



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 3 abril 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

OSCAR ANDRES VILLARAGA GARCIA, con C.C. No. 1075282660,

JEFFERSON DAVID CANTILLO CAPERA, con C.C. No.1075291838,

utor(es) de la tesis y/o trabajo de grado, titulado SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS, ANTECEDENTES, NOCIONES Y CARACTERISTICAS presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de matemático; Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

1075291838

Firma:

1075282660

Vigilada Mineducación



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS: ANTECEDENTES, NOCIONES Y CARACTERÍSTICA

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VILLARRAGA GARCÍA	OSCAR VILLARRAGA
CANTILLO CAPERA	JEFFERSON DAVID

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
POLANIA QUIZA	LUIS ARTURO

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
POLANIA QUIZA	LUIS ARTURO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: MATEMÁTICO

FACULTAD: CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA O POSGRADO: MATEMÁTICAS APLICADA

CIUDAD: NEIVA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2019

NÚMERO DE PÁGINAS: 54

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías_X__ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general__X__ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. sistemas dinámicos	dynamic systems	6. No linealidad	non-linearity
2. complejidad	complexity		
3. auto-organización	self-organization		
4. adaptación	adaptation		
5. emergencia	emergency		

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Los Sistemas Complejos Adaptativos o (CAS) nacen de la evolución del concepto de complejidad y en especial en la adopción del concepto de adaptación de los sistemas complejos; estos sistemas se encuentran de forma natural o artificial y tienen alguna relación con la vida. Estos están presentes en distintas disciplinas.

En la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Surcolombiana, en el programa de pregrado de Matemáticas Aplicada, se desconoce el paradigma de la complejidad, y más aún sobre los Sistemas Complejos Adaptativos.

Este trabajo contiene una recopilación de información acerca de los sistemas complejos adaptativos (CAS) así pues, se aclara lo que se entiende de éste. En dicha recopilación se tendrán los antecedentes, nociones y características generales de los CAS, los cuales son comunes a todas las visiones, independientemente de la disciplina que lo estudie; por último se brindará información detallada a los estudiantes que les interese, para futuros trabajos.

Para tal fin, se revisaron resultados de investigación publicados en revistas académicas que han facilitado la introducción de las ciencias de la complejidad, al igual que se exploran los resultados de investigación de grupos e institutos que trabajan en el tema.

A partir de los estudios comparativos de las propuestas observadas se plantea que los CAS pueden comprenderse desde la emergencia, la auto-organización, entre otros.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Adaptive Complex Systems or (CAS) are born from the evolution of the concept of complexity and especially in the adoption of the concept of adaptation of complex systems; These systems are found naturally or artificially and have some relationship with life. These are present in different disciplines.

In the Faculty of Exact and Natural Sciences of the Surcolombina University, in the undergraduate program of Applied Mathematics, the paradigm of complexity is unknown, and even more so about the Adaptive Complex Systems.

This work contains a compilation of information about complex adaptive systems (CAS), thus clarifying what is meant by it. In this compilation the antecedents, notions and general characteristics of the CAS will be taken, which are common to all the visions, independently of the discipline that studies it; Finally, detailed information will be provided to students who are interested, for future work.

To this end, research results published in academic journals that have facilitated the introduction of complexity sciences were reviewed, as well as the research results of groups and institutes working on the subject are explored. From the comparative studies of the observed proposals, it is proposed that CAS can be understood from the emergency, self-organization, among others.

APROBACION DE LA TESIS

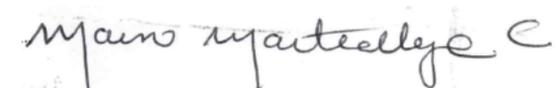
Nombre Presidente Jurado: JASMIDT VERA CUENCUA

Firma: 

Nombre Jurado: JASMIDT VERA CUENCUA

Firma: 

Nombre Jurado: MAURO MONTEALEGRE CARDENAS

Firma: 



UNIVERSIDAD
SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS

ANTECEDENTES, NOCIONES Y CARACTERISTICAS

3 de abril de 2019

OSCAR ÁNDRES VILLARRAGA GÁRCIA
JEFFERSON DAVID CANTILLO CAPERA

SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS

ANTECEDENTES, NOCIONES Y CARACTERISTICAS

Presentado por:

OSCAR ANDRES VILLARRAGA GARCIA
JEFFERSON DAVID CANTILLO CAPERA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Matemático

Director de trabajo:

LUIS ARTURO POLANIA QUIZA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

MATEMATICA APLICADA

NEIVA-HUILA

COLOMBIA

2019

Resumen

Los Sistemas Complejos Adaptativos o (CAS) nacen de la evolución del concepto de complejidad y en especial en la adopción del concepto de adaptación de los sistemas complejos; estos sistemas se encuentran de forma natural o artificial y tienen alguna relación con la vida. Estos están presentes en distintas disciplinas.

En la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Surcolombiana, en el programa de pregrado de Matemáticas Aplicada, se desconoce el paradigma de la complejidad, y más aún sobre los Sistemas Complejos Adaptativos.

Este trabajo contiene una recopilación de información acerca de los sistemas complejos adaptativos (CAS) así pues, se aclara lo que se entiende de éste. En dicha recopilación se tendrán los antecedentes, nociones y características generales de los CAS, los cuales son comunes a todas las visiones, independientemente de la disciplina que lo estudie; por último se brindará información detallada a los estudiantes que les interese, para futuros trabajos.

Para tal fin, se revisaron resultados de investigación publicados en revistas académicas que han facilitado la introducción de las ciencias de la complejidad, al igual que se exploran los resultados de investigación de grupos e institutos que trabajan en el tema. A partir de los estudios comparativos de las propuestas observadas se plantea que los CAS pueden comprenderse desde la emergencia, la auto-organización, entre otros.

Palabras Claves: Sistemas complejos adaptativos, sistemas dinámicos, complejidad, auto organización, adaptación, emergencia, no linealidad.

Abstract

Adaptive Complex Systems or (CAS) are born from the evolution of the concept of complexity and especially in the adoption of the concept of adaptation of complex systems; These systems are found naturally or artificially and have some relationship with life. These are present in different disciplines.

In the Faculty of Exact and Natural Sciences of the Surcolombina University, in the undergraduate program of Applied Mathematics, the paradigm of complexity is unknown, and even more so about the Adaptive Complex Systems.

This work contains a compilation of information about complex adaptive systems (CAS), thus clarifying what is meant by it. In this compilation the antecedents, notions and general characteristics of the CAS will be taken, which are common to all the visions, independently of the discipline that studies it; Finally, detailed information will be provided to students who are interested, for future work.

To this end, research results published in academic journals that have facilitated the introduction of complexity sciences were reviewed, as well as the research results of groups and institutes working on the subject are explored. From the comparative studies of the observed proposals, it is proposed that CAS can be understood from the emergency, self-organization, among others.

Key words: Complex adaptive systems, dynamic systems, complexity, self-organization, adaptation, emergency, non-linearity.

Índice general

1. Introducción	8
1.1. Planteamiento del problema	10
1.2. Objetivos	11
1.2.1. Objetivo Principal	11
1.2.2. Objetivo Específicos	11
2. Marco teórico y metodológico	12
2.1. Conceptos Básicos	12
2.1.1. Sistemas	12
2.1.1.1. Clasificación de Sistemas	13
2.1.2. Sistemas Dinámicos	15
2.1.2.1. Sistemas Dinámicos lineales	17
2.1.2.2. Sistemas Dinámicos no-lineales	18
2.1.3. Complejidad	21
2.1.3.1. Ciencias de la Complejidad	23
2.1.4. Sistemas Complejos	28
2.1.4.1. Emergencia	29
2.1.4.2. Auto organización	31
2.2. Metodología	35
2.2.1. Tipo de investigación	35
2.2.2. Diseño de investigación	35
2.2.3. Recolección de datos	36
2.2.4. Alcance	36

3. Sistema Complejo Adaptativo	37
3.1. Antecedentes	37
3.2. Algunas Nociones	39
3.3. Características	45
3.4. Aplicaciones	47
3.4.1. Autómatas Celulares (AC)	48
4. Conclusiones	51
Referencias	53

Índice de figuras

3.1. Murray Gell-Mann	40
3.2. Ilustración las de relaciones entre diversos CAS terrestres.	41
3.3. John H. Holland	42
3.4. Melanie Mitchell	44
3.5. paso 0. Elaboración propia en NetLogo	50
3.6. paso 1. Elaboración propia en NetLogo	50

Capítulo 1

Introducción

El mundo está lleno de fenómenos y sistemas tanto naturales como artificiales, unos son sistemas poco sensibles a cambios en su ambiente; otros sistemas son muy sensibles, pues con frecuencia cambia con alguna perturbación en su ambiente, haciendo que ellos aprendan o evolucionen, este proceso se conoce como adaptación; Los sistemas complejos adaptativos (o CAS, del inglés complex adaptive system), son los encargados de estudiar este tipo de sistemas. La expresión “Sistema Adaptativo Complejo” (o ciencia de la complejidad) fue acuñada en el interdisciplinario Santa Fe Institute por John H. Holland, Murray Gell-Mann y otros.

Un ecosistema o el medioambiente, las organizaciones y estructuras humanas (económicas, sociales, políticas, etc.), son ejemplos de sistemas complejos adaptativos que encontramos en estudios de biología, sociología y economía (Mitchell, 2009). Los CAS están en un medio muy dinámico y cambiante; con propiedades como la emergencia, auto-organización, no linealidad, entre otras; y con naturaleza impredecible. Esto hace que el estudio de un sistema con estas características hoy en día sea un reto para cualquier disciplina científica. Todos se enfrentan a la dificultad de “manejar” adecuadamente estas estructuras dinámicas, a un más cuando el propósito es determinar el comportamiento o evolución futura del sistema en cuestión.

Un énfasis importante con el CAS es el cruce de los límites disciplinarios tradicionales. CAS proporciona una alternativa al pensamiento lineal y reduccionista que ha gobernado el pensamiento científico desde la época de Newton. La nueva disciplina se ha distinguido por el uso extensivo de la simulación por computadora como herramienta de investigación.

Para poder diagnosticar correctamente un sistema de este tipo habría que recopilar y luego integrar una cantidad de datos tan inmensa que los ordenadores que disponemos en la actualidad se quedan cortos. Pero el problema no es sólo ese. Suponiendo que pudiéramos disponer de la tecnología adecuada aún quedaría por solucionar otro asunto. Un sistema complejo es tan dinámico que cambia continuamente. Por lo tanto, los datos que se obtuvieron ayer y que se analizan hoy, ya no tienen nada que ver con la realidad de mañana.

La teoría de los sistemas dinámicos, consiste en estudiar sistemas con pocas variables, por otro lado la teoría de sistemas complejos consiste también en estudiar sistemas dinámicos pero con muchas más variables. Una buena comprensión de la teoría de los sistemas dinámicos es, por lo tanto, un requisito previo al estudiar sistemas complejos, y más aún adaptativos.

1.1. Planteamiento del problema

En la universidad Surcolombiana, en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales se oferta la Maestría en estudios interdisciplinarios de la complejidad, allí tratan temas como interdisciplinariedad, complejidad, sistemas complejos, entre otros. Pero, en la misma Facultad, en el programa de pregrado de Matemáticas Aplicada se desconoce el paradigma de la complejidad, y más aún sobre los sistemas complejos adaptativos; luego, con el fin de tener información resumida para quien este interesado en sistemas complejos adaptativos, surgió la siguiente pregunta ¿Que se entiende por sistema complejo adaptativo y que lo caracteriza?

Este trabajo contiene una recopilación de información acerca de los sistemas complejos adaptativos así pues, se pretende aclarar lo que se entiende de éste. En dicha recopilación tendrán los antecedentes, nociones y características generales de los CAS, los cuales son comunes a todas las visiones, independientemente de la disciplina que lo estudie; por último se brindará información detallada a los estudiantes que les interese, para futuros trabajos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal

- Identificar características o propiedades de los Sistemas Complejos Adaptativos.

