Otras publicaciones del CIESTAAM

Libros:

- Innovaciones en pro de la productividad, sostenibilidad e inclusión en la agricultura -Un ejercicio de benchmarking global-
- Contexto y visión de futuros a construir para Chapingo
- Modelos de vinculación universitaria para animar procesos de innovación agropecuaria
- Agronegocios. Desafíos, estrategias y modelos de negocio
- Los negocios del café ¿Cómo innovar en el contexto de la paradoja del café, en pro de una red de valor más inclusiva y accesible?
- La piña mexicana frente al reto de la innovación. Avances y retos en la gestión de la innovación. Colección Trópico Húmedo
- ¡Otro campo es posible! Agenda pública y política con relación al campo mexicano
- Modelos alternativos de capacitación y extensión comunitaria

Metodologías y herramientas para la investigación

- Metodología de historia oral, V11
- Análisis de sistemas de innovación en cadenas agroalimentarias, V10
- Nota metodológica sobre el Índice de ventaja comparativa revelada normalizada, V9
- Análisis de procesos de innovación en el sector agroalimentario y rural, V8
- Genealogías, Trayectorias y Redes. Metodologías para los Estudios Sociales de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, V7
- Metodología para estimar costos, ingresos y viabilidad financiera y económica en Unidades Representativas de Producción, V6
- Análisis de redes sociales: conceptos clave y cálculo de indicadores, V5
- Herramientas metodológicas para aplicaciones del experimento de elección, V4
- Herramientas metodológicas para aplicaciones del método de valoración contingente, V3
- Herramientas digitales en la investigación académica, V2
- Pautas para citar y construir la lista de referencias en documentos académicos, V1

Reportes de Investigación

- Configuración de la red de conocimiento en la producción de huitlacoche en el Valle de Puebla. Reporte 98
- Estudios sobre el manejo orgánico del suelo en el norte de México. Reporte 97
- Análisis del potencial productivo y comercial de durazno en México. Reporte 96
- ¿Qué significa innovar en el ámbito del sector agroalimentario? ...y ¡cómo lo hemos hecho! Reporte 95
- Gestión de la innovación para la producción sostenible de maíz en regiones de alta marginación: Lecciones para el diseño e implementación de políticas públicas. Reporte 94
- Políticas públicas para el fomento de clústeres de horticultura protegida con pequeños productores: Lecciones aprendidas. Reporte 93

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

ISBN: 978-607-12-0682-4

EL PENSAMIENTO DE SISTEMAS EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO:

ENFOQUES Y TÉCNICAS PARA SU APLICACIÓN

COORDINADORES:

LETICIA ELIZABETH ROMERO GARCÍA
NORMAN AGUILAR GALLEGOS
JORGE AGUILAR ÁVILA



12

METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS PARA LA INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

El **pensamiento de sistemas** en el sector agroalimentario: enfoques y técnicas para su aplicación

12

METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS PARA LA INVESTIGACIÓN

El **pensamiento de sistemas** en el sector agroalimentario: enfoques y técnicas para su aplicación

Coordinadores:
Leticia Elizabeth Romero García
Norman Aguilar Gallegos
Jorge Aguilar Ávila

12

METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS PARA LA INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

El pensamiento de sistemas en el sector agroalimentario: enfoques y técnicas para su aplicación

D.R. © Universidad Autónoma Chapingo
Carretera México-Texcoco, km 38.5,
Texcoco, Estado de México, C.P. 56230
Tel: 595 9521500, ext. 5142
publicaciones@chapingo.mx
Primera edición, mayo 2024
ISBN: 978-607-12-0433-2 (obra completa)
ISBN: 978-607-12-0682-4 (volumen 12)

Directorio de la UACh

Dr. Angel Garduño García
Rector

M.C. Noé López Martínez
Director General Académico

Dra. Consuelo Silvia Olivia Lobato Calleros
Directora General de Investigación, Posgrado y Servicio

Dr. Samuel Pérez Nieto
Director General de Patrimonio y Finanzas

Ing. Jorge Torres Bribiesca
Director General de Administración

Mtra. Tania Jessica Pérez Buendía
Directora General de Difusión Cultural

M. C. Daniel Rodríguez Martínez
Subdirector de Comunicación Universitaria

Dr. Mario Salvador González Rodríguez
Jefe del Departamento de Publicaciones

Dr. Jorge Aguilar Ávila
Director del CIESTAAM

Comité Editorial

Dr. Vinicio Horacio Santoyo Cortés
Dr. Juan Antonio Leos Rodríguez
Dr. Manrrubio Muñoz Rodríguez
Dr. Jorge Gustavo Ocampo Ledesma

Esta obra, arbitrada por pares académicos, se privilegia con el aval de la institución editora.

Cuidado de la edición: Uziel Porras Carrasco
Diseño editorial: Carlos de la Cruz Ramírez

Para citar esta publicación se recomienda el formato APA:

Romero-García, L. E., Aguilar-Gallegos, N., y Aguilar-Ávila, J. (2024). *El pensamiento de sistemas en el sector agroalimentario: enfoques y técnicas para su aplicación*. Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM.



Índice

Prólogo 12

1. Pensamiento de sistemas 15
1.1. Resumen 15
1.2. Introducción 16
1.3. Idealismo, Materialismo y Sistémica 17
1.4. Ciencia Tradicional y Ciencia de Sistemas 19
1.5. Paradigma Positivista 21
1.6. Paradigma Naturalista 21
1.7. Paradigma Crítico 21
1.8. Pensamiento de sistemas como enfoque para abordar problemas 23
1.9. Conclusiones 25
1.10. Referencias 26

2. Metodología de Sistemas Suaves 29
2.1. Resumen 29
2.2. Introducción 30
2.3. Origen de la Metodología de Sistemas Suaves 32
2.4. Estructura de la MSS 32
2.5. Desarrollo de las etapas de la MSS 34
Etapa 1. Situación del problema no estructurado 34
Etapa 2. Situación del problema expresado. Visión rica 34
Etapa 3. Definición raíz de los sistemas relevantes 36
Etapa 4. Modelos conceptuales 36
Etapa 5. Comparación de modelos con el mundo real 37
Etapa 6. Cambios deseables y factibles 39
Etapa 7. Acción para mejorar la situación problema 39
2.6. Aplicación de la MSS en el sector agroalimentario 39
2.7. Literatura recomendada y complementaria 40
2.8. Conclusiones 41
2.9. Referencias 42

3. Modelo de Sistemas Viables 45
3.1. Resumen 45
3.2. Introducción: Antecedentes y origen del Modelo de Sistemas Viables 46
3.3. Elementos del Modelo de Sistemas Viables 48
3.3.1. Aforismos 50
3.3.2. Principios 50
3.3.3. Teorema del sistema recursivo 51
3.3.4. Axiomas 51
3.3.5. Ley de cohesión para las múltiples recursiones de los sistemas viables 51
3.4. Algunas otras interpretaciones del MSV 51
3.4.1. La interpretación del MSV por Espejo 52
3.4.2. La interpretación de Espinosa y Walker: un acercamiento a la MSS 53
3.4.3. La complementariedad del MSV y la MSS de Ramírez Gutiérrez et al. (2021) 54
3.5. Aplicaciones del MSV 56
3.6. Conclusiones 57
3.7. Referencias 58

4. Pensamiento de sistemas y propiedades fractales de sistemas complejos 61
4.1. Resumen 61
4.2. Introducción: Pensamiento sistémico 62
4.3. Sistemas complejos 64
4.4. Distribuciones de colas pesadas y escalamiento dinámico 66
4.5. Leyes de potencia y comportamiento de escalamiento 68
4.6. Persistencia, correlaciones de corto y largo plazo 70
4.7. Fractales 73
4.7.1. Fractales Determinísticos 74
4.7.2. Fractales autoafínes 75
4.7.3. Fractales en los Mercados Financieros 77
4.7.4. Propiedades fractales del mercado de petróleo crudo 77
4.8. Datos 78
4.9. Caracterización fractal 79
4.10. Pronósticos de precios del petróleo crudo WTI 86
4.11. Conclusiones 89
4.12. Referencias 90

5. Dinámica de Sistemas 93
5.1. Resumen 93
5.2. Introducción 94
5.3. Conceptos básicos de Dinámica de Sistemas 95
5.3.1. Pasos de la Dinámica Sistemas 96
5.3.2. Modelación en Dinámica Sistemas 98
5.3.3. Diagramas de bucles causales 98
5.3.4. Polaridad 99

5.4. Diagrama de Forrester 101
5.4.1. Tipos de variables 101
5.4.2. Estructura 102
5.4.3. Dinámica o comportamiento del sistema 105
5.5. Conclusiones 107
5.6. Referencias 108

6. Análisis de Redes Sociales desde la Complejidad de los Sistemas 111
6.1. Resumen 111
6.2. Introducción: redes y sistemas 112
6.3. Elementos y tipos de redes 114
6.3.1. Elementos que componen una red 114
6.3.2. Tipos de redes 116
6.4. Categorías, redes en el mundo real 117
6.4.1. Redes sociales 118
6.4.2. Redes de información 120
6.4.3. Redes tecnológicas 123
6.4.4. Redes biológicas 125
6.5. Propiedades de las redes 128
6.5.1. Modelo *small-world* (mundo pequeño) 129
6.5.2. *Scale-free networks* (redes libres de escala) 130
6.5.3. *Preferential attachment* (encadenamiento o unión preferencial) 131
6.6. Conclusiones 132
6.7. Referencias 133

7. Complementariedad de Herramientas Bajo el Enfoque Sistémico 137
7.1. Resumen 137
7.2. Introducción 138
7.3. Tipos de contexto problema 139
7.4. Metodología de Sistemas Suaves 141
7.4.1. Ejemplos de aplicación 143
7.5. Conclusiones 145
7.6. Referencias 146

Prólogo

En 2021 la Organización de las Naciones Unidas organizó la "***Cumbre sobre los Sistemas Alimentarios***", señalando que éstos abarcan a todas las personas y a todo el entramado de actores y actividades interconectadas que conciernen a la alimentación de la población: es decir, producción, recolección, empaquetado, elaboración, distribución, venta, almacenamiento, comercialización, consumo y eliminación. Muchos sectores configuran los sistemas alimentarios: infraestructuras, transportes, servicios financieros, información y tecnología. El mundo en todos sus aspectos está implicado: recursos naturales, medio ambiente, economía, preferencias de las personas, cultura, conocimientos indígenas, políticas, comercio, reglamentos, entre otros[1].

En un mundo cada vez más interconectado y complejo, los sistemas alimentarios enfrentan desafíos sin precedentes. Desde el cambio climático hasta la seguridad alimentaria, pasando por la sostenibilidad, la gobernanza y la globalización. En este sentido, los problemas que afectan a los sistemas alimentarios no pueden ser ni analizados ni resueltos de manera aislada. Así, el pensamiento de sistemas ofrece una batería de herramientas invaluables.

Sin lugar a duda el pensamiento de sistemas, con su enfoque holístico y su capacidad para comprender las interrelaciones y dinámicas dentro de las cadenas agroalimentarias, ofrece elementos para la construcción de un marco teórico y metodológico tanto para identificar los problemas como para diseñar soluciones de manera integral. Este enfoque permite ver más allá de las soluciones superficiales y temporales, y puede guiar hacia intervenciones que consideren las causas subyacentes y los efectos colaterales de las acciones humanas.

