis.
- Feldman, D. (2012). *Chaos and fractals. An elementary introduction*. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press.
- Gell-Mann, M. (1995). What is complexity? Remarks on simplicity and complexity by the Nobel Prize-winning author of *The Quark and the Jaguar*. *Complexity*, 1, 16-19. doi:10.1002/cplx.6130010105
- Gharajedaghi, J. (2011). *Systems thinking: managing chaos and complexity. A platform for designing business architecture*. EUA: Elsevier.
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5º ed.). México D.F.: McGraw-Hill.
- Holland, J. (1998). *Emergence: from chaos to order*. Cambridge, EUA: Perseus Books.
- Johansen, O. (1982). *Introducción a la teoría general de sistemas*. México D.F.: Limusa.
- Lewin, R. (1995). *Complejidad. El caos como generador de orden*. (J. G. López Guix, Trad.) Barcelona, España: Tusquets Editores.
- Lloyd, S. (2001). Measures of complexity: a nonexhaustive list. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(4), 7-8.
- Martínez, M. (2009). *Epistemología y metodología cualitativa en las ciencias sociales*. México D.F.: Trillas.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity. A guided tour*. Nueva York, EUA: Oxford University Press.
- Morin, E. (1990). *Introducción al pensamiento complejo*. Recuperado de http://cursoenlineasincosteodgarmorin.org/images/descargables/Morin_Introducción_al_pensamiento_complejo.pdf

- Pérez, A. (2015). *La teoría del caos. Las leyes de lo impredecible*. España: RBA.
- Real Academia Española. (2018). *Diccionario de la lengua española*. España. Recuperado de <https://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=caos>
- Reynoso, C. (2006). *Complejidad y caos: una exploración antropológica*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Reynoso, C. (2009). *Modelos o métaforas: crítica del paradigma de la complejidad de Edgar Morin*. Buenos Aires, Argentina: SB.
- Samsung Electronics. (2012). *GSM telephone GT-I9300 service manual*. Samsung Electronics. Recuperado de https://www.mobile-manuals.com/app/download/11177400221/samsung_gt-i9300_service_manual.pdf?t=1514977873
- Sawyer, R. K. (2005). *Social emergence. Societies as complex systems*. Nueva York, EUA: Cambridge University Press.
- Thonon, H. (2014). *Conceptos, teorías y modelos. Un enfoque sistémico*. Trabajo de ascenso para optar a la categoría de profesor asociado. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Torres, L., Blevins, A., Bassett, D., & Eliassi-Rad, T. (2021). The why, how, and when of representations for complex systems. *SIAM Review*, 63(3), 435-485.
- Tranquillo, J. (2019). *An introduction to complex systems. Making sense of a changing world*. Cham, Suiza: Springer.
- Vivas, E. (2020). Innovaciones urbanas en el siglo XXI: sostenibilidad, ubicuidad y ciudades inteligentes. En C. Peña (Ed.), *Miradas a la Venezuela del siglo XXI. Temáticas, enfoques y evidencias* (pp. 289-320). Caracas, Venezuela: FaCES, Universidad Central de Venezuela.
- Weaver, W. (1991). Science and complexity. En G. Klir, *Facets of systems science* (Vol. 7, pp. 449-456). Boston, MA, EUA: Springer.