1.2.2. Objetivo Específicos

- Recopilar información confiable sobre la teoría de los Sistemas Complejos Adaptativos propuestas por varios autores como Murray Gell-Man, John Holland, Melanie Mitchell, entre otros.
- Proporcionar información amplia sobre el tema, para motivar la comunidad académica a estudiar la teoría de los Sistemas Complejos Adaptativos, y que tengan un buen punto de partida para seguir profundizando en ellos.

Capítulo 2

Marco teórico y metodológico

2.1. Conceptos Básicos

2.1.1. Sistemas

Existen muchas definiciones para un Sistema, estas se diferencian básicamente por el aspecto sobre el cual se hace énfasis, depende del individuo que lo hace, del objetivo que se persigue y de las circunstancias particulares en las cuales se desarrolla. Por tanto, de manera subjetiva definimos un sistema como:

Conjunto de elementos dinámicamente relacionados entre sí, que realizan una actividad para alcanzar un objetivo, operando sobre entradas y produciendo salidas procesadas. Se encuentra en un medio ambiente y constituye una totalidad diferente de otra (Ramírez, 2002, p.21).

Esta definición menciona siete componentes claves que son: elemento que se define como “la parte integrante de una cosa o porción de un todo” (Ramírez, 2002, p.19); relación se entiende como “la situación que se da entre dos cosas, ideas o hechos cuando por alguna circunstancia están unidas de manera real o Imaginaria” (Ramírez, 2002, p.20); objetivo conocidos como “Propósitos, Finalidades, Logros, Misiones, Visiones o Metas; la denominación depende del alcance de los mismos y/o del momento en el tiempo para el cual son definidos” (Ramírez, 2002, p.25); entrada se entiende por “todo aquello que el sistema recibe o importa de su mundo exterior. También se conoce con el término Input” (Ramírez, 2002, p.27); salida “Es el resultado final de la operación o procesamiento de un sistema. Se puede hacer referencia a la salida

utilizando el término Output.” (Ramírez, 2002, p.28); ambiente se conoce como “el medio que rodea externamente al sistema, es una fuente de recursos y de amenazas. Se conoce también con el nombre de Entorno o Contexto” (Ramírez, 2002, p.29), y totalidad “se define como todo el total, el conjunto de todos los componentes, (. . .). El sistema debe considerarse como un cosa íntegra, completa, entera, absoluta y conjunta” (Ramírez, 2002, p.31).

El concepto ha invadido todos los campos de la ciencia y penetrado en el pensamiento y el habla populares y en los medios de comunicación de masas. El razonamiento en términos de sistemas desempeña un papel dominante en muy variados campos, desde las empresas industriales y los armamentos hasta temas reservados a la ciencia pura. Se le dedican innumerables publicaciones, conferencias, simposios y cursos. En años recientes han aparecido profesiones y ocupaciones, desconocidas hasta hace nada que llevan nombres como proyecto de sistemas, análisis de sistemas, ingeniería de sistemas y así por el estilo (Von Bertalanffy y cols., 1993).

2.1.1.1. Clasificación de Sistemas

La clasificación de un sistema al igual que el análisis de los aspectos del mismo es un proceso subjetivo; depende del individuo que lo hace, del objetivo que se persigue y de las circunstancias particulares en las cuales se desarrolla. En este punto se dan lineamientos generales sobre las diferentes clases de sistemas y algunos ejemplos que corresponden a su definición, pero puede haber debate sobre los mismos si se tiene en cuenta las consideraciones expuestas antes. partiendo de la clasificación propuesta por Alba, citado en (Ramírez, 2002) los sistemas se clasifican de la siguiente manera:

Según su relación con el medio ambiente:

- Sistemas abiertos: Sistema que intercambia materia, energía o información con el ambiente.
Ejemplos: Célula, ser humano, ciudad, perro, televisor, familia, estación de radio

- Sistemas cerrados: Sistema que no intercambia materia, energía o información con el ambiente
Ejemplos: Universo, reloj desechable, llanta de carro

Según su naturaleza:

- Sistemas concretos: Sistema físico o tangible
Ejemplos: Equipo de sonido, edificio, pájaro, guitarra, elefante
- Sistemas abstractos: Sistema simbólico o conceptual
Ejemplos: Sistema hexadecimal, idioma español, lógica difusa

Según su origen:

- Sistemas naturales: Sistema generado por la naturaleza
Ejemplos: Río, bosque, molécula de agua
- Sistemas artificiales: Sistema producto de la actividad humana; son concebidos y construidos por el hombre
Ejemplos: Tren, avión, marcapasos, idioma inglés

Según sus relaciones:

- Sistemas simples: Sistema con pocos elementos y relaciones
Ejemplos: Juego de billar, péndulo, $f(x) = x + 1$, palanca
- Sistemas complejos: Sistema con numerosos elementos y relaciones entre ellos
Ejemplos: Cerebro, universidad, cámara fotográfica

Esta clasificación es relativa porque depende del número de elementos y relaciones considerados. En la práctica y con base en límites psicológicos de la percepción y comprensión humanas, un sistema con más o menos siete elementos y relaciones se puede considerar simple.

Según su cambio en el tiempo:

- Sistemas estáticos: Sistema que no cambia en el tiempo
Ejemplos: Piedra, vaso de plástico, montaña
- Sistemas dinámicos: Sistema que cambia en el tiempo
Ejemplos: Universo, átomo, la tierra, hongo

Esta clasificación es relativa porque depende del periodo de tiempo definido para el análisis del sistema.

Según el tipo de variables que lo definen:

- Sistemas discretos: Sistema definido por variables discretas
Ejemplos: lógica booleana, alfabeto
- Sistemas continuos: Sistema definido por variables continuas
Ejemplos: alternador, río

Otras clasificaciones :

- Sistemas jerárquicos: Sistema cuyos elementos están relacionados mediante relaciones de dependencia o subordinación conformando un organización por niveles. Chiavenato (1999) los denomina sistemas piramidales
Ejemplos: Gobierno de una ciudad
- Sistemas de control: Sistema jerárquico en el cual unos elementos son controlados por otros
Ejemplos: Lámpara
- Sistemas de control con retroalimentación: Sistema de control en el cual los elementos controlados envían información sobre su estado a los elementos controladores
Ejemplos: Termostato (p.32-34-35).

2.1.2. Sistemas Dinámicos

Por la historia de la teoría de sistemas dinámicos, podemos pensar que se desprende como una rama de las matemáticas fundada por Henry Poincaré (1854 - 1912), quien en sus estudios de las orbitas periódicas para problemas de tres cuerpos, creo un brillante conjunto de herramientas que hoy conocemos como teoría cualitativa de ecuaciones diferenciales. La teoría de sistemas dinámicos se centra en la descripción y predicción de sistemas que muestran comportamientos cambiantes complejos a nivel macroscópico, que surgen de las relaciones colectivas de muchos componentes que interactúan (Mitchell, 2009). Algunos ejemplos son:

- El sistema solar (los planetas cambian de posición con el tiempo)
- El corazón de una criatura viva (late de forma periódica en lugar de quedarse quieto)
- El cerebro de una criatura viviente (las neuronas se disparan continuamente, los neurotransmisores se impulsan de una neurona a otra, las fuerzas de la sinapsis están cambiando y, en general, todo el sistema se encuentra en un estado de flujo continuo)
- El mercado de valores
- La población mundial
- El clima global (Mitchell, 2009, p.16).

La palabra dinámica significa “cambio” (Mitchell, 2009), y los sistemas dinámicos son sistemas que cambian con el tiempo. Asumiendo esta postura hay dos tipos principales de sistemas dinámicos relacionados con el tiempo: ecuaciones diferenciales y mapas iterados (también conocidos como ecuaciones en diferencias) Las ecuaciones diferenciales describen la evolución de los sistemas en tiempo continuo, mientras que los mapas iterados surgen en problemas donde el tiempo es discreto. Así, un sistema dinámico proporciona una descripción funcional de la solución de un problema físico o del modelo matemático que describe el problema físico.

En general, un sistema dinámico se define como el objeto formado por un espacio de estados X (una variedad) y un campo vectorial f , definido en X

sistema dinámico = variedad de estados X + campo vectorial f

De acuerdo con ello un sistema dinámico se define por el par (X, f) . Una de las formulaciones más generales de un sistema dinámico, mediante un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, es la siguiente

$$\dot{x} = f(x)$$

en donde la función f establece la regla mediante la cual se produce el cambio del estado a lo largo del tiempo y representa la dinámica del sistema. El espacio X tiene, en general, dimensión n , de modo que $\dot{x} = f(x)$ se descompone en un conjunto de ecuaciones de la forma:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

a cada una de las cuales corresponde una relación de influencia

$$X_1, X_2, \dots, X_n \longrightarrow \frac{dX}{dt}$$

Conviene observar que para esta transición hay que enriquecer la información estructural de las relaciones de influencia con información adicional. La dinámica de sistemas, como método para el modelado y simulación de sistemas dinámicos, aporta herramientas conceptuales e informáticas para realizar esa transición (Aracil, Salas, y Gordillo, 2007).

Estos sistemas se pueden clasificar como lineales y no lineales, Donde los sistemas dinámicos lineales cuentan con una teoría completamente desarrollada y con un campo de investigación corto. Por el contrario para los sistemas dinámicos no lineales en los últimos cuarenta años hubo un creciente interés en el estudio de estos, en el desarrollo de herramientas computacionales para estudiar estos sistemas, y la aplicación de estas herramientas a un número importante de problemas que abarcan temas de física, biología, ecología, economía, ingeniería y ciencias de la computación.

2.1.2.1. Sistemas Dinámicos lineales

Un sistema lineal es aquel que se puede comprender al comprender sus partes individualmente y luego juntarlas, en consecuencia, la suma de sus partes es igual al todo (Mitchell, 2009). Matemáticamente hablando, los sistemas lineales son aquellos sistemas que están representados por ecuaciones diferenciales lineales, es decir, aquellas ecuaciones en donde la variable dependiente y todas sus derivadas son de primer grado, esto es la potencia de todo término función de la variable dependiente es uno y además los coeficientes de todos los términos son constantes o si son variables, solo dependen del tiempo (t), que es la variable independiente. Es importante recordar que una ecuación diferencial lineal, no debe contener potencias, productos entre variables, u otras funciones de la variable dependiente y sus derivadas (por ejemplo una función senoidal, cuyo argumento es función de la variable dependiente). A su vez se pueden distinguir entre ellos, sistemas lineales invariantes en el tiempo, representados por ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes o parámetros constantes, y sistemas lineales variables con el tiempo, representados por ecuaciones diferenciales lineales cuyos coeficientes o parámetros varían con el tiempo.

2.1.2.2. Sistemas Dinámicos no-lineales

La ciencia clásica tiene como idea de que los sistemas o fenómenos físicos y sociales tienen una naturaleza lineal, pero la realidad es mucho más compleja de lo que la mente humana puede comprender; dado a que estos, tienen comportamientos irregulares, inestables e impredecibles, y no es posible hacer un seguimiento de trayectorias individuales para comprenderlos. A estos se le denomina sistemas dinámicos no lineales, regidos por ecuaciones no lineales, por ejemplo ecuaciones diferenciales con coeficientes que son función de la variable dependiente, ecuaciones diferenciales parciales, multiplicación entre variables, funciones senoidales con argumentos en función de la variable dependiente, o cualquier otro tipo de ecuación funcional. En general, los sistemas no lineales no tienen una solución analítica, debido a la complejidad y la no linealidad de las ecuaciones (Nicola, 2013).

Existen varias manifestaciones de no linealidad.