Bajo este contexto, en el mes de abril del 2023 se llevó a cabo el Simposio "***El pensamiento de sistemas y sus enfoques para el sector agroalimentario***". En su organización, participaron el CIESTAAM, de la Universidad Autónoma Chapingo (UACh), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Universidad Panamericana-Guadalajara (UP-Guadalajara) y la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

[1] https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/food-systems-summit-2021/

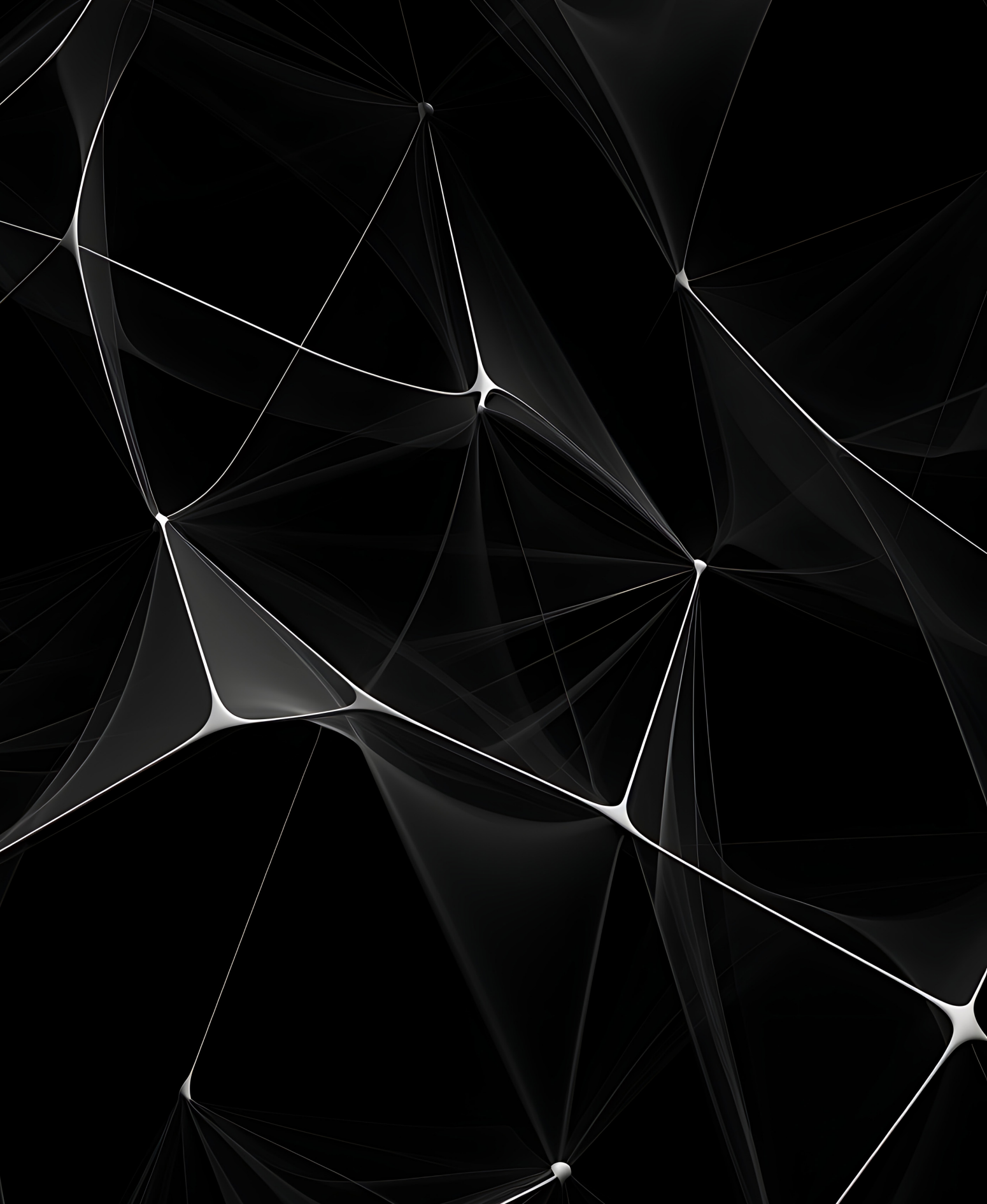
A través de tres sesiones con conferencias en línea y la participación de destacados académicos e investigadores, se abordaron tanto los fundamentos teóricos como la aplicación metodológica del pensamiento de sistemas, poniendo énfasis en las posibilidades de aplicación en el sector agroalimentario. Durante la primera sesión el Dr. Ricardo Tejeida Padilla (IPN) disertó sobre los fundamentos del pensamiento de sistemas, mientras que la Dra. Leticia Elizabeth Romero García (UAEM) explicó los pasos a seguir para aplicar la metodología de sistemas suaves. En la segunda sesión, la Dra. Ana Gabriela Ramírez Gutiérrez (UP-Guadalajara) expuso el modelo de sistemas viables, el Dr. Osvaldo Morales Matamoros (del IPN) habló sobre los sistemas complejos y la Dra. Jaqueline Yvette Sánchez García (UP-Guadalajara) analizó los principios de la dinámica de sistemas. En la tercera sesión, el Dr. Norman Aguilar Gallegos (del CIESTAAM, UACh) argumentó sobre la utilidad del análisis de redes sociales (ARS) para estudiar la complejidad de los sistemas, mientras que el Dr. Juan Enrique Núñez Ríos (UP-Guadalajara) explicó la complementariedad de herramientas bajo el enfoque de sistemas.

Dada la importancia de la temática abordada en el simposio, se tomó la iniciativa de armonizar una publicación que contenga tanto los fundamentos teóricos del pensamiento de sistemas como algunas de las herramientas discutidas en las conferencias. De ello se deriva este documento, que contiene siete capítulos que requirieron sumar más autores para su escritura, con el propósito de orientar a los interesados en este tipo de enfoque de análisis.

En esta publicación se explora cómo el pensamiento de sistemas puede transformar la manera en que concebimos y analizamos el sector agroalimentario. Desde la producción y la distribución hasta el consumo y la gestión de residuos, cada etapa de la cadena de valor agroalimentaria puede beneficiarse de las herramientas documentadas.

Los autores de esta obra provienen de diversas disciplinas. Esta diversidad de perspectivas refleja la naturaleza multifacética del sector agroalimentario y la necesidad de enfoques interdisciplinarios para abordar sus retos. Al combinar sus conocimientos y experiencias, han creado un recurso que no sólo educa, sino que también inspira a innovar y colaborar.

Tenemos la seguridad de que este libro será útil como una guía, tanto para profesionales del sector agroalimentario como para académicos, estudiantes y cualquier persona (fuera del sector agrícola) interesada en la gestión de sistemas complejos . Al adoptar el pensamiento de sistemas, se estará dando un paso crucial hacia un futuro, donde los sistemas alimentarios no solo deben satisfacer las necesidades presentes, sino que también preservan los recursos y las oportunidades para las generaciones futuras. Al explorar capítulos de esta obra, los lectores descubrirán que el pensamiento de sistemas no es solo un enfoque teórico y metodológico, sino una forma de ver y entender el mundo. Y es, en última instancia, una invitación a construir un sector agroalimentario más incluyente, justo, eficiente y sostenible.



1. Pensamiento de sistemas

Ricardo Tejeida Padilla[1, 2 *]
Isaías Badillo Piña[1, 2]
Susana Romero Juárez[2]

1.1. Resumen

El Pensamiento de Sistemas representa un nuevo enfoque para solucionar problemas complejos desde una perspectiva integral. Este considera que nada se puede entender si no se toman en cuenta los sistemas multidimensionales y sus relaciones o medio ambiente dentro de los cuales está implícito el acometido del sistema bajo estudio. Para comprender el propósito del sistema se utiliza la síntesis, la cual revela sus funciones dentro del suprasistema del cual es parte. Este nuevo enfoque forma parte de una ciencia joven llamada Sistémica o Ciencia de Sistemas, la cual aglutina un método propio y, para su tratado metodologías y modelos. Para desarrollar dicho tratado es elemental generar un "Pensamiento de Sistemas". Por ello la importancia de comprender los saberes del cuerpo de conocimientos de la Sistémica ya que entre mayor sea su comprensión mayor será el éxito de la aplicación de su pensamiento en la solución de problemas complejos.

Palabras clave: sistemas complejos, sistémica, gestión de la complejidad.

[1] Instituto Politécnico México.

[2] Grupo de Investigación en Sistémica y Turismo.

[*] Autor de correspondencia: rtejeidap@ipn.mx

1.2. Introducción

El Pensamiento de Sistemas se encuentra arraigado en los conocimientos de la Ciencia de Sistemas o Sistémica, una ciencia joven que engloba diversos enfoques y conceptos acerca de su naturaleza, formalidad, aplicabilidad y alcance. Esta metadisciplina está compuesta por una amalgama de conceptos, teorías, modelos y metodologías que no sólo desarrolla un método propio, sino que también brinda apoyo a otras disciplinas. Para comprender su posición en el ámbito científico, es esencial revisar los aspectos más relevantes de su historia, filosofía y ontología.

El inicio de la Sistémica, entre los años 500 y 300 a.C., se ve influido por el pensamiento filosófico y científico de la época. Este enfoque filosófico se refleja en las actuales posturas desde las cuales se estudian los principios y la naturaleza de los fenómenos. Los filósofos griegos, como Parménides, Platón y Aristóteles postulan que las formas, ideas y universos son entidades reales que existen de manera separada o inherente en los objetos, influyendo en lo que son estos. Esta perspectiva perdura a lo largo del tiempo siendo retomada por filósofos y científicos contemporáneos como Husserl (2005) y Heidegger (Gaos, 1996).

Aristóteles, al introducir la idea universal de las cuatro causas como origen de todas las cosas, sienta las bases de los modelos teleológicos y cibernéticos actuales de la Sistémica. La lógica aristotélica, fundamentada en los tres métodos de investigación (deducción, inducción y abducción), también forma parte esencial de la Sistémica, ya que utiliza estos métodos en el estudio de fenómenos. Aunque la deducción y la inducción son métodos familiares en la investigación, la abducción es menos conocida y merece un análisis más profundo.

La abducción es un proceso mental que implica la formulación de conjeturas y la creación de conceptos; ésta comienza con la generación de nuevas hipótesis, ya sean teóricas o físicas, formales o materiales. Este término se utiliza para describir conceptos novedosos que emergen de la observación de situaciones sin precedentes, donde los métodos deductivos o inductivos no son aplicables. Según Warfield (2006), el origen de estos conceptos recién creados permanece envuelto en el misterio. La abducción precede a la inducción que desempeña su papel en la verificación de hipótesis formuladas a través de un proceso de inferencia abductiva.

En el contexto del sector agroalimentario, la aplicación de la Sistémica cobra una relevancia especial al abordar la complejidad de los sistemas agrícolas y alimentarios. La interconexión de elementos como la producción, distribución y consumo de alimentos requiere un pensamiento sistémico para comprender y mejorar la eficiencia y sostenibilidad de toda la cadena alimentaria. La Sistémica proporciona las herramientas conceptuales necesarias para interpretar estos sistemas de manera integral, considerando no sólo los aspectos técnicos, sino también los sociales, económicos y ambientales.

La entidad que nos ocupa puede recibir distintas denominaciones, tales como: sistema, modelo o hipótesis. La filosofía y la ciencia florecieron en el contexto griego cuando se logró discernir un orden comprensible mediante el pensamiento y la acción racional. La concepción sistémica, a su vez, se origina en la teleología aristotélica la cual postula que “el todo es más que la

suma de sus partes". A pesar del avance de esta visión holística, el surgimiento del reduccionismo propuesto por Descartes eclipsó la perspectiva integral. La propuesta cartesiana abogaba por descomponer cualquier problema en tantos elementos simples y aislados como fuera posible, dando lugar al método resolutivo de Galileo, el cual los fenómenos complejos se reducen a partes y procesos elementales (Bertalanffy, 1986).

La Sistémica encuentra sus raíces en el desarrollo de la Teoría General de los Sistemas (TGS). El enfoque mecanicista de vías causales aislables y el tratamiento merista (división en partes) demostraron ser insuficientes para abordar problemas teóricos, especialmente en las ciencias biosociales. Por ello, Ludwig von Bertalanffy introdujo la noción de los organismos como sistemas en sus escritos de 1925, publicando su obra formal inicial *Theoretische Biologie* en 1932. Posteriormente, en 1950 presentaron obras como *Los problemas de la vida"* y *Teoría de sistemas abiertos en física y biología*, destacando que las leyes de los sistemas se manifiestan como analogías que aplican leyes formalmente idénticas a fenómenos totalmente distintos (Bertalanffy, 2004).

Si bien Bertalanffy es reconocido como el creador de la TGS, la teoría abarca otras disciplinas como la Cibernética de Wiener (1981), la Teoría de conjuntos de Mesarovic (1963), la Variedad requisita de Ashby (1958), la Teoría de las redes de Rapoport (1963) y la Teoría de sistemas vivientes de Miller (1978). La TGS se presenta como una disciplina integradora de las ciencias naturales y sociales, la cual aborda sistemas vivos y no vivos mediante principios isomorfos que preservan las interacciones internas y estudian el sistema en su totalidad, incluyendo su complejidad (van Gigch, 2012).

Con la irrupción de la teleología, o estudio del comportamiento intencional en la búsqueda de metas, Ackoff (1999) logró, desde su perspectiva paradigmática filosófica, encontrar soluciones a los problemas de interacción hombre-máquina mediante métodos de Investigación de Operaciones (IO) y administración humanista. Esta fusión, entre ingeniería e IO, caracteriza el Pensamiento de Sistemas como un proceso de indagación para responder preguntas, resolver problemas y desarrollar procedimientos más efectivos para los sistemas sociotécnicos.

1.3. Idealismo, Materialismo y Sistémica

Hegel, en su reconocimiento del pensamiento como un proceso dinámico en constante avance, postuló la noción de tríadas compuestas por tesis, antítesis y síntesis, en las cuales cada fase actúa como la base para la siguiente síntesis. Este enfoque, extrapolado por Hegel al estudio de la naturaleza, sostiene que toda realidad sigue un proceso lógico de evolución, conceptualizando el universo como un desarrollo continuo de pensamiento en contraposición a ser simplemente materia inerte actuada por el pensamiento (Frost, 2005). Además, al desarrollar los principios lógicos de su construcción (la dialéctica), Hegel destacó la ley de la negación de la negación como un elemento crucial. Según Orudzhev, esta ley implica un movimiento dialéctico donde un concepto, a través de la negación, se transforma en su opuesto y luego, mediante la negación de esta negación, se restablece la forma inicial del primero, aunque conserva el contenido del segundo. Este

proceso de negación dialéctica culmina en la construcción de un sistema donde el concepto final retoma la forma inicial, fusionando su estructura con el contenido acumulado durante todo el proceso (Orudzhev, 1980: 38).