Sensibilidad a las condiciones iniciales y a las externalidades (“Efecto mariposa”)

Puede que no siempre sea posible precisar un sistema exactamente. Puede haber, por ejemplo, ciertos factores no identificados o inciertos. El límite de un sistema puede no estar bien definido, o el acto mismo de observación y medición puede introducir incertidumbres (...). Un pequeño grado de incertidumbre en un sistema lineal no influye realmente en un intento de análisis, pero para algunos sistemas no lineales estas incertidumbres aumentan exponencialmente. Tales sistemas son infinitamente sensibles a sus condiciones iniciales: tanto, que la fluctuación inicial más pequeña puede inundar rápidamente todo el sistema.

Otros sistemas pueden ser infinitamente sensibles a las externalidades, el “efecto mariposa”, de modo que una pequeña fluctuación o perturbación que surja en algún sistema cercano desbordará el sistema (...). En consecuencia, no solo el futuro de tales sistemas será ambiguo, sino que los esfuerzos por controlar o las medidas correctivas darán resultados impredecibles (Nicola, 2013, p.20).

Cambios repentinos

Los sistemas no lineales se caracterizan por tener “puntos de bifurcación”: regiones donde el sistema puede cambiar repentinamente su comportamiento cualitativo

(de hecho, un sistema que se ha estado comportando de manera ordenada durante un largo período de tiempo puede comenzar a fluctuar de manera errática). A lo largo de su vida, un sistema no lineal puede entrar en una serie de comportamientos muy diferentes. Además, debe destacarse, estos cambios no siempre deben ser el resultado de perturbaciones externas, sino que pueden ser el resultado natural de la dinámica interna del sistema (Nicola, 2013, p.21).

¿Cambio exógeno o endógeno?

Cuando un sistema experimenta un cambio dramático repentino, aparentemente se debe a una causa externa. Sin embargo, a veces esta gran fluctuación o cambio cualitativo no tiene relación con las circunstancias externas, pero es endógena (es decir, el resultado de una dinámica puramente interna). Es de importancia obvia poder distinguir factores endógenos de factores exógenos (Nicola, 2013, 21).

Comportamiento caótico

A veces, los sistemas entran en regiones de comportamiento altamente errático y caótico. En tales casos, resulta imposible predecir los patrones de comportamiento futuros del sistema incluso cuando se basa en toda su historia. Aunque no existe una definición matemática del caos aceptada universalmente, una explicación comúnmente adoptada establece que, para que un sistema dinámico se clasifique como caótico, debe satisfacer las siguientes propiedades:

- 1) **Sensibilidad a las condiciones iniciales** significa que cada punto en dicho sistema se aproxima arbitrariamente a otros puntos con trayectorias futuras significativamente diferentes. Por lo tanto, una perturbación arbitrariamente insignificante de la trayectoria actual puede llevar a un comportamiento futuro significativamente diferente.
- 2) **Mezcla topológica** significa que el sistema evolucionará a lo largo del tiempo, de modo que cualquier región o conjunto abierto de su espacio de fase se superpondrá con cualquier otra región.
- 3) **Densidad de las órbitas periódicas** significa que cada punto del espacio se aproxima a una distancia arbitraria mediante órbitas periódicas.

(Nicola, 2013, 21).

Caos determinista

Un sistema caótico parece perfectamente impredecible en su comportamiento. Sin embargo, de alguna manera, lo que en realidad se conoce como “caos determinista” parece exhibir ciertas regularidades. Por ejemplo, los cambios erráticos, aunque sean totalmente impredecibles, podrían limitarse a un área restringida específica, llamada “atractor caótico o extraño”. Por lo tanto, incluso mientras el comportamiento momento a momento del sistema es impredecible, la identificación de la geometría de los atractores extraños ofrece detalles sobre el rango general de su comportamiento. También es una cuestión de debate sobre si se debe hablar de un sistema caótico como el que está definitivamente desprovisto de cualquier orden, o como un orden altamente complejo y no reconocible de inmediato. Además, tales sistemas también pueden mostrar “intermitencia”, períodos de orden simple que surgen repetidamente del caos (Nicola, 2013, 22).

Auto-semejanza

Los sistemas caóticos tienen mucho en común con los fractales: de hecho, sus “atractores extraños” tienen una estructura fractal. Del mismo modo, puede haber patrones fractales en su dinámica que se repiten en diferentes intervalos de tiempo. Los fractales van más allá de las matemáticas puras del concepto, ya que los usos prácticos apenas comienzan a encontrarse. Al ser capaz de reconocer las estructuras naturales con fórmulas matemáticas, es posible predecir y plantear hipótesis sobre el futuro de nuestro entorno, especie o muchos otros fenómenos naturales. John Briggs, en su libro titulado Fractales: los patrones del caos, menciona muchos elementos de nuestro universo que se comportan como fractales, llegando a la conclusión de que tener conocimiento de los patrones de los fractales permitiría realizar mejores predicciones generales (Nicola, 2013, 22).

2.1.3. Complejidad

La complejidad surge, en gran medida, como una crítica a la manera clásica de hacer ciencia, para tratar de explicar los fenómenos o aspectos que ya no era capaz de explicar la ciencia clásica. Estos problemas involucran, en un sentido no exhaustivo, cuestiones relativas al desorden, el caos, la no-linealidad, el no-equilibrio, la indecibilidad, la incertidumbre, la contradicción, el azar, la temporalidad, la emergencia, la auto-organización (Rodríguez y Aguirre, 2011); y como lo afirma Prigogine (1996):

Asistimos al surgimiento de una ciencia que no se limita a situaciones simplificadas, idealizadas, más nos instala frente a la complejidad del mundo real, una ciencia que permite que la creatividad humana se vivencie como expresión singular de un rasgo fundamental como en todos los niveles de la naturaleza (p.13).

La complejidad no tiene una definición puntual, existen distintas formas de asociación del concepto, como pensamiento complejo, complejidad restringida, complejidad organizada, sistemas complejos y teorías de la complejidad. Sin embargo, surge la pregunta ¿Que es complejidad? a la que el filósofo Morin (1994), responde:

A primera vista la complejidad es un tejido (complexus: lo que está tejido en conjunto) de constituyentes heterogéneos inseparablemente asociados: presenta la paradoja de lo uno y lo múltiple. Al mirar con más atención, la complejidad es, efectivamente, el tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares, que constituyen nuestro mundo fenoménico. Así es que la complejidad se presenta con los rasgos inquietantes de lo enredado, de lo inextricable, del desorden, la ambigüedad, la incertidumbre... De allí la necesidad, para el conocimiento, de poner orden en los fenómenos rechazando el desorden, de descartar lo incierto, es decir, de seleccionar los elementos de orden y de certidumbre, de quitar ambigüedad, clarificar, distinguir, jerarquizar... Pero tales operaciones, necesarias para la inteligibilidad, corren el riesgo de producir ceguera si eliminan a los otros caracteres de lo complejo; y, efectivamente, como ya lo he indicado, nos han vuelto ciegos (p.17).

Para entender la complejidad Maldonado en su trabajo “Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicación” (2007) propone la existencia de “dos grandes comprensiones de complejidad, usualmente indiferentes entre sí, distantes incluso, y quizás radicalmente distintas. De un lado,

la complejidad como ciencia, y de la otra, la complejidad como método” (p.19). En el primer caso, se comprende mejor como las ciencias de la complejidad o estudio de los sistemas complejos, a un más adaptativos. De ese modo, Maldonado (citado en (Prada, 2013)) afirma:

Las ciencias de la complejidad representan una filosofía determinada del cambio. No tanto de los cambios continuos, regulares, predecibles y controlables, sino, mejor aún, de los cambios súbitos e irreversibles. El lenguaje, en general, de las ciencias de la complejidad es al respecto suficientemente claro: catástrofes, punto crítico y estado crítico, orden por fluctuaciones, inestabilidades, equilibrios dinámicos, atractores extraños, fractales, rupturas de simetrías, auto organización, no linealidad, emergencia(s), y otros semejantes (p.55).

Este enfoque, se puede entender como un abordaje fundamentalmente metodológico, técnico y procedimental de la complejidad, que está fundamentado en la utilización de lenguajes formales, modelos matemáticos y la simulación computacional. Esta perspectiva provee herramientas metodológicas concretas como los autómatas celulares, las redes booleanas, las redes neuronales adaptativas, los algoritmos genéticos y los sistemas multi-agente, entre otros. Estas herramientas son utilizadas para tratar el estudio de los diversos sistemas complejos: ambientales, sociales, organizacionales, económicos (Rodríguez y Aguirre, 2011, p.8).

En cuanto a la segunda concepción, es conocida genéricamente como el pensamiento complejo. Esta fue acuñada por el filósofo francés Edgar Morín, “consiste en poner al descubierto un universo cambiante frente al cual la ciencia, el pensamiento o la cultura anteriores o normales ya no son suficientes” (Maldonado, 2012).

El pensamiento complejo es un pensamiento religador que articula lo que está separado y que distingue lo que está unido. El método del pensamiento complejo desarrollado por Morín es una estrategia orientada a construir un conocimiento multidimensional que permita comprender la unidad y diversidad de los fenómenos complejos. El pensamiento complejo es dialógico, integra la contradicción en el seno del pensamiento racional sin por ello desarrollar razonamientos incoherentes. El pensamiento complejo no supera la contradicción y tampoco la anula; enfrenta la contradicción a partir de una racionalidad dialógica que articula complementariamente dos lógicas antagonistas, cuya unidad es necesario concebir para comprender la organización de un fenómeno complejo (Zoya, Roggero, y Zoya, 2015, p.200).

De manera subjetiva, el mejor camino de comprender la complejidad es como ciencia. Dado que, las ciencias de la complejidad estudian fenómenos, sistemas o comportamientos de complejidad creciente; esto es, fenómenos y sistemas que aprenden y se adaptan, y que, en el filo del caos o bien, lo que es equivalente, lejos del equilibrio. Por ende trataremos más afondo las ciencias de la complejidad.

2.1.3.1. Ciencias de la Complejidad

En los últimos años, una idea del pensamiento científico ha sido la predicción de la naturaleza por medio de leyes que pudieran controlar y predecir su comportamiento. Esa forma de hacer ciencia origino una perspectiva lineal, reduccionista, determinista, analítica; la cual, con el hecho de conocer las condiciones iniciales de un sistema hacia posible predecir su comportamiento global; es decir, dado el conocimiento de las causas, es posible determinar completamente los efectos en el sistema. Dicho de otra manera:

Se redujo la complejidad de muchos fenómenos a través de la simplificación idealizada de propiedades no sistematizables hasta llevarlas a una sencillez apta para su sistematización; así, el comportamiento de un sistema se podía predecir a partir de la suma lineal del comportamiento de las partes, derivando de esto su predecibilidad (Laguna, Marcelín, Patrick, y Vázquez, 2016, p.XIX).

Como se observa sin dificultad, la complejidad misma de un fenómeno radica, por tanto, en el hecho de que sus dinámicas y estructuras no pueden ser reducidas a explicaciones ni gestiones de tipo cíclico, periódico, regular o previsible. Al contrario, allí donde estas características son posibles y están presentes podemos afirmar con seguridad que o bien la complejidad ha sido suprimida, o bien no existe (aún) ninguna complejidad (Maldonado, 2014, 76).

Este desarrollo de los enfoques analíticos y reductores son incapaces de abordar fenómenos que tienen propiedades, tales como la emergencia, la auto organización, la no linealidad, el caos, la bifurcación o la irreversibilidad. Es, en este punto donde aparecen las ciencias de la complejidad, para tratar de explicar estos fenómenos. Estas son:

■ Teoría del Caos

la ciencia del caos identifica a los atractores extraños como el pivote de sus trabajos, y logra por primera vez en la historia el reconocimiento de que pequeños cambios imperceptibles iniciales tienen o pueden tener consecuencias imprevisibles cuya correspondencia es estricta (con respecto a las condiciones iniciales) (Scott, 2007). En consecuencia, los fenómenos caóticos –una de las formas de comprender a los sistemas complejos– son clara y distintivamente aperiódicos. De hecho, la caoticidad consiste exactamente en la aperiodicidad en las dinámicas de un fenómeno, lo cual es identificado en la bibliografía en general como la presencia de distintos atractores: Atractor de Lorenz, Atractor de Hénon, y otros semejantes (Maldonado, 2014, p.74).

■ Termodinámica (del no equilibrio)

La termodinámica del no-equilibrio, otra de las ciencias de la complejidad, pone de manifiesto que es justamente el hecho de que los fenómenos y sistemas se encuentran lejos del equilibrio por lo que son posibles estructuras y dinámicas de auto organización y, no en última instancia, la vida misma en el planeta (Ben-Naim 2011). El concepto técnico que se emplea en termodinámica del no-equilibrio para esos fenómenos cuya dinámica es alejarse del equilibrio es el de estructuras disipativas.

Ahora bien, que un fenómeno determinado se encuentre alejado del equilibrio es igualmente concebido como que está en el filo del caos, y en cualquier caso de lo que se trata es del reconocimiento explícito de que los fenómenos complejos ni apuntan al equilibrio –en cualquier acepción de la palabra–, ni tampoco se concentran en él. Todo lo contrario, es porque o bien están alejados del equilibrio o bien se alejan del mismo por lo que adquieren precisamente el carácter de complejos. La termodinámica del no-equilibrio es la primera de las ciencias contemporáneas que permite razonable, pero sólidamente, la identificación entre sistemas vivos y sistemas con equilibrios dinámicos; otro nombre para designar esa clase de estructuras y dinámicas que, en sentido estricto, coinciden con y se fundan en la evolución.

Ahora bien, cuando se habla de evolución es fundamental no identificar evolución con cambio, progreso, dinámica y demás, como es habitualmente el caso. Por el contrario, la estructura de la evolución descansa en equilibrios puntuados, que son justamente inflexiones que se producen en los fenómenos y en la historia de los fenómenos, gracias a los cuales existe aprendizaje y adaptación. Así, un fenómeno complejo es aquel que exhibe propiedades de adaptación y aprendizaje como consecuencia de inflexiones –por definición imprevistas y dramáticas–. Vale decir que no todos los sistemas o fenómenos aprenden o se adaptan (Maldonado, 2014, p.75).

■ La Geometría de Fractales

La geometría de fractales tiene que ver con el estudio de lo amorfo, es decir, de las formas irregulares, los sólidos imperfectos, las rugosidades y sinuosidades, primero en la naturaleza y más recientemente en el mundo social humano. Es un asunto de geometría, donde la abstracción juega un papel determinante y ese es, justamente, su aporte a la teoría de la turbulencia que se deriva del caos (Prada, 2013, p.60).

Existen distintos tipos de fractales. Los más útiles implican azar y, por tanto, sus regularidades como sus irregularidades son estadísticas. Las formas más usuales son escalantes, lo cual significa que su grado de irregularidad y/o fragmentación es idéntico en todas las escalas. La tradición posterior a Mandelbrot preferirá el término de autosimilitud, a cambio del de escalantes (Maldonado, 2005, p.19).

La autosimilitud constituye, por tanto, el rasgo más destacado y general en el estudio de los fractales. Esta propiedad significa que a niveles menores un mismo objeto se parece a sus partes de mayor tamaño, o viceversa. Un fractal es un objeto con una dimensión no integral, esto es, no entera. Existen diversos tipos de fractales. Están, por ejemplo, los fractales escalantes y los no escalantes, los fractales imagen de sí mismos, los fractales aleatorios estratificados –que son aquellos constituidos por superposición de estratos, cada uno con detalles más refinados que el anterior–, los fractales brownianos fraccionarios

–como por ejemplo las descargas fluviales anuales, las redes escalantes y los ruidos escalantes-. Habría que recordar aquí que el movimiento browniano es en esencia una sucesión de pequeños desplazamientos mutuamente independientes e isótropos, esto es, que todas las direcciones son igualmente probables (Maldonado, 2005, p.20).

■ Teoría de catástrofes

Aunque la teoría de las catástrofes se inicia en la matemática, no es propiamente matemática. Tampoco se ubica en el estudio de las formas, que sería equivalente a geometrizar. Se trata, más bien, de una teoría cualitativa, en consonancia con la teoría de bifurcaciones (Prada, 2013, p.60).

La teoría de catástrofes, pone justamente de manifiesto que las catástrofes consisten en eso: cambios súbitos, imprevistos e irreversibles, los cuales son identificados y estudiados con siete modelos originariamente desarrollados por Thom (1987). “Catástrofe” no tiene aquí ninguna acepción negativa, pues también existen catástrofes positivas y maravillosas (Maldonado, 2014, p.75).

■ Ciencias de redes complejas

Las redes complejas han revelado que la complejidad de los fenómenos tiene que ver, entre otras razones, con los procesos dinámicos, que a su vez generan mapas móviles e interconectados, según el tipo de relación que se da entre los componentes de un sistema entre sí y con el entorno (Prada, 2013, p.61).

Se trata de la ciencia de redes que permiten, específicamente estudiar redes libres de escala, fenómenos de percolación, irrupciones (*burs ting*) y cascadas de errores, por ejemplo, todos los cuales no son sino conceptos, modelos y aproximaciones que explican magníficamente que es el entramado de redes el que convierte a un fenómeno, sistema o dinámica en complejo. No en última instancia, esta teoría recibe el nombre de la teoría de mundo pequeño (*small world theory*), esto es, los grados de espacio, libertad o diferencia, las dinámicas

de sin cronicidad y otros próximos y semejantes, dan lugar a estructuras no-periódicas ni cíclicas (Maldonado, 2014, p.76).

■ Las lógicas no clásicas

En el transcurso de la historia de la lógica formal o clásica, algunos temas, conceptos y problemas fueron dejados de lado. Esta es, precisamente, la justificación de las denominadas lógicas no-clásicas. “Mientras que la lógica formal clásica es deductiva y da prevalencia a modelos, teorías y explicaciones de corte hipotético-deductivo, las lógicas no clásicas no responden necesariamente a la deducción o, lo que es equivalente, la deducción no figura como fundamento del trabajo ni de los temas y problemas en estas lógicas” (Maldonado, 2005, p.27). Al día de hoy, se considera que las lógicas no clásicas constituyen una alternativa y una complementariedad a la lógica formal. En ocasiones, debido a que la lógica formal clásica es demasiado rígida; en otras, porque sucede todo lo contrario, y no aporta el rigor suficiente en la comprensión y en la elucidación de las estructuras y modos de racionalidad de la ciencia, de la vida y del mundo en general. Por lo anterior, las lógicas no-clásicas resultan altamente relevantes en el estudio de los sistemas complejos no-lineales (Prada, 2013, p.61).

Entre las lógicas no-clásicas se destacan: la lógica para consistente, la lógica de la relevancia, la lógica del tiempo, la lógica difusa, la lógica polivalente, la lógica modal, la lógica cuántica, la lógica epistémica, la lógica libre y la lógica intuicionista. (Prada, 2013, p.62).

Evidentemente, al llegar a este punto, conviene recordar se busca es ofrecer una aproximación breve —y por tanto no exhaustiva— a las ciencias de la complejidad. Una mirada más detallada podrá ser objeto de futuras investigaciones.

2.1.4. Sistemas Complejos

Los sistemas se clasifican según sus relaciones: simples o complejas, como se mencionó anteriormente. Pero, se asigna una propuesta por [Maldonado \(2016\)](#) que distingue “tres clases de sistemas, fenómenos o comportamientos, así: sistemas simples, complicados y complejo” (p.412). Para [Maldonado \(2016\)](#) un sistema simple “es aquel que puede ser entendido —y en el orden de la praxis gestionado—, en términos agregativos o compositivos” (p.412). También presenta como simple “todo aquello que se puede comprender y manejar en términos de análisis, pues analizar consiste en dividir, compartimentar, fragmentar, segmentar” (p.412). Este mismo autor define los sistemas complicados como un conjunto de muchos sistemas simples, y la manera habitual de tratar a los sistemas complicados es en términos, por ejemplo, de distribuciones normales, estadística descriptiva e inferencial, promedios, estándares, matrices y vectores ([Maldonado, 2016](#), p.412).

Los sistemas complejos no se han definido de una manera precisa, Sin embargo, se les atribuyen algunas características, y como una de las más notables es su comportamiento no predecible, y según [Maldonado \(2016\)](#) “la manera habitual de comprender a un sistema complejo es por sus atributos o propiedades; entre otros, no-linealidad, emergencia, auto organización, turbulencias, fluctuaciones, comportamiento colectivo complejo y adaptación” (p.413). Este mismo autor afirma, que “los sistemas caracterizados por complejidad son aquellos que no se explican sin el pasado, pero que son posibles a pesar del pasado” ([Maldonado, 2014](#), p.78). Por el contrario, en aquellas condiciones y momentos en que un sistema se puede determinar atendiendo a su pasado e historia, donde prima el determinismo, en estos casos, o bien existe muy baja complejidad, o ninguna. Así, [Maldonado \(2014\)](#) afirma que “la complejidad de un sistema radica en el futuro o futuros posibles que tiene o puede tener y es, genéricamente, este futuro el que complejiza a los fenómenos en un momento determinado” (p.78), en este futuro o futuros nos permite comprender capacidades de los sistemas complejos tales como el aprendizaje y la adaptación.

En opinión de [Maldonado, Villamil, y Gómez \(2009\)](#), los sistemas complejos tienen varias o todas de las siguientes características:

Presencia de muchos componentes autónomos y heterogéneos que difieren en importancia y característica (variedad), componentes que se relacionan dinámicamente y generan diversas configuraciones (modos de organización). Son capaces de mostrar comportamientos emergentes a escalas globales y, con frecuencia, pre-

sentan cambios súbitos, inesperados y sorprendidos. Sus fronteras regularmente son difusas o no son fácilmente deducibles. Las condiciones iniciales de sus variables son altamente sensibles a efectos del medio o a cambios por iteraciones en el largo plazo; y su dinámica es no lineal, a veces caótica, y es estable lejos del equilibrio termodinámico. Estos sistemas, en general, aumentan su complejidad a medida que evolucionan y tienen la capacidad de generar nuevos sistemas complejos; como son sistemas abiertos, en su interacción con el entorno se auto organizan en respuesta a las perturbaciones, haciendo uso útil de los intercambios de materia y energía (p.71).

Según [Mitchell \(2009\)](#) cuando miramos detalladamente, estos sistemas son bastante diferentes, pero vistos en un nivel abstracto ellos tienen algunas propiedades intrigantes en común:

1. **Comportamiento colectivo complejo:** todos los sistemas que consisten en grandes redes de componentes individuales (hormigas, células B, neuronas, compradores de acciones, creadores de sitios web), siguen reglas relativamente simples sin control central o líder. Pero lo que fascina son las acciones colectivas de un gran número de componentes que dan origen a lo complejo, difíciles de predecir y los cambiantes patrones de comportamiento.
2. **Señalización y procesamiento de la información:** Todos estos sistemas producen y utilizan información y señales tanto de su ambiente interno como del externo.
3. **Adaptación:** todos estos sistemas se adaptan, es decir, cambian su comportamiento para mejorar sus posibilidades de supervivencia o éxito, a través del aprendizaje o evolutivos (p.12-13).

2.1.4.1. Emergencia

Los sistemas complejos se caracterizan por tener propiedades emergentes, heredadas del conjunto de las relaciones entre los agentes o componentes, estas propiedades no se encuentran si el sistema se divide en sus componentes y se analiza cada uno de ellos por separado. El sistema debe considerarse como un todo, como decía Aristóteles (citado en [\(Antequera, 2004\)](#)) “las propiedades del todo generado es mayor que la suma de las propiedades individuales de dichos elementos que conforman el sistema” (p.16). La emergencia todavía carece de una definición general, pero en los trabajos de Turing (citado en [\(Aguilar, 2014\)](#)) es entendida como “la capacidad

de todas las formas de vida para desarrollar cuerpos cada vez más complejos a partir de orígenes increíblemente simples” (p.1).