El materialismo dialéctico, como perspectiva filosófica, postula que la materia exhibe una constante dinámica, constituyendo su forma fundamental de existencia. Este enfoque sostiene que la materia no depende de una fuerza externa para su movimiento, ya que busca principalmente los impulsos internos del desarrollo, destacando el automovimiento inherente presente en todos los procesos. Además, reconoce la infinita diversidad de formas de movimiento de la materia, subrayando su capacidad de transformación desde lo simple hacia lo complejo y de lo inferior hacia lo superior. En consonancia con esta visión, el materialismo dialéctico proclama que en los diversos procesos que acontecen en el universo, las entidades no surgen, cambian y desaparecen como unidades aisladas e individuales, sino que lo hacen en una relación e interconexión esencial. De acuerdo con esta premisa, la comprensión de cada entidad no puede lograrse de manera aislada, sino únicamente a través de la consideración de sus relaciones e interconexiones (Cornforth, 1980: 60).

El avance en el desarrollo, aunque intrincado en cada situación específica, se manifiesta a través de la confrontación entre lo novedoso y lo arraigado en el pasado. Cuando la fase emergente rechaza a la fase anterior durante el proceso evolutivo, se revela, en primer lugar, que dicha fase novedosa no podría haber surgido sino como consecuencia de la fase antigua y en contraposición a ella. Las condiciones que propician la existencia de la nueva etapa se gestaron y desarrollaron en el seno de la fase anterior. La negación constituye un progreso afirmativo que se materializa únicamente mediante el desarrollo de lo que está siendo negado. Lo antiguo no se descarta simplemente suprimiéndolo como si nunca hubiera existido; se descarta únicamente después de haber establecido las condiciones propicias para la nueva fase de progreso.

En segundo lugar, la fase anterior, aunque rechazada, representa un avance en el proceso global de desarrollo. A pesar de su negación, los avances logrados en esta etapa persisten. En cambio, dicho progreso se transfiere a la nueva etapa que no solo absorbe, sino que también incorpora todos los logros anteriores. Esto da lugar a otro aspecto dialéctico del desarrollo: la negación de la negación. A lo largo del proceso evolutivo, como consecuencia de una doble negación, una etapa posterior puede recapitular una etapa anterior, pero únicamente en un nivel superior de desarrollo.

Al abordar la cuestión de la negación de la negación, es crucial reiterar lo señalado anteriormente: la esencia de la dialéctica materialista reside en examinar un proceso "en toda su concreción", indagando cómo se desarrolla en la realidad en lugar de imponer algún esquema preconcebido y tratar de "demostrar" la necesidad de que el proceso real reproduzca un esquema ideal.

En 1946, Altshuller desarrolló un ejemplo práctico de la negación de la negación con el propósito de sistematizar una serie de pasos esenciales inherentes a la mayoría de las invenciones. Estos pasos son aplicables a cualquier nuevo intento de invención que se pretenda emprender.

Con el tiempo, Altshuller desarrolló una teoría integral para abordar problemas de inventiva, conocida en el mundo occidental como TRIZ (acrónimo en ruso de *Tieoriya Riesheniya Izobrietatielskij Zadach*). En esencia, Altshuller construyó una matriz compuesta por 39 tesis, 39 antítesis y 40 síntesis de invención (Hua et al., 2006).

El Método Sistémico considera que ambos procesos dialécticos, idealista y materialista, operan bajo el principio de complementariedad y forman parte de la epistemología de la Ciencia de Sistemas o Sistémica. La ontología de la Sistémica comprende la definición y el entendimiento de los sistemas reales y conceptuales, así como de sus interrelaciones y jerarquías. Desde la concepción de la TGS, su filosofía refuta la idea de que la percepción es una reflexión de cosas reales o que el conocimiento es una aproximación a la verdad o la realidad. Más bien, la realidad se concibe como una interacción entre el conocedor y lo conocido, dependiente de múltiples factores biológicos, psicológicos, lingüísticos, etc. La filosofía de valores de la Sistémica es geocéntrica, centrando su enfoque en el hombre como parte de una simbiosis mutualista con su entorno, donde su completa emancipación sólo se puede lograr manteniendo el equilibrio homeostático de dicha interacción (Tejeida, 2005).

1.4. Ciencia Tradicional y Ciencia de Sistemas

La civilización occidental es reconocida por ser la cuna del desarrollo de la invención intelectual conocida como ciencia. El término "ciencia", derivado de la raíz etimológica latina *Scire* (saber) y del griego *episteme* (conocer, conocimiento), denota en la actualidad un sistema conceptual compuesto por un objeto de estudio, conceptos, teorías y métodos.

Según Campbell (1952), la ciencia se define de diversas maneras:

- Es un conjunto de conocimientos útiles y prácticos, así como un método para adquirir ese cuerpo de conocimiento.
- Constituye un estudio puramente intelectual cuyo propósito es satisfacer las necesidades de la mente y no del cuerpo.
- Representa una rama del saber puro que busca proporcionar satisfacción a nivel individual.
- Se define como la rama del saber puro que examina las propiedades del mundo exterior (naturaleza) con el objetivo de interpretarlas y hacerlas comprensibles. La satisfacción intelectual se logra plenamente si este mundo externo puede ser ordenado y se demuestra que está regido por principios en armonía con nuestras aspiraciones intelectuales y morales.
- La ciencia se percibe como un todo o una totalidad, y las divisiones entre sus ramas son convencionales. Lo fundamental radica en el objeto de estudio y el método para investigarlo.
- Implica la exploración del mundo exterior (naturaleza) a través del análisis de juicios que puedan obtenerse de manera universalmente consensuada. En consecuencia, su enfoque no se dirige directamente al mundo exterior en sí, sino a los juicios que fundamentan las creencias en ese mundo externo, ya sean correctos o equivocados, según el sentido común. Si no hay un acuerdo universal, el tema no se considera objeto de estudio en el ámbito científico.

Según Chalmers (2006), no hay una concepción universal de la ciencia o del método científico que pueda utilizarse para clasificar como ciencia a los distintos conjuntos de conocimientos. Por ende, no es apropiado respaldar ni rechazar un área de conocimiento simplemente porque no se ajusta a algún criterio predefinido de cientificidad. No obstante, Chalmers (2006) sostiene que la ciencia física puede considerarse como representativa de la ciencia en general:

- En el ámbito científico, la física implica la formulación de generalizaciones universales expresadas en términos matemáticos.
- Los sistemas de teorías pueden ser conceptualizados como programas de investigación según la perspectiva lakatosiana. El desarrollo de estos sistemas sigue la concepción objetivista del cambio de paradigma (teoría), la cual se fundamenta en un supuesto sociológico crucial: la existencia, en la sociedad donde se lleva a cabo la investigación científica, de equipos de científicos con las habilidades, recursos y hábitos mentales necesarios para el progreso de esa ciencia. Este supuesto ha sido ampliamente válido en Europa durante los últimos dos siglos.

Según el mismo autor, la ciencia tiene como objetivo principal la generación de teorías que funcionen como herramientas o instrumentos convenientes para establecer relaciones entre un conjunto de situaciones observables y otras. Cada disciplina puede ser examinada considerando sus objetivos, los métodos empleados para alcanzarlos y el grado de éxito logrado. Por lo tanto, la evaluación de cada campo del conocimiento debe basarse en sus propios méritos, analizando sus metas, métodos y su eficacia para alcanzar dichos objetivos.

Por otro lado, Kerlinger (1973) identifica cinco características fundamentales de la ciencia:

1. Utilización de esquemas conceptuales y estructuras teóricas.
2. Verificación empírica de teorías e hipótesis mediante pruebas (reduccionismo bajo el supuesto *ceteris paribus*).
3. Eliminación de variables o fenómenos no considerados en las hipótesis (reduccionismo).
4. Búsqueda consciente y sistemática de relaciones entre los fenómenos (principio de que todo está relacionado con todo).
5. Exclusión de explicaciones metafísicas; es decir, la ciencia se ocupa únicamente de cosas que pueden ser observadas públicamente (positivismo materialista).

La ciencia es una actividad que contribuye a sistematizar la información sobre el mundo, proporcionando una forma estructurada de explicar los fenómenos. Se destaca por el uso de teorías y conceptos interconectados para comprender y describir aspectos diversos de la realidad. Sus funciones principales incluyen:

- Establecer leyes generales que expliquen el comportamiento de eventos y objetos empíricos.
- Conectar el conocimiento de eventos conocidos pero separados, y producir predicciones confiables de eventos aún no conocidos.

La tradición filosófica ha definido a la ciencia como un conjunto de conocimientos ciertos fundamentados en principios y causas. En la actualidad, se encuentran diversas definiciones de ciencia que reflejan la variedad de perspectivas dentro de la filosofía de la ciencia. Esta rama filosófica proporciona elementos de reflexión y conceptos generales que contribuyen a la comprensión de la ciencia.

De acuerdo con Campbell (1952), Chalmers (2006) y Kerlinger (1973), la ciencia tradicional persigue la explicación, clasificación y predicción de fenómenos. En la investigación, se apoya principalmente en paradigmas positivistas e interpretativos, siendo los más conocidos el positivista, el interpretativo y el crítico; a continuación se presentan, de manera resumida, sus características generales (Tejeida et al., 2016).

1.5. Paradigma Positivista

Intenta adaptar el modelo de las ciencias físico-naturales a otras disciplinas, siendo un representante fiel del positivismo lógico al utilizar principalmente la metodología cuantitativa. Aunque ha recibido críticas en los últimos años y han surgido nuevas alternativas, su uso sigue siendo necesario en muchas situaciones, requiriendo autocrítica y aportando conocimientos irremplazables.

1.6. Paradigma Naturalista

Agrupa corrientes opuestas al positivismo y se conoce como cualitativo, fenomenológico, etnográfico, ecológico, interaccionismo simbólico, entre otros. Aunque relativamente reciente, presenta problemas epistemológicos y metodológicos no resueltos, lo que dificulta su plena consolidación (De Miguel, 1988).

1.7. Paradigma Crítico

Se basa en la premisa de que la ciencia no es neutral y, por ende, la investigación tampoco puede serlo. Al reconocer la falsa neutralidad de la ciencia, aboga por la introducción explícita de la ideología. La investigación parte de una crítica al statu quo y busca construir una sociedad más justa fundamentándose en la teoría de Habermas (1975, 1989) sobre la emancipación del hombre. No hay separación entre teoría y praxis, y comparte similitudes con el paradigma naturalista siendo algunos enfoques, como la investigación-acción, manifestaciones metodológicas de este paradigma.

Cada uno de los paradigmas presenta limitaciones, lo que ha dado lugar al surgimiento de un nuevo paradigma denominado por algunos autores como "el paradigma del cambio" o "paradigma para el cambio".

El ámbito científico, especialmente en las ciencias humanas, se encuentra en un momento en el que resulta difícil explicar el comportamiento humano con las estructuras metodológicas heredadas del positivismo. Se reconoce una nueva dimensión en la revalorización de lo humano con impactos en los planos epistemológicos y metodológicos. Este énfasis se integra al debate sobre el papel protagónico de los paradigmas en la producción del conocimiento científico impulsado por Kuhn (1985), quien plantea que el avance de la ciencia ocurre de manera "zigzag", con dudas, discontinuidades e incertidumbres ante nuevos descubrimientos, un proceso complejo e interesante.

Esto implica nuevos modos de concebir y llevar a cabo la ciencia que se materializan en un paradigma diferencial (matriz disciplinar en términos kuhnianos). Este paradigma está en consonancia con la nueva postura del hombre como sujeto-objeto de conocimiento científico y sus inseparables vínculos relacionales con el entorno circundante.

El desplazamiento y la gradual sustitución del modelo positivista en la investigación social están estrechamente ligados a la naturaleza ontológica de lo humano como objeto de conocimiento, y a la reconsideración del modelo axiomático de la ciencia clásica en disciplinas cuya complejidad las aleja del carácter lineal de otras. La incapacidad del modelo positivista para comprender completamente los cambios y transformaciones sociales, dada la relativa naturaleza del comportamiento social, cuestiona su pretensión de universalidad epistemológica y metodológica convirtiéndose en un mito (Tejeida, 2005).

El paradigma científico-positivista, centrado en la teoría verificacionista del significado, ha dominado la cultura durante siglos. Aunque se ha observado la presencia del Paradigma Sistémico, muchas instituciones académicas aún enfrentan dificultades para aplicarlo debido a su arraigada orientación positivista. Ladriere (1978) describe la evolución de la ciencia desde la modernidad como una actividad institucionalizada, pragmática y transformada en un factor de poder político; plantea que cuando la ciencia pierde contacto con sus raíces especulativas, se agota y confiere a la ciencia el papel de saber salvador y liberador de falsas creencias, enmarcándola en una concepción hermenéutica que no busca repetir la realidad observable, sino comprender las etapas constitutivas de la manifestación y la experiencia.