Así, un sistema con muchos componentes simples, exhibirá un comportamiento del conjunto que organiza el comportamiento de las partes individuales del mismo. Un ejemplo es un copo de nieve. Formas simétricas de cristales se van repitiendo en el hielo, conformándose un patrón a diversas escalas. Las formas que genera el hielo son consecuencias de las reglas locales de interacción que conectan las gotas de agua congeladas. Muchas veces esas reglas de interacción no se conocen o no son claras (en nuestro ejemplo ¿Las mismas reglas de interacción ocurren en el punto de ebullición y de congelamiento?). Lo que sí es claro, es que esas reglas que gobiernan las interacciones (en nuestro ejemplo, las relaciones entre las moléculas de agua) parecen mucho más simples que los patrones que se generan (cristales, torbellinos, puntos de ebullición, etc.), y todos estos fenómenos complejos son de alguna manera consecuencia de esas reglas. A tales fenómenos llamaremos comportamientos emergentes del sistema (Aguilar, 2014, p.2).

Anderson planteo una idea de la emergencia su artículo "Más es diferente", que establece que “un cambio de escala a menudo causa un cambio cualitativo en el comportamiento del sistema” (Fromm, 2004, p.19). Por ejemplo, al examinar una sola molécula de H_2O , no hay presencia de liquidez. Pero, si examinamos una colección de millones de moléculas de agua a temperatura ambiente es claramente líquida; otros ejemplo, una interacción colectiva de millones de neuronas produce conciencia, y una interacción común de millones de átomos de oro causa propiedades metálicas. La liquidez, la superfluidez, la cristalinidad, el ferromagnetismo y la conducción metálica son propiedades emergentes (Fromm, 2004).

Las propiedades de un hormiguero comparados con los de una ciudad pueden parecer sistemas complejos totalmente diferentes. Las ciudades, como los hormigueros, son organismos de un nivel superior, pero debido a sus partes componentes los humanos son mucho más inteligentes y reflexivos que las hormigas. Tomamos decisiones conscientemente, pero también contribuimos a un macro desarrollo que casi no tenemos modo de abarcar, a pesar de nuestro avanzado lóbulo frontal. Y ese macro desarrollo pertenece al organismo de la ciudad en sí que crece, evoluciona y aprende en un ciclo de mil años, mientras se produce una sucesión de decenas

de generaciones humanas. Tampoco los seres vivos que conforman un ecosistema perciben por sí mismos las propiedades del ecosistema global, pero éste actúa en función del comportamiento de cada una de sus partes como una entidad global, que contribuye a la estabilidad de los ciclos biogeoquímicos planetarios y incluso dicha globalidad puede inhibir la evolución de sus partes componentes (Antequera, 2004, p.16).

2.1.4.2. Auto organización

La auto organización es una característica de los sistemas complejos, Este concepto ha sido ampliamente utilizado para describir los comportamientos colectivos que muestran los enjambres, colonias de hormigas, las redes sociales, el tráfico, estructuras disipativas, formación de tornados, entre otros sistemas o fenómenos caracterizados por la emergencia, y la ausencia de un controlador central que impongan información sobre sistema. Para Moriello (2003) la auto-organización “es la forma a través de la cual el sistema recupera el equilibrio, modificándose y adaptándose al entorno que lo rodea y contiene” (p.3). En estos, la información circula libremente y sin restricciones entre los agentes o componentes, lo que disminuye la probabilidad de falla, y aumenta la capacidad de recuperarse y continuar operando a pesar de las crisis.

La auto organización es entendida como un proceso en la cual los elementos obran recíprocamente para alcanzar dinámicamente un estado, el cual eventualmente, puede reflejar una función o un comportamiento global. Esta función o comportamiento, no es impuesto por uno o algunos de los elementos del sistema, ni determinado jerárquicamente. Se alcanza autonomía porque los elementos obran recíprocamente el uno con el otro, sin control externo. Estas interacciones producen regeneraciones que regulan el sistema. Esto le permite a los sistemas adaptarse rápidamente a los cambios imprevistos (Aguilar, 2014, p.110).

Para algunos sistemas basados con una jerarquía de agentes o componentes autónomos inteligentes, la cuestión del auto organización parece ser más clara. Por ejemplo, el agente alfa en la parte superior de la jerarquía determina la organización (el simio más fuerte del grupo, el general en el ejército, el director general de la compañía, el presidente en el país, el papa en la iglesia, el profesor en la universidad, etc.). Pero el término auto organización se usa para describir los patrones de lluvia, dunas onduladas, pilas de arena, terremotos, entre otros. En este

caso, la auto organización significa establecer una organización distribuida sin un organizador central que influye en el orden: Es decir, organización sin organizador (Fromm, 2004).

Los sistemas auto organizados se mantienen dentro del estrecho dominio que oscila entre el orden inmutable y el desorden total, entre la constancia rígida y la turbulencia anárquica. Una condición muy especial, con suficiente orden para poder desarrollar procesos y evitar la extinción pero con una cierta dosis de desorden como para ser capaz de adaptarse a situaciones novedosas y evolucionar (Moriello, 2003, p.3).

Sin embargo, es engañoso suponer que la auto organización es un proceso aislado completamente sin influencia externa, se podría decir sin control externo, “refiere a la ausencia de dirección, manipulación, interferencia, presiones o participación de actores fuera del sistema” (Ramírez, 2002, p.112). Un sistema auto organizado necesita una entrada constante y continua de energía desde el exterior. De esta manera, la auto-organización requiere de cuatro insumos.

1) Retroalimentación Positiva.

Son reglas de comportamiento simples que promueven la creación de estructuras. La característica clave de la retroalimentación positiva es que las pequeñas perturbaciones se amplifican. Cuando la retroalimentación positiva está presente, un pequeño cambio crea un efecto que provoca un cambio aún más grande, como una bola de nieve rodando por una colina. En un sistema con retroalimentación positiva, un cambio en una variable responde cambiando la variable en la misma dirección. El resultado final de la retroalimentación positiva es amplificar, de manera que pequeñas perturbaciones pueden dar lugar a grandes cambios. Existen muchos ejemplos en las sociedades de insectos: el reclutamiento y el reforzamiento realizado en las hormigas a través del feromona, o en las abejas a través de la danza (Ramírez, 2002, p.138).

2) Retroalimentación Negativa.

Ayuda a estabilizar un patrón colectivo (equilibra el efecto de la retroalimentación positiva), tomando formas como saturación, agotamiento o competición. En el caso de esta retroalimentación, contrario a la retroalimentación positiva, lo que se busca es la estabilización. Al proceso que subyace en esa búsqueda de equilibrio, en biología, a menudo se le denomina homeostasis. En el

mundo real, los bucles de retroalimentación positiva son controlados por la Retroalimentación Negativa para limitar sus efectos. En el caso de forrajeo en las hormigas, la retroalimentación negativa proviene del número limitado de hormigas disponibles, del agotamiento de la fuente de alimento, de la competición entre las fuentes de alimento, etc. Otros ejemplos son la regulación de la temperatura corporal, o la regulación de los niveles de glucosa en la sangre. La interrupción de la retroalimentación negativa puede llevar a resultados no deseados: en el caso de los niveles de glucosa en la sangre, puede conllevar a un aumento de manera espectacular de ella, generando una diabetes (Ramírez, 2002, p.139).

3) **Amplificación de las Fluctuaciones (Aleatoriedad).**

No sólo las estructuras emergen a pesar de la aleatoriedad, sino que la aleatoriedad es fundamental ya que permite que nuevas estructuras se desarrollen aumentando su capacidad de adaptación (por ejemplo, una hormiga que se pierde al seguir un rastro de su colonia, favorece la exploración de nuevas áreas, eventualmente encontrando fuentes de alimento no explotadas) (Ramírez, 2002, p.113).

4) **Múltiples Interacciones.**

La auto-organización generalmente requiere de una densidad mínima de elementos/individuos capaces de hacer uso de los resultados de sus actividades, como también de las de los otros (por ejemplo, redes de rastro de hormigas se auto-organizan porque ellas usan su feromona como el de las otras hormigas) (Ramírez, 2002, p.114).

Así, estos sistemas presentan algunas características como:

Aumento del Orden:

Una característica importante de la auto-organización es el concepto de «organización». Ella puede ser definida como el arreglo de piezas seleccionadas a fin de generar una función específica. Esto restringe el comportamiento del sistema, de tal manera que se limite a un volumen más pequeño de su espacio de estados. Ese espacio de estados es lo que hemos llamado atractor. De esta manera, la organización puede ser considerado como un aumento en el orden del comportamiento del

sistema que le permite adquirir estructuras espaciales, temporales, o funcionales. Para algunos autores, un sistema sin orden no muestra un comportamiento útil, pero también un sistema con mucho orden puede tener ese problema. Los sistemas en el medio, es decir entre el orden y el caos, pueden presentar una mayor flexibilidad y organizar un mejor comportamiento. Por lo tanto, la auto-organización necesita encontrar un equilibrio entre sin ningún orden y mucho orden. La manera más común de formalizar la noción de “orden” es asociarla con la entropía del sistema.

Autonomía:

No todo aumento del orden es auto-organización. La segunda característica importante de la auto-organización, como lo hemos venido acotando, es la ausencia de control externo. Un sistema debe organizarse sin interferencia desde el exterior. En este caso la noción de “frontera del sistema” es muy importante: para ser capaz de decir si un determinado sistema es auto-organizado se deben poder definir claramente las fronteras del mismo.

Adaptación (aprendizaje, evolución):

Es el proceso de cambios en el sistema para hacer frente a cambios de su entorno. Así, la adaptación le permitirá al sistema modificarse para “estar” mejor dentro del ambiente. Esta adaptación implica la necesidad de que el sistema sea capaz de exhibir una gran variedad de comportamientos. Esto es fundamental en la auto-organización, ya que es lo que permite la evolución hacia un atractor determinado en el espacio de estados²⁹. Para adaptarse el sistema tiene que hacer frente al problema de selección entre sus comportamientos.

Robustez:

Es la capacidad de adaptabilidad del sistema ante la presencia de perturbaciones, errores, etc. Un sistema es robusto si continúa funcionando frente a perturbaciones. La robustez permite que el sistema soporte perturbaciones sin perder su función o propósito. Esto se puede alcanzar con estrategias de modularidad, redundancia, entre otras. La modularidad puede ser útil para prevenir la propagación del daño en un sistema. La redundancia es cuando hay varias copias de un tipo de elemento, de modo que si uno falla otros puedan tomar su papel. Los sistemas auto-organizados utilizan combinaciones de esas estrategias para mantener su integridad ante cambios inesperados.

Anticipación (cognición):

El sistema predice los cambios de su entorno para enfrentarlos, y por consiguiente ajustarse. Éste es un caso especial de adaptación donde el sistema no requiere experimentar la situación para responder a ella. La anticipación prepara al sistema para los cambios antes de que ocurran, adaptando el sistema sin que llegue a estar perturbado.

Dinámico:

Debido a su cualidad de adaptabilidad a un contexto (que puede estar en permanente evolución), la auto-organización tiene que ser dinámica, tal que cambios en el entorno influyan en la organización. Una propiedad esencial de la auto-organización es la de ser un proceso. De esta manera, a fin de adaptar el sistema a su entorno, requiere de procesos que se encarguen de los cambios requeridos. A eso nos referimos como auto-organización. Tomado de (Aguilar, 2014, p.112-113).

2.2. Metodología

2.2.1. Tipo de investigación

Para el estudio que se realizara con los sistemas complejos adaptativos, la investigación se enfocara de manera exploratoria y descriptiva, pues en primera instancia los antecedentes que hay sobre el tema propuesto son muy escasos, por ser teoría relativamente nueva. Así mismo se busca dejar teoría recopilada para estudiantes interesados en el tema.

2.2.2. Diseño de investigación

Debido al tipo de investigación, el enfoque de la investigación es cualitativo. Esto hace que no sea necesario realizar una investigación experimental, aún más un objetivo de nuestra investigación es que, mediante la recopilar información sobre sistemas complejos adaptativos podamos tener características o propiedades sobre dichos temas. Así, el análisis de nuestro estudio será de manera natural.

2.2.3. Recolección de datos

La recopilación de información se tomó en fuentes y autores confiables, bibliotecas, simposio de complejidad, material didáctico disponible en internet, docentes que han trabajado en estos temas, entre otros, luego de esto, se ordenó de manera adecuada para poder entender lo que es un Sistema Complejo Adaptativo y demás dudas que se van generando con el estudio de la complejidad.

2.2.4. Alcance

Este trabajo especifica lo que se entiende por sistema complejo adaptativo. Mostrando sus características generales, aquellas que son comunes a todas las visiones, independientemente de la disciplina que lo estudie, y por ultimo brindar información detallada al estudiante que le interese, para futuros trabajos.

Capítulo 3

Sistema Complejo Adaptativo

3.1. Antecedentes

El **Instituto Santa Fe (SFI)**, es un centro de investigación y educación independiente, sin fines de lucro, que lidera la investigación global en ciencia de la complejidad. Los científicos de SFI buscan los patrones y las regularidades compartidas a través de los sistemas físicos, biológicos, sociales y tecnológicos que dan lugar a la complejidad, y en cualquier sistema en el que sus comportamientos colectivos y de todo el sistema no puedan entenderse simplemente estudiando sus partes o individuos de manera aislada (SFI, 2016). Muchas de las figuras clave en los CAS tienen una fuerte afiliación con el SFI.

Esto incluye al fundador y primer presidente del instituto, **George Cowan**, que Trabajó en el Proyecto Manhattan en la Universidad de Chicago, Oak Ridge, la Universidad de Columbia y Los Álamos. Como científico, Cowan estudió dinámicas no lineales, utilizando ecuaciones matemáticas para predecir el comportamiento de sistemas complejos. Tenía un compromiso particularmente fuerte con uno de estos sistemas complejos, el cerebro humano y los efectos de la experiencia de la primera infancia en el desarrollo del cerebro humano. Ayudó a formular y dirigir un importante estudio utilizando técnicas de imágenes cerebrales para investigar el desarrollo cerebral y del comportamiento de los niños (SFI, 2016).

Murray Gell-Mann, ganador del Premio Nobel de física por su trabajo sobre partículas subatómicas, fue un partidario ferviente de la formación del instituto y ha mantenido una fuerte

afiliación a lo largo de los años. Es autor del popular libro de ciencia “El quark y el jaguar: Aventuras en lo simple y lo complejo”. Fue galardonado con el premio Nobel de física en 1969 por su trabajo sobre la teoría de las partículas elementales. Los intereses de Gell-Mann se extienden a la lingüística histórica, la arqueología, la historia natural, la psicología del pensamiento creativo y otros temas relacionados con la evolución biológica y cultural y con el aprendizaje (SFI, 2016). Gran parte de su investigación reciente en el Instituto Santa Fe se ha centrado en la teoría de los sistemas adaptativos complejos, que reúne muchos de esos temas.

El profesor Gell-Mann encabeza el programa Evolución de las lenguas humanas en el Instituto de Santa Fe. Otro enfoque de su trabajo se relaciona con la simplicidad, la complejidad, la regularidad y la aleatoriedad. También le preocupa cómo el conocimiento y la comprensión se extraerán de la “información” que ahora se puede transmitir y almacenar como resultado de la revolución digital (SFI, 2016).

La participación de **John Holland** en Santa Fe se remonta a los primeros talleres en el instituto donde compartió su pensamiento sobre ideas clave sobre la adaptación, pionero en el estudio de sistemas adaptativos complejos y la figura principal en lo que se conoció como “algoritmos genéticos”. Los algoritmos genéticos son representaciones computacionales paralelas de los procesos de variación, recombinación y selección sobre la base de la aptitud que desencadenan la mayoría de los procesos de evolución y adaptación (SFI, 2016). Se han aplicado con éxito a tareas generales de resolución de problemas, control y optimización, aprendizaje inductivo (por ejemplo, sistemas clasificadores) y modelado de sistemas ecológicos (por ejemplo, el modelo ECHO).

En 1975, Holanda publicó el innovador libro “Adaptación en sistemas naturales y artificiales”. Intentado ser la base de una teoría general de la adaptación. Sus libros subsiguientes “Orden oculto: de cómo la adaptación crea complejidad” (1995), “Emergencia: del caos al orden” (1998), “Señales y límites: Bloques de construcción para sistemas adaptativos complejos” (2012) y “Complejidad: una breve introducción” (2014), resumida Su trabajo más reciente, que ayudó a madurar y formalizar el campo de los sistemas adaptativos complejos.

Melanie Mitchell es profesora de ciencias de la computación en la Universidad Estatal de Portland y profesora externa y miembro de la Junta de Ciencias del Instituto de Santa Fe. Desarrolló el Copycat, un programa de computadora que hace analogías. Es autora o editora de cinco libros y numerosos artículos académicos en los campos de la inteligencia artificial, la ciencia cognitiva y los sistemas complejos (SFI, 2016).

Por otro lado tenemos a **Ilya Prigogine**, un premio Nobel de química en 1977 por sus contribuciones a la termodinámica de no equilibrio, ha estudiado la teoría de las estructuras disipativas. Observó que los átomos y las moléculas están expuestos a la energía y al material que fluye desde el exterior, invirtiendo parcialmente la descomposición requerida por la segunda ley de la termodinámica. Su trabajo sobre estructuras disipativas ha estimulado a muchos científicos en todo el mundo y puede tener profundas consecuencias para nuestra comprensión de los sistemas biológicos. Prigogine apunta a una mejor comprensión del papel del tiempo en las ciencias físicas y en la biología. Ha contribuido significativamente a la comprensión de los procesos irreversibles, particularmente en sistemas lejos del equilibrio.

Stuart Kauffman fue una figura destacada en biología, quien escribió sobre la relevancia de la adaptación además de la selección darwiniana en la evolución de las especies. La principal obra “En casa en el universo”. Si bien los conceptos de CAS aún no han alcanzado una aceptación generalizada en la comunidad científica, el Instituto de Santa Fe sigue siendo una fuerza poderosa para desarrollar y promover este pensamiento.

3.2. Algunas Nociones

Los Sistemas Complejos se pueden clasificar en dos: **Sistemas Complejos no Adaptables**, como los remolinos en el agua, los huracanes, tornados, el clima, etc; y **Sistemas Complejos Adaptables o CAS**, Como los organismos vivos, los grupos humanos y sistemas artificiales (sistemas de computación distribuidos, sistemas de inteligencia artificial, redes neuronales artificiales, programas evolutivos) (Laguna y cols., 2016). Los CAS al ser un tipo especial de sistema complejo, carece de una definición global; pero, esto no impidió que algunas figuras importantes, que desarrollaron esta teoría dieran su definición.

M. Gell-Mann en su obra “El Quark y el Jaguar: Aventuras en lo simple y lo complejo” explora la relación entre lo simple y lo complejo. Para M. Gell-Mann el “Quark” simboliza lo simple, en sus propias palabras “las leyes físicas básicas y simples que gobiernan el universo y toda la materia que éste contiene” (Gell-Mann, García, y Pastor, 1995, p.20), y el “Jaguar” representa “la complejidad del mundo que nos rodea, especialmente tal como se manifiesta en los Sistemas Complejos Adaptativos” (Gell-Mann y cols., 1995, p.20). Este mismo autor afirma, que las ciencias de la complejidad no sólo intenta desentrañar el significado de lo “simple” y lo “complejo”, sino también las semejanzas y diferencias entre los Sistemas Complejos Adaptativos implicados en procesos tan diversos como “el origen de la vida, la evolución biológica, la dinámica de los ecosistemas, el sistema inmunitario de los mamíferos, el aprendizaje y los procesos mentales en los animales (...)” (Gell-Mann y cols., 1995, p.24).



Figura 3.1:
Murray Gell-Mann

Un sistema complejo adaptativo adquiere información acerca tanto de su entorno como de la interacción entre el propio sistema y dicho entorno, identificando regularidades, condensándolas en una especie de «esquema» o modelo y actuando en el mundo real sobre la base de dicho esquema. En cada caso hay diversos esquemas en competencia, y los resultados de la acción en el mundo real influyen de modo retroactivo en dicha competencia (Gell-Mann y cols., 1995, p.24).

Por lo anterior se puede afirmar que un CAS es un sistema abierto, por el hecho, que adquiere información de su entorno, y a partir de sus regularidades o “azar” crea un esquema, que proporciona una descripción del mundo y permite que el CAS prescriba el comportamiento por sí mismo. Esta secuencia conduce al comportamiento emergente observado desde sistemas adaptativos complejos sobre el cual actúa el sistema; M. Gell-Mann admitió que su uso del término “esquema” está tomado de la psicología, donde se refiere a una estructura conceptual utilizado por la mente para captar un aspecto de la realidad (Gell-Mann y cols., 1995).

Para M. Gell-Mann un sistema que aprende y evoluciona (evolución biológica) es un CAS. Por ejemplo los seres humanos adquieren conocimiento principalmente a través del uso individual o colectivo de su cerebro, y en los animales la herencia genética es responsable de la mayor parte de la información necesaria para la supervivencia; esto es, producto de millones de años de evolución, suele denominarse “instinto” (Gell-Mann y cols., 1995). También afirma que “es la evolución biológica, la que ha hecho surgir en los organismos la capacidad de aprender” (Gell-Mann y cols., 1995, 25). La evolución biológica, por ejemplo, puede conducir tanto a soluciones instintivas o mediante el aprendizaje a los problemas que debe afrontar un organismo. M. Gell-Mann nos presenta un diagrama que ilustra las relaciones entre diversos Sistemas Complejos Adaptativos terrestres.

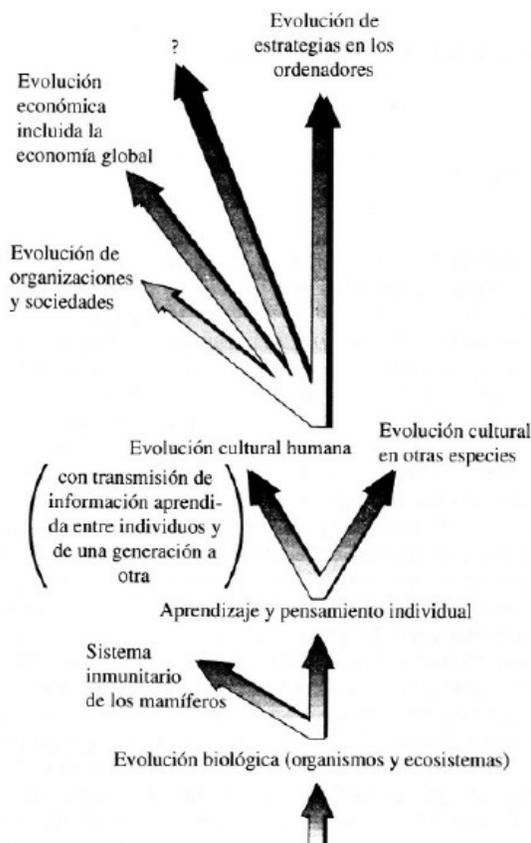


Figura 3.2: Ilustración las de relaciones entre diversos CAS terrestres.

(Gell-Mann y cols., 1995, p.26).