El "paradigma para el cambio" que emerge de la Sistémica, también conocida como Ciencia de Sistemas, se denomina Paradigma Sistémico. Se caracteriza por la integración del paradigma positivista y los paradigmas interpretativos, generando así una síntesis entre métodos cuantitativos y cualitativos considerándolos como complementarios. Este enfoque no se limita a explicar y comprender el fenómeno, sino que busca generar cambios para mejorar el sistema, centrándose en la aplicación de conocimientos para transformar la realidad humana en armonía con su entorno.

En la Sistémica, el concepto de ciencia neutra y liberal implica la transdisciplinariedad. La noción de dominio expresa el área donde la actividad científica de la Sistémica se lleva a cabo para validar o refutar dicha actividad. En la Sistémica, la metodología se conceptualiza como un proceso que incorpora varios puntos de decisión fundamentados en la teoría de la ciencia. Este enfoque implica la aplicación del conocimiento científico para abordar problemas y mejorar situaciones dentro del ámbito de la Sistémica. El concepto de teoría implica relaciones entre conceptos.

Según Warfield (1986, 2006), el propósito de la Sistémica es desarrollar, de manera sostenible, el sistema humano hacia su plena realización, manteniendo un equilibrio homeostático con su entorno. Para desempeñar el papel de una ciencia transdisciplinaria, Warfield propone cuatro componentes básicos:

- Ciencia de la descripción: Se encarga de describir situaciones problemáticas en el ámbito de la Ciencia de Sistemas.
- Ciencia del diseño genérico: Se ocupa de diseñar sistemas mediante disciplinas aplicables a través de diferentes culturas, disciplinas y organizaciones utilizando el pensamiento y el lenguaje de los conceptos sistémicos.
- Ciencia de la complejidad: Desarrolla una métrica y una teoría de modelización para medir e interpretar la complejidad de situaciones problemáticas, así como para el diseño de sistemas y metodologías.
- Ciencia de la acción: Especifica metodologías para abordar situaciones problemáticas en el ámbito de la Sistémica. Esto incluye la práctica de la gestión sistémica interactiva, la formación de equipos de sintegridad, el uso de ágoras, grupos nominales, diagnósticos mediante modelos y otras metodologías sistémicas.

Estos componentes conforman la estructura de la Sistémica, cuyo propósito práctico es proporcionar los conocimientos necesarios y suficientes para abordar y resolver situaciones problemáticas en cualquier parte del dominio de esta ciencia. Las cuatro disciplinas científicas se apoyan en la imparcialidad inherente a la definición de sistema. En este contexto, se entiende que un sistema abarca cualquier fragmento del universo, ya sea objetivo o subjetivo, que ha sido conceptualmente delimitado del resto del cosmos con el fin de examinar y comprender las variaciones que puedan acontecer dentro de este segmento bajo diversas condiciones, organizaciones, culturas, estructuras, procesos y entornos (Warfield, 2003).

1.8. Pensamiento de sistemas como enfoque para abordar problemas

El Pensamiento de Sistemas representa un enfoque novedoso que se utiliza para tratar problemas complejos en las organizaciones desde una perspectiva global. Contrario al enfoque reduccionista, que procura explicar los fenómenos descomponiéndolos en sus elementos más básicos, el Pensamiento de Sistemas aborda la totalidad de los componentes, considerando sus interrelaciones internas y externas. Este enfoque integral busca resolver problemas de manera global y holística.

Desde los filósofos griegos, se vislumbró la necesidad de un paradigma que permitiera estudiar de manera integral las cosas. Platón expresó: "Si yo encuentro alguien capaz de ver las cosas en su unidad y en su multiplicidad, he ahí el hombre del que seguiré su huella como a un Dios". El término "sistemas" fue empleado desde los filósofos griegos o presocráticos y formalizado por Bertalanffy (2004) en su TGS, definiéndolo como un conjunto de elementos interrelacionados con un propósito.

El enfoque del Pensamiento de Sistemas se emplea para abordar problemas complejos en organizaciones desde una perspectiva global. Esta metodología aplica una visión holística al examinar la totalidad de los componentes y sus interrelaciones (Cárdenas, 1978). Bajo este enfoque, los problemas no se abordan de manera aislada; en cambio, se conceptualizan como elementos integrantes de un sistema más amplio. Esto se debe a que la suma de los criterios aplicados a las partes rara vez coincide con los criterios del conjunto total.

El Pensamiento de Sistemas sostiene que el reduccionismo y el determinismo son necesarios pero insuficientes para representar mentalmente la realidad de manera acorde; considera que nada se puede entender sin tener en cuenta los sistemas multidimensionales llamados "ambiente" dentro de los cuales se encuentra implícito el propósito y la razón de ser del sistema en estudio. La operación mental de síntesis se utiliza para comprender el propósito del sistema revelando la función dentro del suprasistema del cual forma parte.

Este enfoque es integrador tanto en el estudio de las problemáticas como en las conjeturas que surgen. Las acciones propuestas para abordar la situación problemática deben considerar todos los elementos que conforman la estructura del sistema, sus interrelaciones y su interacción con el entorno.

En el Pensamiento de Sistemas se construyen modelos que son abstracciones de la realidad capturando la esencia del sistema, visualizando sus componentes, interrelaciones, estructura y funcionamiento. Es una guía metodológica efectiva para la solución de problemas, especialmente en sistemas sociales o de actividad humana, como el sistema turismo. Este enfoque se centra en objetivos totales, es decir, en los objetivos del sistema de jerarquía mayor.

Considerando la organización como un ente integrado con una forma y estructura conformada por elementos interrelacionados en un entorno específico, el Pensamiento de Sistemas ofrece la posibilidad de descubrir las causas del problema y los requisitos para generar un cambio planificado e integral; busca lograr el desarrollo armónico y un equilibrio de la organización con su entorno; visualiza a la organización con un propósito que va más allá de un fin predeterminado, dirigiéndose hacia una diversidad de fines generados en función de la visión de los involucrados, esto implica una variedad interpretativa condicionada por los intereses y valores de los involucrados manteniendo el equilibrio viable de la organización. Este enfoque se apoya en la fenomenología (Husserl, 2005) y la hermenéutica (Gaos, 1996) para la resolución de problemas en las organizaciones mediante metodologías y modelos del Método Sistémico.

1.9. Conclusiones

La Ciencia de Sistemas, también conocida como Sistémica, emerge como una disciplina transdisciplinaria que aborda la comprensión de la realidad desde una perspectiva holística y unificadora. Su enfoque esencial recae en el estudio y la explicación de sistemas abstractos dentro de esta cosmovisión integral. De manera distintiva, se sumerge en la exploración del orden manifestado en sistemas reales, empleando modelos y metodologías formales que abarcan lo abductivo, hermenéutico y fenomenológico.

Al adentrarnos en el ámbito de la Sistémica, es imperativo destacar la inclusión fundamental del investigador sistemista como un componente integral de los sistemas en estudio. La interacción entre el investigador y el sistema se vuelve inseparable, estableciendo una conexión intrínseca que influye en la interpretación y comprensión del sistema en su totalidad.

La aplicación exitosa del Método Sistémico requiere que el investigador posea un dominio profundo del Pensamiento de Sistemas. Este enfoque se revela como una herramienta valiosa que proporciona una visión global para abordar problemas complejos en organizaciones mientras se toma en consideración la actuación local y las interrelaciones con el entorno circundante. Los problemas organizacionales son considerados como componentes integrados de un sistema mayor, donde las dinámicas y las conexiones entre elementos son esenciales para comprender su complejidad.

El Pensamiento de Sistemas, aplicado a la resolución de problemas, ofrece una perspectiva de largo alcance que abarca dimensiones inter, multi y transdisciplinarias. Esta capacidad permite el diseño integral, la mejora continua y el desarrollo holístico de organizaciones. Al identificar y comprender los problemas organizacionales con mayor profundidad y claridad, este enfoque permite llegar a sus raíces, evitando así las repercusiones superficiales y fomentando soluciones sostenibles y a largo plazo.

En el contexto del sector agroalimentario, el Pensamiento de Sistemas podría desempeñar un papel crucial al abordar los desafíos complejos que enfrenta esta industria. Considerar la cadena de suministro, la sostenibilidad, las interacciones con el entorno y la gestión eficiente de recursos son aspectos clave que podrían beneficiarse significativamente con la aplicación de este enfoque.

1.10. Referencias

Ackoff, R. (1999). *Rediseñando el futuro*, México, Limusa.

Ashby, W. R. (1958). "Requisite Variety and its implications for the Control of Complex Systems", *Cybernetica*, 1(2): 8399.

Bertalanffy, L. von et al. (1986). *Tendencias en la teoría general de sistemas*, España, Alianza Editorial.

Bertalanffy, L. von (2004). *Teoría General de los Sistemas*, México, FCE.

Campbell, N. (1952). *What is Science?*, EUA, Dover.

Cárdenas, M. (1978). *El Enfoque de Sistemas, estrategias para su implementación*, México, Limusa.

Chalmers, F. (2006). *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*, México, Siglo XXI.

Cornforth, M. (1980). *Materialismo y método dialéctico*, México, Nuestro Tiempo.

De Miguel, M. (1988). "Paradigmas de investigación educativa española", en I. Dendaluce (coord.), *Aspectos Metodológicos de la investigación educativa*, II Congreso Mundial Vasco, Madrid, Nancea: 60-77.

Frost, S. (2005). *Enseñanzas básicas de los grandes filósofos*, México, Diana.

Gaos, J. (1996). *Introducción a el ser y el tiempo de Martin Heidegger*, México, FCE.

Habermas, J. (1975). *Problemas de legitimación en el capitalismo tardío*, Buenos Aires, Amorrortu.

Habermas, J. (1989). *Teoría de la acción comunicativa: Complementos y estudios previos*, Madrid, Cátedra.

Hua, Z., J. Yang, S. Coulibaly y B. Zhang (2006). "Integration TRIZ with Problem solving Tools: a Literature review from 1995 to 2006", *International Journal of Business Innovation and Research*, 1(1 2): 111 128.

Husserl, E. (2005). *Ideas relativas a una fenomenología pura y una filosofía fenomenológica, México*, FCE.

Kerlinger, F. (1973). *Foundations of Behavioral Research*, Nueva York, Holt, Reinhart y Winston.

Kuhn, T.S. (1985). *La estructura de las revoluciones científicas*, México, FCE.

Ladriere, J. (1978). *El reto de la racionalidad*, Salamanca, Sígueme.

Mesarovic, M. (1963). *Foundations for a General Systems Theory, in Views on General Systems Theory*, Proceedings of the second Systems Symposium at Case Institute of Technology, Ed. Mesarovic M.

Miller, J. G. (1978). *Living Systems*, Nueva York, McGraw Hill.

Orudzhev, Z.M. (1980). *La dialéctica como sistema*, México, Nuestro Tiempo.

Rapoport, A. (1963). *Remarks on General Systems Theory in Views on General Systems Theory*, Proceedings of the second Systems Symposium at Case institute of Technology, Ed. M. Mesarovic.

Tejeida, R. (2005). "Los conceptos de entropía y evolución en la administración: La Teoría Exelixica de las organizaciones", *Administración Contemporánea Revista de Investigación*, 1(2): 139.

Tejeida, R., Coria, E., y Juárez, A. (2016). *Sistémica y turismo*. Editorial Miguel Ánguel Porrúa.

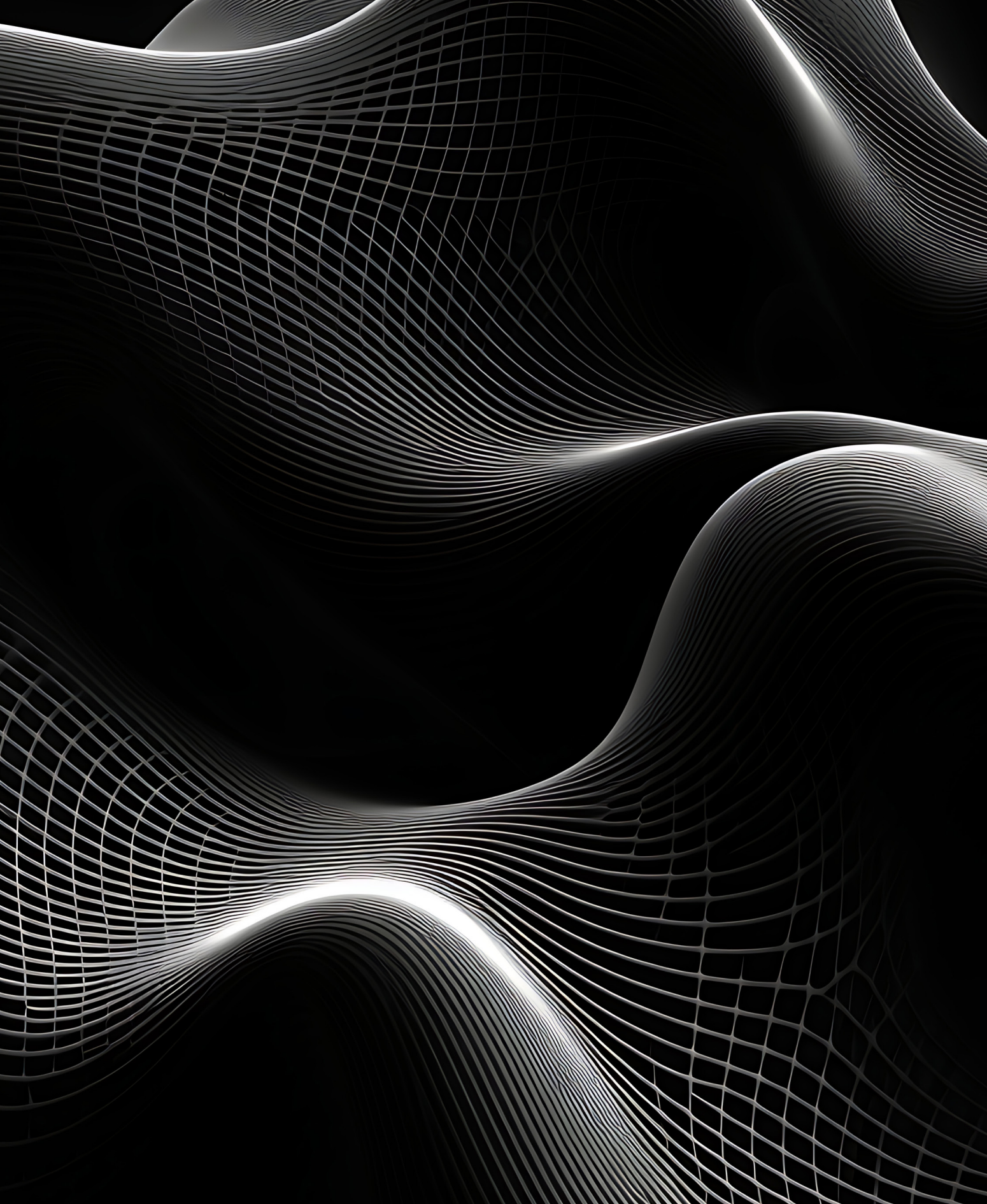
van Gigch, J. (2012). *Teoría General de Sistemas*, México, Trillas.

Warfield, J. (1986). *The Domain of Science Model: Evolution and Design*, Proceeding Itl. Conf Mental images, Values and reality, Society for General Systems research, Filadelfia, mayo 26 30, Salinas, CA Intersystems, 1: H46 H59.

Warfield, J. (2003). *"A Proposal for Systems Science", Systems Research and Behavioral Science, 20* (6): 507

Warfield, J. (2006). *An Introduction to Systems Science*, Nueva Jersey, Ed. World Scientific.

Wiener, N. (1981). *Cibernética y sociedad, México*, Conahcyt.



2. Metodología de Sistemas Suaves

Leticia Elizabeth Romero-García[1, 2, 3 *]

2.1. Resumen

La Metodología de Sistemas Suaves (MSS) de Checkland es un enfoque sistémico que se distingue por requerir de la participación colaborativa de los actores que intervienen en el sistema para expresar situaciones percibidas como problema, consensuar la atención y mejora de alguna de ellas, así como generar un aprendizaje del proceso realizado. Las situaciones problema que atiende esta metodología provienen de los sistemas de actividad humana que surgen de las relaciones e interacciones entre la naturaleza, las tecnologías y el ser humano, así como de la susceptibilidad a los cambios presentados en su ambiente. En este sentido, la MSS requiere tanto del conocimiento práctico como del teórico para el desarrollo correspondiente de las siete etapas que la conforman o de alguno de los cuatro métodos que se ofrecen a través de éstas, los cuales son: i) Visión rica (etapa 1 y 2), ii) Definiciones raíz (etapa 3), iii) Modelos conceptuales (etapa 4) y iv) Comparación (etapa 5). Sumado a lo anterior, la MSS se poya de la integración de otras herramientas sistémicas y no sistémicas para enriquecerse metodológicamente, característica que también permite que algunas de sus etapas o métodos puedan ser ocupados por otras herramientas, como es el uso de las Definiciones raíz para el Modelaje Basado en el Agente. Con base en lo anterior, el principal objetivo de este capítulo es brindar los cimientos, características, estructura y ejemplos de la MSS con el propósito de poner en manifiesto la existencia de una herramienta que atiende y mejora cierto tipo de situaciones problema, las cuales no pueden ser tratadas con el método científico convencional.

Palabras clave: sistémica, sistemas blandos, CATWOE, intervención pluralista, agricultura.

[1] Universidad Panamericana. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Álvaro del Portillo 49, Zapopan, Jalisco, 45010, México.

[2] Networks and Systems Thinking Research Group – NeST.

[3] Grupo de Investigación en Sistémica y Turismo.

[*] Autor de correspondencia: leromero@up.edu.mx

2.2. Introducción

Desde la perspectiva del pensamiento de sistemas se pueden determinar tres tipos de actividades que el ser humano realiza (Checkland, 1999; Jackson, 2003; Jackson & Keys, 1984; Wilson, 1990): 1) de diseño, 2) humanas y 3) sociales. Las primeras son ejecutadas de manera consciente con pocos elementos y altamente visibles para crear sistemas con propósitos de utilidad específicos, como un idioma (diseño abstracto) o una herramienta para moler granos (diseño físico). Estos sistemas son catalogados como cerrados o aislados debido a que presentan una mínima o nula variación ocasionada por su ambiente; también son organizados y tienen un nivel de complejidad simple. Una vez creados, el posterior nivel de intervención del ser humano es bajo al requerir de alguna adecuación en lo que respecta a los diseños abstractos, o de alguna corrección o reemplazo para el caso de los diseños físicos. Estos últimos tienen una vida útil determinada por lo que al requerir una intervención de corrección ésta suele realizarse bajo la aplicación de modelos matemáticos, mismos que tienen por objetivo brindar una solución a un problema dado.

En lo que respecta a las segundas, éstas suelen concebirse como el conjunto de actividades interactivas entre el ser humano y las máquinas/tecnologías, las cuales están destinadas a revisar y optimizar procesos en sistemas clasificados como semicerrados o semiabiertos. Esto es, que pueden ser susceptibles a cambios originados por la presencia de fuerzas, tanto internas como externas; tal es el caso de las empresas, las áreas dentro de éstas, o incluso en proyectos (e .g., huertos urbanos) al momento de verse afectados por los disturbios del ambiente (e. g., tendencia social) o los cambios dentro de éstos (e. g., cambio organizacional). Estos sistemas también tienen la peculiaridad de ser controlados, porque presentan un grado de complejidad moderada. En consecuencia, el nivel de intervención del ser humano es mayor pero controlado debido a que la toma de decisiones se realiza por pocos; es decir, por lo altos mandos. De requerirse una intervención, ésta se realiza a través de técnicas especializadas como las de modelaje y simulación para brindar una solución óptima operacional con base en objetivos establecidos, sin alterar la realidad hasta que se tome una decisión objetiva de implementación (Jackson, 2003).

Las terceras se refieren a las actividades que se dan dentro sistemas altamente interrelacionados como es el ejemplo de una familia de artesanos o una comunidad de productores de aguacate. Este tipo de sistemas se catalogan como abiertos debido a su amplia vinculación e interacción con otros sistemas, así como con su ambiente, lo que provoca un alto nivel de desorganización, descontrol y vulnerabilidad. Debido a estas características, los conflictos que surgen de este tipo de sistemas requieren de intervenciones humanas colaborativas que ayuden a brindar alternativas de mejora. Con base en lo anterior, conocer cada una de estas actividades y el tipo de conflictos o fallas que se originan de éstas, permiten identificar el tipo de intervención que se requiere con el propósito de reducir riesgos, así como optimizar esfuerzos y recursos. Una vez que se logra lo anterior, a través de la matriz de un Sistema de Metodologías de Sistemas - SMS (en inglés *System of Systems Methodology - SoSM*) de Flood y Jackson (1991), se puede seleccionar una herramienta que se sugiere para atender la situación en estudio.

Esta matriz se compone de dos ejes, el vertical y el horizontal, tal como se muestra en la Figura 1. Mientras que en el eje vertical se encuentra la percepción de la naturaleza del sistema con base en el grado de estructura de sus fallas siendo simples (sistemas de actividad de diseño) o complejas (sistemas de actividad humana y social); en el eje horizontal se halla el tipo de relación que el actor requiere para intervenir en la falla siendo unitaria, pluralista y coactiva. En lo que respecta a la intervención unitaria, ésta se da cuando imperan los valores, creencias e intereses comunes entre los actores del sistema donde se encuentra la falla, tal y como es en las empresas; en éstas, la información y toma de decisiones sobre la situación es conocida y realizada por pocos, principalmente quienes se encuentran en los mandos altos (directivos, gerentes, etc.). En cuanto a la intervención pluralista, ésta se requiere cuando hay discrepancias entre los participantes, por lo que el debate es un buen canal para conducir a la toma de una decisión temporal sobre la situación; la gestión de una ciudad o comunidad puede ser un claro ejemplo de ello, en donde los actores que deben participar idealmente van desde los ciudadanos y funcionarios, hasta los visitantes y organizaciones, cuyos intereses difieren de los demás dependiendo de su afectación positiva o negativa, directa o indirecta derivada del conflicto. Por último, la tercera relación de intervención se da cuando hay poco interés en común entre los actores y las decisiones son tomadas por quienes tienen mayor poder; ejemplo de ello son las cárceles (Jackson, 2003).

ESTRUCTURA		INTERVENCIÓN		
		UNITARIA (U)	**PLURALISTA (P)**	**COACTIVA (C)**
	SIMPLE (S)	(S-U) - Investigación de operaciones - Análisis de sistemas - Ingeniería de sistemas	(S-P) - Diseño de sistemas sociales - Suposición estratégica - Emerger y probar	(S-C) - Heurística de sistemas críticos
	COMPLEJA (C)	(C-U) - Cibernética Organizacional - Teoría General de Sistemas - Socio-técnico - Teoría de la Contingencia	(C-P) - Metodología de Sistemas Suaves - Planeación interactiva	(C-C) ?

Figura 1. Sistema de Metodologías de Sistemas (SMS)

Fuente: Imagen adecuada de Flood y Jackson (1991).

En consecuencia, de los dos ejes de la matriz, se forman seis posibles fallas (Figura 1): i) simple que requiere de una intervención unitaria (S-U); ii) simple que requiere de una intervención pluralista (S-P); iii) simple que requiere una intervención coactiva (S-C); iv) compleja que requiere de una intervención unitaria (C-U); v) compleja que requiere de una intervención pluralista (C-P) y, vi) compleja que requiere de una intervención coactiva (C-C).

Este capítulo tiene como objetivo presentar, describir y desarrollar la Metodología de Sistemas Suaves (MSS); herramienta sistémica que se sugiere aplicar para el cruce cinco (C-P) de la matriz de SMS, donde predominan las fallas de los sistemas de actividad social y humana. En la Ciencia de sistemas, un problema es un sistema que debe atenderse como tal (Gigch & Kramer, 1981); no obstante, en el caso particular de esta metodología, un problema, desajuste o alteración es considerado como una situación problema (Wilson, 1990) o contexto problema (Flood & Jackson, 1991) puesto que su propósito es brindar una mejora a una situación, más no dar una solución a un problema. Por tanto, a partir de ahora se hace referencia a los problemas, conflictos o fallas como situaciones problema.

2.3. Origen de la Metodología de Sistemas Suaves

Esta herramienta sistémica fue diseñada y desarrollada por Peter Checkland en 1970. De acuerdo con diferentes fuentes (Checkland, 2019; Checkland & Haynes, 1994; Mingers, 2000) Checkland obtuvo el grado de Químico por el Colegio St. John, en Oxford. Por más de 15 años trabajó en el área de Investigación y Desarrollo de una de las empresas más grandes de productos químicos de Reino Unido. En 1969 se unió como Profesor al Departamento de Ingeniería de Sistemas en la Universidad Lancaster, donde, por instrucciones de su superior, el Profesor Gwilym Jenkins, estableció un programa de investigación con la participación de estudiantes de maestría para realizar investigaciones a situaciones problema que enfrentaban los gerentes de diferentes áreas y niveles en empresas de aquel país. Como resultado de este proyecto surgió la Metodología de Sistemas Suaves o Blandos - MSS (en inglés *Soft Systems Methodology – SSM*), misma que se diseminó a través de la publicación del libro *Systems Thinking Systems Practice* en 1981.