Hace unos cuatro mil millones de años, determinadas reacciones químicas que incluían algún mecanismo de reproducción y de transmisión de las variaciones condujeron a la aparición de la primera forma de vida y después a los diversos organismos que constituyen las comunidades ecológicas. Más tarde la vida originó nuevos sistemas complejos adaptativos, como el sistema inmunitario y los procesos de aprendizaje. En los seres humanos el desarrollo de la capacidad para el lenguaje simbólico convirtió el aprendizaje en una actividad cultural elaborada, y dentro de la cultura humana han surgido nuevos sistemas complejos adaptativos: sociedades, organizaciones, la economía o la ciencia, por citar unos cuantos (Gell-Mann y cols., 1995, p.26).

Holland utiliza el concepto de CAS para explicar la coherencia encontrada en fenómenos aparentemente complejos como el sistema inmune humano y las cadenas de suministro. En su libro “Orden oculto: de cómo la adaptación crea complejidad” (1995) define un CAS como:

Sistemas compuestos de agentes interactivos descritos en términos de reglas. Estos agentes se adaptan cambiando sus reglas cuando acumulan experiencia. En los CAS la mayor parte del medio ambiente de cualquier agente adaptable está constituido por otros agentes adaptables, de manera que una porción de los esfuerzos de adaptación de cualquier agente es utilizada para adaptarse a otros agentes adaptables. Este rasgo constituye un fundamento importante de los patrones temporales complejos que generan los CAS. Para comprender los CAS debemos comprender estos patrones siempre cambiantes (p.10).



Figura 3.3:
John H. Holland

Para comprender mejor los sistemas complejos adaptativos, **Holland (1992)** propone mirar un sistema en particular. Considera el sistema inmune,

consiste en un gran número de unidades altamente móviles, llamados anticuerpos, los cuales repelen continuamente o destruyen unas oleadas de invasores siempre cambiantes, llamados antígenos. los invasores (principalmente bioquímicos, bacterias y virus) se presentan en infinitas variedades, tan diferentes entre sí como los copos de nieve, Debido a esta variedad y a que siempre están apareciendo nuevos invasores, el sistema inmune no puede simplemente hacer una lista de los posibles invasores y prepararse para combatirlos. Incluso si podría tomarse el tiempo para hacerlo, simplemente no hay espacio suficiente para almacenar toda esa información. En cambio, el sistema inmunológico debe cambiar o adaptarse a sus anticuerpos a medida que aparecen nuevos invasores (p.18).

El sistema inmunológico debe distinguir las partes legítimas de su propietario de invasores siempre cambiante. Esta es una tarea difícil porque las células del propietario y sus componentes

bioquímicos se encuentran por decenas de miles de clases diferentes, y cualquier error en la identificación da lugar a las enfermedades autoinmunes (Holland, 1992). El sistema inmunológico es tan bueno para la auto identificación, no confundirá sus propias células con aquellas en un injerto de piel de un hermano. El sistema inmunológico cuenta con “un proceso continuo de adaptación que le permite alcanzar niveles de identificación tan notables” (Holland, 1992, p.19). Otro ejemplo presentado por Holland (2004) Consideremos el sistema nervioso central (SNC) de los mamíferos

el SNC está constituido por un gran número de células, llamadas neuronas, que adquieren multitud de formas. Incluso un SNC simple consta de miles de millones de neuronas, de centenares de tipos diferentes, y cada neurona está en contacto directo con otros cientos, e incluso con miles, de células nerviosas, formando una red de trabajo compleja. Pulsos de energía recorren esta red produciendo el "telar encantado" de Sherrington (1951) (p.18).

Para Holland el SNC tiene una “identidad emergente que aprende rápidamente y con gran facilidad” (p.18). La actividad individual de una neurona es compleja, pero la identidad agregada del SNC es mucho más compleja que la suma de estas actividades individuales. Esto es, un comportamiento no lineal, dado que depende más de las interacciones que de las acciones.

Muchos CAS tienen “la propiedad de sufrir grandes cambios cuando se les introducen pequeñas perturbaciones (efecto amplificador)” (Holland, 2004, p.21). Para Holland el comportamiento de un CAS es más complejo que la suma simple de los comportamientos de sus partes. Esto genera no-linealidades en los SCA. “La no linealidad significa que nuestras herramientas más útiles para generalizar las observaciones y convertirlas en una teoría (análisis de tendencias, determinación de equilibrios, medios de muestreo, etc.) quedarán totalmente desafiladas” (Holland, 2004)[p.21].

Mitchell en su trabajo “Complexity: A guided tour” (2009) propone una definición del término Sistema Complejo, Esta no presenta una distinción entre sistemas adaptativos complejos y sistemas complejos no adaptativos. Porque la mayoría de los sistemas que analizo michel en su trabajo son adaptativos.



Figura 3.4:
Melanie Mitchell

Un sistema en el que las grandes redes de componentes sin control central y reglas de operación simples dan lugar a comportamientos colectivos complejos, procesamiento de información sofisticado y adaptación a través del aprendizaje o la evolución. (Mitchell, 2009, p.13).

Para (Mitchell, 2009) los sistemas que tienen “un comportamiento organizado sin un controlador o líder interno o externo a veces se denominan auto organizados” (p13). Por otro lado, “las reglas simples producen un comportamiento complejo en formas difíciles de predecir, el comportamiento macroscópico de tales sistemas a veces se llama emergente” (Mitchell, 2009, p.13). Los componentes individuales, o sus funciones en el comportamiento colectivo del sistema, son simples con respecto a ese comportamiento colectivo (Mitchell, 2009). A grosso modo, la noción de emergencia para Mitchell se refiere al hecho de que el comportamiento global del sistema no solo es complejo sino que surge de las acciones colectivas de los componentes simples, y la su noción de no linealidad es: el todo es más que la suma de las partes (Mitchell, 2009).

Estas definiciones en general, comparten su consideración como una clase específica de sistema abierto, por ejemplo, el ser humano para mantener su sistema (vida) absorbe energía mediante la ingestión de alimento y la respiración. Otra propiedad es que están formados por múltiples componentes o agentes regidos por reglas, que en algunos casos son simples; estas generan un comportamiento complejo del sistema y sin un controlador central; esto nos da paso a la emergencia, la no linealidad y el auto organización. Por último, como característica más relevantes se adaptan, a través de procesos como el aprendizaje y la evolución entre sus componentes, esto procesos pueden ser tanto colectivamente como individual.

Otros ejemplos de los CAS, se encuentra en él estudió de biología, sociología y economía. Como lo son: el desarrollo de embriones, función del sistema inmune adaptativo, ecologías, evo-

lución genética, pensamiento y aprendizaje en el cerebro, sistemas meteorológicos, economías de mercado, sistemas de comercio, sistemas sociales, culturas, políticos, tráfico, enjambres de insectos, el rebaño de aves, implementación de nuevas ideas, la prueba de los científicos, las teorías, y las bacterias que se vuelven resistentes a un antibiótico (Brownlee, 2007).

3.3. Características

Como se mencionó anteriormente los CAS carecen de una definición, pero se les atribuyen algunas propiedades comunes que bien valdrán la pena resaltar. Estas propiedades no son las únicas, ya que el proceso mismo de selección es, hasta cierto punto, cuestión de gustos. Según Rouse (2000), los CAS tienen las siguientes características:

- No lineales y dinámicos, como resultado los comportamientos del sistema pueden ser aleatorios o caóticos.
- Se componen de agentes independientes cuyo comportamiento está basado en leyes físicas, psicológicas, sociales o de acuerdo con las exigencias de la dinámica del sistema.
- Dado que las necesidades o deseos de los agentes, que se refleja en sus reglas, no son homogéneos, sus objetivos y comportamientos son propensos a conflictos. En respuesta a estos conflictos o competiciones, los agentes tienden a adaptarse a los comportamientos de los demás.
- Los agentes son inteligentes. A medida que experimentan y adquieren experiencia, los agentes aprenden y cambian sus comportamientos en consecuencia. De este modo, el comportamiento global del sistema cambia con el tiempo.
- La adaptación y el aprendizaje tienden a dar lugar a la auto organización. Patrones de comportamiento surgen en lugar de ser diseñado en el sistema. La naturaleza de los comportamientos emergentes puede variar de innovaciones valiosas a accidentes desafortunados.
- No hay un único punto (s) de control. Los comportamientos del sistema son a menudo imprevisibles e incontrolables, y nadie está a cargo. En consecuencia,

los comportamientos de los sistemas adaptativos complejos, por lo general, pueden ser influenciados más fácilmente que controlado (p.56).

Holland sugiere 4 propiedades, y 3 mecanismos, que un CAS debe poseer, los cuales los llama los “siete básicos”.

- **Agregación:** (propiedad) La complejidad surge de la interacción de componentes más pequeños, que a su vez pueden ser productos de sistemas.
- **Etiquetado:** (mecanismo) Los agentes están diferenciados y poseen una manera de discriminar a los agentes con propiedades particulares.
- **No linealidad:** (propiedad) Los agentes interactúan de forma dinámica y no lineal.
- **Flujos:** (propiedad) Los agentes se organizan en redes de interacción en las que una interacción puede desencadenar (fluir) las siguientes interacciones.
- **Diversidad:** (propiedad) Los agentes evolucionan para llenar diversos nichos, que se definen por los aspectos específicos de las interacciones de los agentes. El concepto de nicho sobrevive a los agentes que habitan, y la evolución de los nichos tiene un mayor impacto en el sistema que la evolución de los agentes (niveles de abstracción y control).
- **Modelos internos:** (mecanismo) Los agentes se cambian a través de las interacciones, y los cambios sesgan las acciones futuras (los agentes se adaptan). Las representaciones internas poseen información sobre cómo explotar la regularidad de sus interacciones, sin definir necesariamente de manera explícita esa regularidad.
- **Bloques de construcción:** (mecanismo) Los componentes se reutilizan para múltiples propósitos (citado en (**Brownlee, 2007**, p.2)).

Por otro lado **Gell Mann**(**M. Gell-Mann, 1994**) propone las siguientes características generales de un CAS:

- i) Su experiencia se puede considerar como un conjunto de datos, generalmente de entrada → salida de datos, con las entradas que a menudo incluyen el comportamiento del sistema y las salidas que a menudo incluyen efectos en el sistema.

- ii) El sistema identifica las regularidades percibidas de ciertos tipos en la experiencia, aunque a veces las regularidades de esos tipos se pasan por alto o las características aleatorias se identifican erróneamente como regularidades. La información restante se trata como aleatoria, y gran parte de ella a menudo se trata.
- iii) La experiencia no se registra simplemente en una tabla de búsqueda; en cambio, las regularidades percibidas se comprimen en un esquema. Procesos de mutación de varios tipos dan lugar a esquemas rivales. Cada esquema proporciona, a su manera, una combinación de descripción, predicción y (en lo que concierne al comportamiento), prescripciones para la acción. Se pueden proporcionar incluso en casos que no se han encontrado antes, y luego no solo por interpolación y extrapolación, sino a menudo por extensiones de experiencia mucho más sofisticadas.
- iv) Los resultados obtenidos por un esquema en el mundo real luego se retroalimentan para afectar su posición con respecto a los otros esquemas con los que está compitiendo (p.19).

3.4. Aplicaciones

Los CAS se pueden modelar a partir de:

- a. Ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE) y ecuaciones diferenciales parciales (PDE).
- b. Autómatas Celulares (AC).
- c. Teoría evolutiva de juegos.
- d. Los modelos basados en agentes.
- e. Las redes.
- f. Cálculo fraccional.

3.4.1. Autómatas Celulares (AC)

John Von Neumann en la década de 1940 intentaba modelar una máquina que fuera capaz de auto replicarse, llegando así a un modelo matemático de dicha maquina con reglas complicadas sobre una red rectangular. En este punto surgen los llamados Autómatas Celulares o (AC), “Inicialmente fueron interpretados como conjunto de células que crecían, se reproducían y morían a medida que pasaba el tiempo” (Gómez, 2011, p.3). De manera más puntual

Un autómatata celular es un modelo matemático para un sistema dinámico, compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados o valores. Estos estados son alterados de un instante a otro en unidades de tiempo discreto, es decir, que se puede cuantificar con valores enteros a intervalos regulares. De esta manera este conjunto de células logran una evolución según una determinada expresión matemática, que es sensible a los estados de las células vecinas, la cual se le conoce como regla de transición local (Gómez, 2011, p.4).