2.4. Estructura de la MSS

Tal y como se logra apreciar en la Figura 2, la MSS se conforma por siete etapas las cuales, originalmente, forman una estructura jerárquica, secuencial e iterativa; no obstante, éstas pueden ser aplicadas de manera flexible (Checkland, 1999; Jackson, 2003) de acuerdo con las necesidades de atención de la situación problema en estudio, de las perturbaciones en el ambiente que puedan afectarlo, así como de la disponibilidad de recursos que se tengan para su intervención.

El desarrollo de la metodología requiere de la aplicación de tres tipos de conocimiento: el teórico, el práctico, y la mezcla de ambos. Tal y como se puede apreciar en la Figura 2, las etapas que se muestran por encima de la línea punteada (1, 2, 5, 6 y 7) ocupan principalmente el conocimiento práctico; es decir, a través de fuentes primarias como la aplicación de entrevistas o cuestionarios a informantes clave se pueden obtener datos de lo que existe y las condiciones actuales en las que se encuentra la situación percibida como problema. Además, se puede obtener información de las intervenciones hechas, la forma en cómo se han realizado y quiénes se han involu-

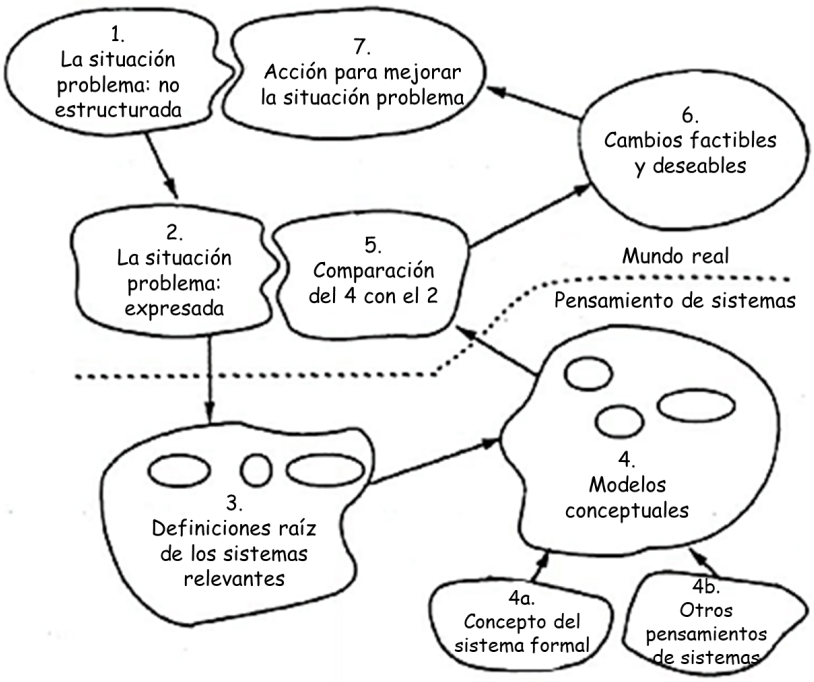


Figura 2. Esquema de la Metodología de Sistemas Suaves (MSS)

Fuente: Imagen adecuada de Checkland (1981).

crado. En consecuencia, con estas etapas se muestra la realidad de la situación problema a través de un enfoque aplicado-participativo. No obstante, es importante mencionar que, de forma complementaria o en sustitución, también se puede hacer uso del conocimiento teórico a través de la consulta de fuentes secundarias como documentos que registran y evidencian lo anterior; incluso, una mezcla de ambas fuentes puede ser aplicada.

Con respecto a las etapas que se hallan debajo de la línea punteada (3, 4), el conocimiento teórico impera a través del diseño y desarrollo de modelos conceptuales, tanto sistémicos (4b) como no sistémicos (4a), que buscan representar idealmente una mejora dentro de la realidad. Para el caso específico de los modelos sistémicos, Jackson (2003) enfatiza el uso de herramientas pertenecientes a los enfoques de los sistemas dinámicos, la cibernética organizacional y la teoría de la complejidad, mismos que se hallan en el cruce cuatro (C-U) de la matriz SMS (ver Figura 1).

De acuerdo con Flood et al. (1992), la correcta elección de un enfoque sistémico, así como de sus técnicas y herramientas, dependerá de dos variables: 1) el tipo de implementación que se requiera hacer con base en las características y necesidades de la situación problema y 2) del conocimiento y habilidades del consultor o de los actores que participan en la mejora de la situación problema sobre las herramientas disponibles y su uso. A pesar de referirse concretamente a las herramientas sistémicas, estas dos variables también pueden ser aplicadas a aquellas que no

lo son. En cualquiera de los casos, la selección e implementación de herramientas deberá realizarse bajo ciertos lineamientos éticos que contribuyan a atender y no comprometer la mejora de una situación percibida como problema (Gigch, 1978).

Finalmente, la estructura de la MSS permite seleccionar las etapas que se requieren para brindar alternativas de mejora a la situación en estudio. Es decir, bajo una orientación más precisa, con la etapa 1 y 2 se puede diagnosticar una situación problema; con las etapas 3, 4, 5 y 6 se puede plantear un diseño de mejora y revisar la factibilidad de éste; finalmente, con la etapa 7 se aplica la propuesta de mejora y evalúa su factibilidad real. Además de lo anterior, la MSS también ofrece cuatro métodos para atender estratégicamente una situación problema, estos son: i) la Visión rica con la etapa 2; ii) la definición raíz con la etapa 3; iii) los modelos conceptuales con la etapa 4; y iv) la comparación de modelos con la situación actual con la etapa 5. En resumen, la estructura de la metodología permite la aplicación de las siete etapas en su totalidad, o disponer de algunas de éstas de manera flexible. Esta última característica ha permitido que la aplicación de la MSS se haya ampliado en muchas áreas del conocimiento y para diferentes objetivos; algunos de ellos se mencionarán más adelante.

2.5. Desarrollo de las etapas de la MSS

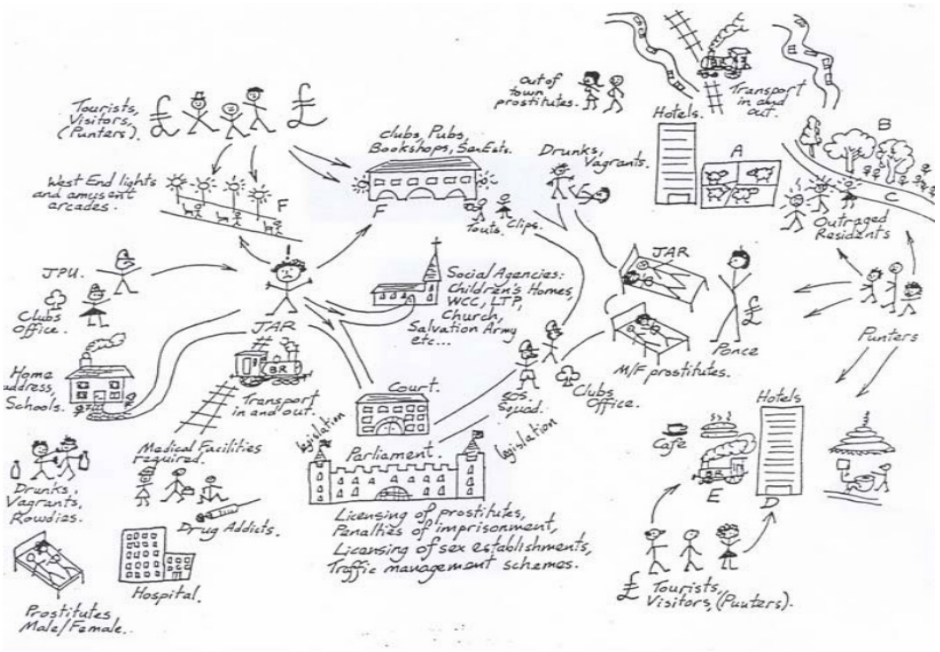
Etapa 1. Situación del problema no estructurado

La primera etapa de la metodología consiste en declarar todos aquellos elementos de una situación percibida como problema. Esta declaración se realiza como una descripción visual, sin estructura en el diseño, que ocupa originalmente pictogramas, pero que también puede ocupar dibujos o imágenes que representen inequívocamente cada uno de los elementos del sistema en estudio. Otra forma de mostrar la situación problema es con el uso de palabras o frases cortas que representen los elementos; esto aplica cuando existen conceptos que difícilmente pueden ser ilustrados. Por tanto, el propósito de esta etapa es mostrar los elementos del sistema en estudio sin establecer algún tipo de relación entre ellos.

Etapa 2. Situación del problema expresado. Visión rica

Posterior a la exposición y esbozo de los elementos de la situación problema, la segunda etapa cosiste en identificar la presencia y ausencia de relaciones, así como de flujos, con el propósito de detectar estructuras fuertes, débiles y de conflicto. Como resultado de lo anterior, a través de los diversos puntos de vista que tienen los actores sobre la realidad de la situación (*Weltanschauung*, término original en alemán) se expone la Visión rica (Checkland, 1999).

Ejemplo de lo anterior se muestra en la Figura 3, la cual presenta el caso de la prostitución callejera femenina en el centro de Londres (Flood and Carson (1988) citados por Jackson, 2003, p. 192). Tal y como se puede apreciar en la imagen, su diseño ocupa pictogramas, así como se auxilia de un cuadro de nomenclaturas, con el propósito de proporcionar información complementaria que permite orientar y facilitar la interpretación de la imagen. Además, se pueden observar flechas que muestran los vínculos y flujos entre los elementos.



KEY				
	A	Shepherds Market Area	JPU	Juvenile Protection Unit
	B	Sussex Gardens Area		Clubs Office
	C	Bayswater Road Area	SOS	Street Offences Squad
	D	Piccadilly Circus Area	JAR	Juveniles at risk
	E	Victoria Station Area	WCC	Westminster City Council
	F	Soho Area	LTP	London Teenage Project

Figura 3. Visión rica y cuadro de nomenclatura de la prostitución callejera de la mujer en el centro de Londres

Fuente: Flood y Carson (1988) citados por Jackson (2003, p. 192).

Una vez que se genera la Visión rica, se detectan y determinan, de manera consensuada, aquellos sistemas relevantes o en foco con base en su representatividad con la situación problema, su factibilidad para ser modelado, así como su prontitud para ser implementado. Estos sistemas relevantes se desarrollan en la etapa 3, a través de su expresión por medio de definiciones raíz.

Etapa 3. Definición raíz de los sistemas relevantes

Una definición raíz refleja la manera en cómo es concebida una situación problema (Jackson, 2003). La manera más efectiva para declarar o verificar una definición raíz es a través de la mnemotecnia CATWOE, con la cual se asegura que contenga los elementos mínimos necesarios para ejecutar la implementación de mejora. En este sentido, la mnemotecnia CATWOE se forma por las iniciales de seis palabras en inglés: *Customer, Actors, Transformation process, World view (Weltanschauung* en alemán), *Owner, Environmental constraints.*

En lo que respecta a la primera inicial, "**C**", se refiere a los clientes que son aquellas personas que serán afectadas directamente por el proceso de transformación del sistema, ya sea de manera positiva (beneficiarias), o negativa (víctimas). La segunda, "**A**", involucra a los actores, que son aquellas personas consultoras o investigadores que realizarán el proceso de transformación del sistema. La siguiente, "**T**", se refiere al proceso de transformación que realizará el sistema; por tanto, es necesario determinar los elementos de entrada para obtener su conversión en las salidas; para ello, es necesario tener presente el dar respuesta a las interrogantes "qué hacer", "cómo hacerlo" y "por qué hacerlo". La "**W**" se refiere a la visión del mundo; es decir, el enfoque bajo el cual se desarrollará el proceso de transformación del sistema, así como la forma en cómo se concibe la situación problema. Continuando con la "**O**", comprende a aquella persona que tendrá el poder suficiente para prevenir, detener o cancelar el proceso de transformación del sistema. Finalmente, la "**E**" considera a todos aquellos elementos que se encuentran en el ambiente y que afectan de alguna forma el comportamiento del sistema (Checkland, 1985; Jackson, 2003).

Con base en lo anterior, una definición raíz puede elaborarse con dos fines; uno para declarar tareas primarias en un sistema con la finalidad de que sus estructuras puedan ser modeladas; el otro para atender situaciones de interés actual con la finalidad de brindar alternativas de solución reales. Independientemente del tipo de definición raíz a desarrollar, su correcta formulación debe cubrir la atención de las seis iniciales, pues esto permitirá sentar las bases para el diseño de los modelos conceptuales en la siguiente etapa. Como ejemplo de una definición raíz, la Figura 4 presenta un caso sobre la industria del azúcar, la cual tiene el propósito de expresar un sistema de entrega consistente de caña de calidad. En tal ejemplo, se declara primero la definición raíz; posteriormente, se verifica el cumplimiento de los seis elementos a través de su expresión esquemática por medio del CATWOE. Como resultado se tiene una definición raíz validada.

Etapa 4. Modelos conceptuales

Posterior a declarar las definiciones raíz necesarias, se procede con la construcción de modelos conceptuales o ideales que tengan la posibilidad de incorporarse al mundo real para ofrecer una mejora. La propuesta de cada modelo debe contemplar un número de actividades necesarias para realizar el proceso de transformación que se declara en la inicial "**T**" de la mnemotecnia CATWOE (Checkland, 1999; Jackson, 2003).

Definición raíz: Un **sistema** de propiedad de productores y transportistas, operado por los transportistas, los productores y molinos, para permitir la entrega constante de caña de calidad de acuerdo con los entregables diarios tasables definidos, siguiendo buenas prácticas agrícolas y garantizando un transporte eficiente a los molinos para permitir la entrega constante de caña de calidad, dentro de las limitaciones de la disponibilidad de insumos y el clima.

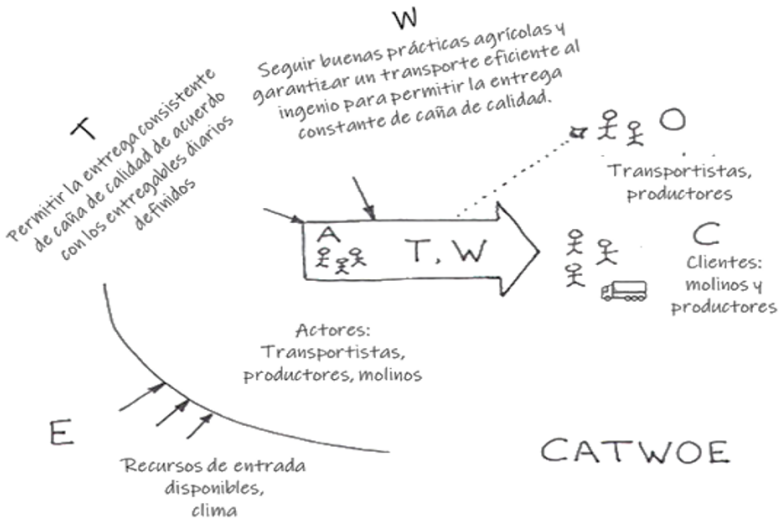


Figura 4. Definición raíz y CATWOE de un sistema de entrega consistente de caña de azúcar de calidad

Fuente: Información adaptada de Proches y Bodhanya (2015).

Tal y como se muestra en la estructura de la MSS (ver Figura 2), en esta etapa se pueden ocupar dos tipos de modelos conceptuales, los no sistémicos (4a) y los que sí lo son (4b). Los primeros suelen crearse de forma libre con la finalidad de presentar la posible situación de mejora con base en la perspectiva de los actores que intervienen en ésta. En cuanto a los modelos creados a través de ciertas herramientas sistémicas (4b), éstas se pueden seleccionar de aquellas que se encuentran en el cruce cuatro (C-U) de la matriz SMS (ver Figura 1) o de otras provenientes de otros enfoques sistémicos, como los Sistemas Complejos. No obstante, una de las herramientas ocupadas comúnmente para el desarrollo de esta etapa es el Modelo de Sistemas Viables (MSV, en español; VSM: Viable System Model, en inglés) de Beer (Mingers & Brocklesby, 1997; Wilson, 1990), el cual, de manera muy resumida, examina la viabilidad de un sistema ante la exposición y sobrevivencia a su ambiente.

Etapa 5. Comparación de modelos con el mundo real

Posterior a la creación de propuestas de modelos que idealmente brindan una alternativa de atención a la situación problema, el siguiente paso es contrastar y examinar su factibilidad con la Visión rica expresada en la etapa 2. Un ejemplo de comparación se muestra en la Figura 5, la cual

presenta el caso de una situación que se percibía como problema durante el período 2013-2015, la cual era incorporar el turismo urbano al proyecto de gestión urbana digital, inteligente y del conocimiento de la Ciudad de México.

En la Figura 5, inciso **a**, se presenta la propuesta de un modelo sistémico basado en el desarrollo del Modelo de Sistemas Viables de Beer (1984), mismo que fue sometido a una contrastación con la Visión rica resultante de la etapa 2, la cual puede apreciarse en el inciso **b**. Como resultado de este proceso, se detectaron elementos y relaciones que no habían sido considerados previamente o que sufrieron alguna adecuación importante por su relación y susceptibilidad al ambiente.

En este punto, es importante resaltar que el diseño de la Visión rica (Figura 5, inciso **b**) se hizo a través de nodos y vínculos con el uso del Análisis de Redes Sociales (ARS) como una alternativa al diseño original de pictogramas. Esto se logró sin comprometer el propósito de tal etapa que es detectar estructuras fuertes, débiles, de conflicto e inexistentes. De hecho, el ARS resultó útil de aplicar porque uno de sus propósitos concuerda con los objetivos de la Visión rica: expresar, a través de una red, el comportamiento de un sistema para detectar y resaltar los diversos tipos de vínculos y la ausencia de estos entre los elementos del sistema (Freeman, 1979; Hanneman & Riddle, 2011; Wasserman & Faust, 1994).

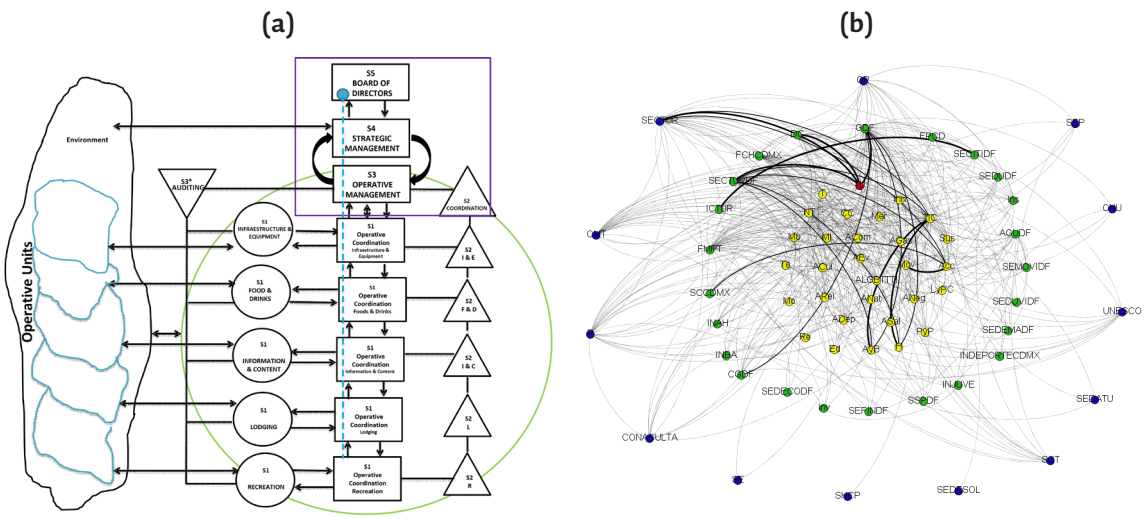


Figura 5. Contrastación de la etapa 4 con la etapa 2

Fuente: Romero-García et al. (2015). El inciso a es una propuesta de modelo sistémico para ser contrastado con la Visión rica. El inciso b muestra la Visión rica, resultado del proceso de la etapa 2.

En consecuencia, con base en el procedimiento descrito en esta etapa, se pueden detectar y considerar cambios oportunos en los modelos conceptuales resultantes de la etapa 4. Para realizar estas adecuaciones no sólo se trata de proponer ciertas acciones de mejora, sino también es importante mencionar la forma en cómo se van a implementar.

Etapa 6. Cambios deseables y factibles

Como resultado del procedimiento anterior, en esta etapa se listan todos los ajustes detectados para ser clasificados dentro de dos categorías: i) cambios deseados, que son aquellos considerados como importantes pero que no son urgentes de adecuar en el modelo, y ii) cambios factibles, los cuales se consideran como de pronta implementación al modelo debido a la factibilidad que ofrece para atender la situación problema actual. En este sentido, el producto que se obtiene de esta etapa es una agenda de acciones y procedimientos de ejecución, los cuales se sometieron a una valoración de cambios determinados (Checkland, 1999).

Etapa 7. Acción para mejorar la situación problema

La última etapa de la MSS consiste en implementar la propuesta a mejorar la situación detectada como problema. Una vez aplicada, se propone iniciar con un ciclo nuevo a partir de la emergencia que resulte de la intervención al sistema anterior, por lo que se determinará la necesidad de comenzarlo desde la etapa uno o a través del método que se requiera dados los cambios dinámicos que enfrenta el mismo sistema, así como por las perturbaciones existentes del ambiente.

2.6. Aplicación de la MSS en el sector agroalimentario

De acuerdo con Checkland (1999), la primera vez que se aplicó la MSS fue a una pequeña empresa textil; su caso generó aprendizajes de dos tipos, los cuales contribuyeron a la posterior mejora en su implementación para otros casos. El primero de ellos fue haber pasado por desapercibida la afectación que causa el ambiente en relación con el tiempo. Durante los tres años que duró el estudio de la empresa, los sistemas en foco que estaban atendiendo sufrieron varios desajustes, mismos que iban cambiando o agregándose a otras situaciones conforme avanzaba el tiempo. Por lo anterior, las mejoras nunca fueron visibles ante la organización. La segunda fue trabajar bajo un enfoque basado en objetivos, mismos que fueron planteados y controlados por los altos mandos de la organización. Con base en éstos y otros aprendizajes, actualmente la MSS ha contribuido al corpus de la literatura sistémica a través del desarrollo de investigación, tanto teórica, con la construcción de supuestos de mejora en la estructura y uso de la metodología, como práctica, con la aplicación de la metodología en diferentes disciplinas y situaciones, pero destacando su uso para el estudio organizacional y de sistemas de información de empresas (Mingers, 2000; Mingers & Taylor, 1992).

Su uso para situaciones problema en el sector agroalimentario no ha sido la excepción; de hecho, fue una de las primeras áreas que inmediatamente la adecuó y usó posterior a su diseminación en 1981. En este sentido, autores como Bawden et al. (1984) y Mills-Packo et al. (1991) reconocen la utilidad de la metodología para atender y aprender de los problemas que son característicos de las actividades humanas, tal y como lo son en la agricultura, donde estas actividades se dan con la interacción entre sistemas sociales y naturales. En consecuencia, los mismos autores resaltan la peculiaridad de la metodología que es la necesidad de discusiones participativas para brindar alternativas de atención a un sistema en estudio. Es a través de esta característica distintiva de la metodología que su uso se ha extendido a lo largo de los años para ser aplicada desde la reestructuración de una escuela agrícola (Macadam & Packham, 1989), la reestructuración en los sistemas de innovación agrícola (Juárez et al., 2021) hasta la gestión de sistemas de información para productores en ganadería (González et al., 2014), así como en diferentes cultivos, como el algodón (Macadam et al., 1990), arroz (Sutoyo & Sensuse, 2018), entre otros (Mills-Packo et al., 1991).

2.7. Literatura recomendada y complementaria

Dentro del corpus de la literatura sistémica, relacionada a la Metodología de Sistemas Suaves, existen materiales que pueden ser considerados de consulta inicial para el uso de esta herramienta, así como hay otros que pueden servir de manera complementaria a los primeros. Con respecto a los materiales de consulta inicial, la primera obra que se recomienda revisar es la escrita por Checkland (1999), la cual ofrece una crítica evolutiva de la MSS y del enfoque de sistemas desde la perspectiva del mismo autor. Una vez que se sientan las bases históricas, Checkland describe con detalle cada una de las etapas que conforman esta herramienta. En cuanto a Jackson (2003) y Reynolds y Holwell (2020), ellos ofrecen una revisión y crítica a los diferentes enfoques y herramientas sistémicas, entre las que se encuentra la MSS. La principal diferencia entre ambas obras radica en el enfoque organizacional que ocupa Jackson (2003). Finalmente, Wilson (1990) se refiere a la MSS con base en la conceptualización y caracterización de sus elementos presentes en cada una de las siete etapas.

En lo que respecta a la literatura complementaria, se sugiere la consulta de diferentes autores (Checkland, 1985; Flood & Jackson, 1991; Holwell, 2000; Mingers, 2000; Mingers & Taylor, 1992) cuyas obras versan en realizar ciertas críticas a la estructura, uso y alcance de la MSS en su relación con el enfoque de sistemas suaves. De lo anterior, se recomienda la consulta de estas obras con el objetivo de generar una perspectiva propia de la MSS y, así, diseminar la existencia de esta metodología, al tiempo que se amplíe su campo de aplicación.

2.8. Conclusiones

Desde hace mucho tiempo, la mayoría de los sistemas con estructuras complejas han sido estudiados y tratados desde enfoques convencionales que no cumplen con su cometido de llegar a una solución. En muchos casos, estos sistemas sufren de adecuaciones forzadas o controladas por unos cuantos actores que tienen la representatividad jerárquica para llevarlo a cabo. En consecuencia, este tipo de sistemas no llegan a tener una "solución", lo que ocasiona que al poco tiempo de ser atendidos de manera insatisfactoria presenten las mismas situaciones o incluso las incrementen y sobrepasen a tal grado de incorporar otros componentes, así como escalar y afectar sistemas mayores.