Elementos de un Autómata Celular

La definición de un AC requiere mencionar sus elementos básicos:

- **Arreglo Regular.** Ya sea un plano de 2 dimensiones o un espacio n-dimensional, este es el espacio de evoluciones, y cada división homogénea de arreglo es llamada célula.
- **Conjunto de Estados.** Es finito y cada elemento o célula del arreglo toma un valor de este conjunto de estados. También se denomina alfabeto. Puede ser expresado en valores o colores.
- **Configuración Inicial.** Consiste en asignar un estado a cada una de las células del espacio de evolución inicial del sistema
- **Vecindades.** Define el conjunto contiguo de células y posición relativa respecto a cada una de ellas. A cada vecindad diferente corresponde un elemento del conjunto de estados
- **Función Local.** Es la regla de evolución que determina el comportamiento del AC. Se conforma de una célula central y sus vecindades. Define como debe cambiar de estado cada célula dependiendo de los estados anteriores de sus vecindades. Puede ser una expresión algebraica o un grupo de ecuaciones (Gómez, 2011, p.4).

Los autómatas celulares han sido utilizados con éxito en distintas disciplinas, y están relacionados con una variedad de conceptos como sistemas dinámicos, teoría del caos, sistemas no lineales, las ecuaciones diferenciales y las máquinas abstractas de Turing, entre otros. Pero han desempeñado un papel considerable como modelos simples para el estudio de sistemas complejos adaptativos, al capturar el comportamiento más simple posible de los elementos del sistema y sus interacciones (Gómez, 2011).

Por todo esto su aplicación es muy variada como ser simulación de evacuación de barcos y salas de cine, estudio de mercados y efectos de la publicidad, diversión, arte, investigación, simulación de procesos físicos, químicos y biológicos, crecimiento y propagación de células cancerosas, epidemiología, finanzas y economía, crecimiento de cristales, patrones de pigmentación en caracoles, biología del desarrollo, dispersión de árboles dentro de un ecosistema, teoría de la relatividad, reacciones químicas, dinámica de poblaciones, coevolución, geología, puntos cuánticos, tráfico vehicular, redes neuronales e inteligencia artificial, criptografía, termodinámica e hidrodinámica.

El juego de la vida

El Juego de la vida, es uno de los modelos más elementales de un autómata celular con la cual se entenderá mejor la teoría dada, el juego de la vida consiste de muchas celdas donde cada celda ocupa un punto en una cuadrícula bidimensional, tiene dos estados “vivo” o “muerto” y se conecta a cuatro vecinos a lo largo de las líneas de la cuadrícula. La regla de actualización es la misma para todas las celdas y sigue una simple e intuitiva conjetura sobre la dinámica ecológica.

1. Una célula viva muere si tiene uno o cero vecinos (aislamiento) o cuatro vecinos (hacinamiento).
2. Si tiene dos o tres vecinos sobrevive.
3. Una célula muerta cobra vida si está rodeada por precisamente tres vecinos vivos.

La diversión del juego de la vida radica en su evolución en el tiempo, no capturada fácilmente por diagramas estáticos. Para que nos quede más claro, vamos a jugar, ayudándonos de un software especial llamado NetLogo.

En el paso 0 se plasmaron cuadrículas bidimensionales o celdas con los estados ya dados, unas en negro que indican que están muertas y las que están en blanco indican que están vivas, esto nos permite aplicar la regla de la actualización, la cual mediante las normas del juego, se obtiene el paso 1

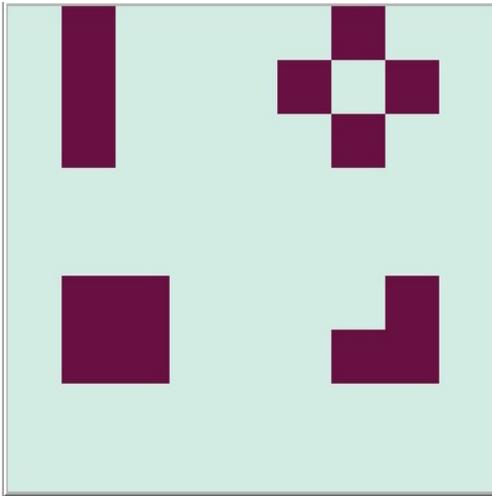


Figura 3.5: paso 0. Elaboración propia en NetLogo

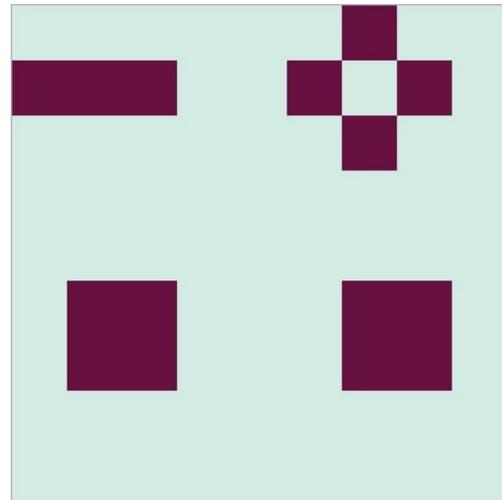


Figura 3.6: paso 1. Elaboración propia en NetLogo

Volviendo a aplicar la ley de la actualización con el resultado del paso 0 (paso 1) obtendremos el paso 2 y haciendo el proceso repetitivo es que se forma el juego de la vida, y ahí es donde está la diversión del juego, la idea es mirar el resultado de hacer el proceso iterativo al aplicar la ley de la actualización de estados, algunas veces las celdas vivas crecen, decrecen o se estabilizan (dependiendo del patrón inicial).

Capítulo 4

Conclusiones

- El estudio de los CAS requiere nuevas teorías y técnicas, ya que tales sistemas generalmente operan lejos del equilibrio de manera no lineal y continuamente se someten a cambios, los cuales provocan una adaptación, ya sea de manera individual o colectiva entre sus componentes o agentes. Los enfoques matemáticos clásicos basados en el equilibrio que se basan en la linealidad, los elementos de atracción, los puntos fijos, etc. No son suficientes para el estudio, así que el estudio analítico usual no será suficiente, luego sería necesario el influir un conocimiento complejo en la formación, un conocimiento que fomente más el desarrollo de habilidades como pensamiento crítico, la colaboración y la creatividad, con el fin de que en un futuro el estudio de estas ciencias sea más claro.

- Ya con toda esta información, nos atrevemos a construir propiamente las características de un sistema complejo adaptativo:
 1. Una clase específica de sistema abierto, conformados por múltiples componentes o agentes regidos por reglas (simples o complejas) que generan un comportamiento complejo del sistema.
 2. Todos estos sistemas se adaptan, es decir, cambian su comportamiento a través de procesos de aprendizaje, o evolutivos, para transmitir y responder al entorno y/o a las interacciones con otros componentes del sistema y así mejorar sus posibilidades de supervivencia o éxito.

3. El sistema se auto-organiza con el fin de recuperar el equilibrio (organizarse), modificándose y adaptándose al entorno que lo rodea y lo contiene.
4. Son sistemas dinámicos no lineales, dado que dependen más de las interacciones que las acciones entre sus componentes. “pequeños cambios pueden producir grandes transformaciones y viceversa” conocida como efecto mariposa, esto refiriéndonos a lo que se puede producir en un cambio en las interacciones de los componentes
5. Emergencia, son comportamientos no observados antes en el sistema o estados visibles en el sistema pero no en sus componentes.
6. Carecen de equilibrio debido a que necesitan energía de su entorno para mantener el sistema
7. Una característica muy importante recibe el nombre de “descomposición cercana” esto nos dice que si el sistema llega a romperse por algún motivo, los grupos de más alto nivel se convierten en sistemas independientes.

Referencias

- Aguilar, J. (2014). Introducción a los sistemas emergentes. *Talleres Gráficos*.
- Antequera. (2004). *El potencial de sostenibilidad de los asentamientos humanos*. Juan Carlos Martínez Coll.
- Aracil, J., Salas, F., y Gordillo, F. S. F. (2007, 03). Notas del curso .^a análisis de sistemas no lineales.
- Brownlee, J. (2007). *Complex adaptive systems. complex intelligent systems laboratory, centre for information technology research* (Inf. Téc.). Technical Report.
- Fromm, J. (2004). *The emergence of complexity*. Kassel university press Kassel.
- Gell-Mann, García, y Pastor. (1995). *El quark y el jaguar: aventuras en lo simple y lo complejo*. Tusquets.
- Gell-Mann, M. (1994). Complex adaptive systems. , 18-19.
- Gómez, D. A. R. (2011). *Descripción y aplicaciones de los autómatas celulares* (Inf. Téc.). tech. rep., FES Acatlán, UNAM.
- Holland, J. H. (1992). Complex adaptive systems. *Daedalus*, 17–30.
- Holland, J. H. (2004). *El orden oculto: De cómo la adaptación crea la complejidad*. Fondo de Cultura Económica.
- Laguna, Marcelín, Patrick, y Vázquez. (2016). *Complejidad y sistemas complejos: un acercamiento multidimensional*. México: EditoraC3. CopIt-arXives. <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir>
- Maldonado. (2005). Ciencias de la complejidad: Ciencias de los cambios súbitos. *Odeon*(2).
- Maldonado. (2012). *Derivas de la complejidad: fundamentos científicos y filosóficos*. Bogotá: Universidad del Rosario.
- Maldonado. (2014). ¿ qué es un sistema complejo? *Revista colombiana de filosofía de la ciencia*, 14(29), 81.
- Maldonado. (2016). Transformación de la no-complejidad a la complejidad. *Ingeniería* (0121-

- 750X), 21(3).
- Maldonado, Villamil, y Gómez. (2009). Complejidad: revolución científica y teoría. En *Complejidad: revolución científica y teoría*. Editorial de la Universidad del Rosario.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour*. Oxford University Press.
- Moriello, S. (2003). Sistemas complejos, caos y vida artificial. *Red científica*, 1579–0233.
- Morin, E. (1994). *Introducción al pensamiento complejo*. Gedisa Barcelona.
- Nicola, N. (2013). Nonlinear dynamics and chaos: an introduction. , 19–24.
- Prada, Ó. A. E. (2013). Aproximación a las ciencias de la complejidad. *Revista de la Universidad de la Salle*(61), 45–66.
- Prigogine, I. (1996). *El fin de las certidumbres*. Andrés Bello.
- Ramírez, L. A. (2002). Teoría de sistemas. *Universidad Nacional de Colombia sede Manizales*. Recuperado de http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060001/Material_extra/Teor%20de%20Sistemas.pdf.
- Rodríguez, L., y Aguirre, J. (2011). Teorías de la complejidad y ciencias sociales. *Nómadas*, 30, 147–166.
- Rouse, W. (2000, 04). Managing complexity: Disease control as a complex adaptive system. *Information-Knowledge-Systems Management*, 2, 143-165.
- Scott, A. C. (2007). The nonlinear universe: Chaos, emergence. *Life*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer.
- SFI. (2016). *Instituto santa fe*. url<https://www.santafe.edu/>.
- Thom, R. (1987). *Estabilidad estructural y morfogénesis: Ensayo de una teoría general de los modelos* (n.º Sirsi) i9788474322651).
- Von Bertalanffy, L., y cols. (1993). *Teoría general de los sistemas*. Fondo de cultura económica.
- Zoya, L. G. R., Roggero, P., y Zoya, P. G. R. (2015). Pensamiento complejo y ciencias de la complejidad. propuesta para su articulación epistemológica y metodológica. *Argumentos*, 28(78), 187–206.