Bajo este contexto, la Metodología de Sistemas Suaves es una de pocas herramientas pertenecientes a la Sistémica que ofrece mejorar una situación considerada colectivamente como problema al momento de que se plantea, misma que surge de actividades sociales y humanas. El objetivo de este capítulo fue dar una breve introducción de la metodología, a través de sus cimientos, características, estructura y ejemplos de aplicación, tanto en el sector agropecuario como en otras áreas, con el propósito de poner en manifiesto la existencia de un enfoque y herramienta alterna al método científico convencional.

A través de lo descrito en este capítulo, se dan a conocer las diversas ventajas que tiene la MSS, tal y como lo es su estructura, la cual permite que las siete etapas que conforman la metodología puedan aplicarse respectivamente para diagnosticar una situación percibida como problema, diseñar una propuesta ideal pero factible de mejora, así como la implementación de la propuesta diseñada al mundo real. Además, cuando las etapas son aplicadas de manera flexible e independiente, éstas pueden ofrecer cuatro métodos para atender estratégicamente una situación problema, siendo la Visión rica, la definición raíz, los modelos conceptuales y la comparación de modelos con la situación actual.

Aunado a lo anterior, debido a la versatilidad con la que se desarrolla la metodología, ésta permite auxiliarse de otras herramientas, tanto sistémicas como no sistémicas, con el fin dar un mayor respaldo metodológico y aminorar el enfoque cualitativo que predomina en ésta. Lo anterior es más visible en la etapa cuatro. Sin embargo, la MSS también puede apoyar otros métodos o metodologías a través de sus cuatro métodos; por ejemplo, la definición raíz ha sido ocupado en cursos de maestría de Modelaje de Sistemas Complejos Adaptativos. En este caso particular, la definición raíz es usada para detectar aquellos agentes importantes del sistema en estudio para el posterior diseño de un Modelaje Basado en el Agente (en inglés *Agent Based Modelling - ABM*), el cual tiene el propósito de mostrar una propuesta conceptual dentro de un escenario lo más parecido al mundo real. En consecuencia, la metodología permite ser complementada por otras herramientas, pero también puede complementar a otros métodos o metodologías.

Finalmente, lo que en su momento surgió como parte de un proyecto en una universidad británica para ser aplicado a organizaciones del mismo país, su uso ha trascendido las fronteras de la academia para abarcar el campo profesional, aplicándose a diversos sectores, áreas y espacios geográficos. Esta diversa aplicación ha causado alteraciones en el diseño de la estructura

original de la MSS, tal y como suele suceder con otras metodologías. Una de las adecuaciones que sufrió la Metodología fue la realizada por Checkland, en la cual se percató de la necesidad de considerar los aspectos culturales, de historia y políticos de una situación problema; en otros casos, otros autores la han modificado simplemente por diseño. A pesar de lo anterior, y dado su reconocimiento, aceptación y aplicabilidad, la versión original sigue siendo ocupada, tal y como lo fue para este capítulo.

2.9. Referencias

Bawden, R. J., Macadam, R. D., Packham, R. J., & Valentine, I. (1984). Systems thinking and practices in the education of agriculturalists. *Agricultural Systems*, *13*(4), 205–225. https://doi.org/10.1016/0308-521X(84)90074-X

Beer, S. (1984). The Viable System Model: Its Provenance, Development, Methodology and Pathology. *Journal of the Operational Research Society*, *35*(1), 7–25. https://doi.org/10.1057/jors.1984.2

Checkland, P. (1981). *Systems Thinking, Systems Practice*. Wiley.

Checkland, P. (1985). From optimizing to learning: A development of systems thinking for the 1990s. *Journal of the Operational Research Society*, *36*(9), 757–767. https://doi.org/10.1057/jors.1985.141

Checkland, P. (1999). *Systems Thinking, Systems Practice: Includes a 30-Year Retrospective*. Wiley.

Checkland, P. (2019). Reflections on 40 years in the management field: A Parthian shot (friendly). *Journal of the Operational Research Society*, *70*(8), 1219–1223. https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1590137

Checkland, P., & Haynes, M. G. (1994). Varieties of systems thinking: The case of soft systems methodology. *System Dynamics Review*, *10*(2–3), 189–197. https://doi.org/10.1002/sdr.4260100207

Flood, R. L., & Jackson, M. C. (1991). Total systems intervention: A practical face to critical systems thinking. *Systems Practice*, *4*(3), 197–213. https://doi.org/10.1007/BF01059565

Flood, R. L., Jackson, M. C., & Schecter, D. (1992). Total systems intervention: A research program. In *Systems Practice* (Vol. 5, Issue 1). https://doi.org/10.1007/BF01060048

Freeman, L. C. (1979). Centrality in social networks: conceptual clarification. *Social Networks*, *1*(3), 215–239. https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7

Gigch, J. P. van. (1978). *Applied General Systems Theory* (2nd ed.). Harper and Row Publishers.

Gigch, J. P. van, & Kramer, N. J. T. A. (1981). A taxonomy of Systems Science. *International Journal of Man-Machine Studies*, *14*, 179–191. https://doi.org/10.1016/S0020-7373(81)80040-5

González, C. A., Manrique, C., & Grajales, H. (2014). Formulación de un modelo conceptual de la gestión de la información en la producción de ovinos y caprinos: 1 análisis de los sistemas de gestión y definición de las fronteras del modelo. *Revista de La Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, *61*(3), 284–301. https://doi.org/10.15446/rfmvz.v61n3.46878

Hanneman, R. A., & Riddle, M. (2011). Concepts and Measurements for Basic Network Analysis. In J. Scott & P. J. Carrington (Eds.), *The SAGE Handbook of Social Network Analysis* (pp. 331–369). SAGE.

Holwell, S. (2000). Soft Systems Methodology: Other Voices. *Systemic Practice and Action Research*, *13*(6), 773–797. https://doi.org/10.1023/A:1026479529130

Jackson, M. C. (2003). *Systems Thinking: Creative Holism for Managers*. Wiley.

Jackson, M. C., & Keys, P. (1984). Towards a System of Systems Methodologies. *Journal of the Operational Research Society*, *35*(6), 473–486. https://doi.org/10.1057/jors.1984.101

Juárez Díaz, D., Coria Páez, A. L., Jiménez Arenas, O. L., & Tejeida Padilla, R. (2021). El Sistema Agroalimentario En Zonas Rurales De La Ciudad De México En El Contexto Emergente Por Sars-Cov-2. Reflexiones Desde El Enfoque Sistémico. *Textual*, *77*, 469–499. https://doi.org/10.5154/r.textual.2021.77.16

Macadam, R. D., Britton, I., Russell, D., Potts, W., Baillie, B., & Shaw, A. (1990). The use of soft systems methodology to improve the adoption by Australian cotton growers of the siratac computer-based crop management system. *Agricultural Systems*, *34*(1), 1–14. https://doi.org/10.1016/0308-521X(90)90090-D

Macadam, R. D., & Packham, R. G. (1989). A case study in the use of soft systems methodology: Restructuring an academic organisation to facilitate the education of systems agriculturalists. *Agricultural Systems*, *30*(4), 351–367. https://doi.org/10.1016/0308-521X(89)90004-8

Mills-Packo, P. A., Wilson, K., & Rotar, P. (1991). Highlights from the use of the soft systems methodology to improve agrotechnology transfer in Kona, Hawaii. *Agricultural Systems*, *36*(4), 409–425. https://doi.org/10.1016/0308-521X(91)90069-M

Mingers, J. (2000). An Idea Ahead of Its Time: The History and Development of Soft Systems Methodology. *Systemic Practice and Action Research*, *13*(6), 733–755. https://doi.org/10.1023/A:1026475428221

Mingers, J., & Brocklesby, J. (1997). Multimethodology: Towards a framework for mixing methodologies. *Omega*, *25*(5), 489–509. https://doi.org/10.1016/S0305-0483(97)00018-2

Mingers, J., & Taylor, S. (1992). The Use of Soft Systems Methodology in Practice. *Journal of the Operational Research Society*, *43*(4), 321–332. https://doi.org/10.1057/jors.1992.47

Proches, C. N. G., & Bodhanya, S. (2015). An application of soft systems methodology in the sugar industry. *International Journal of Qualitative Methods*, *14*(2015), 1–14. https://doi.org/10.1177/160940691501400101

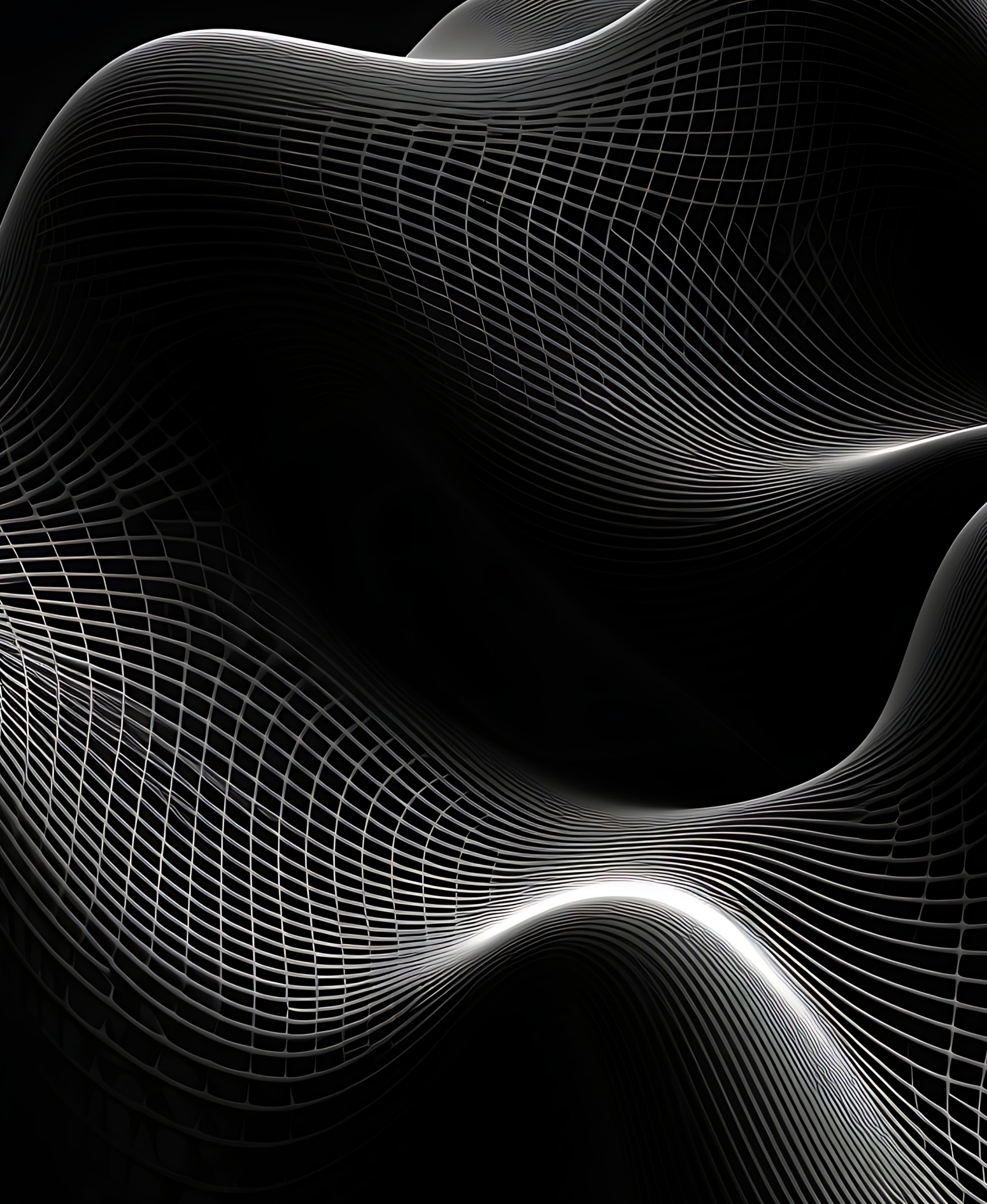
Reynolds, M., & Holwell, S. (Eds.). (2020). *Systems Approaches to Making Change: A Practical Guide* (Segunda Ed). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7472-1

Romero-García, L. E., Tejeida-Padilla, R., Ramírez-Gutiérrez, A. G., & Morales-Matamoros, O. (2015). A systemic model of the sustainable urban tourism insertion in the digital, smart and knowledge city of Mexico City. In C. A. Brebbia & W. F. Florez-Escobar (Eds.), *The Sustainable City X* (pp. 47–58). WIT Press. https://doi.org/10.2495/SC150051

Sutoyo, M. A. H., & Sensuse, D. I. (2018). Designing a Conceptual Model for Rice Information Systems using Gamification and Soft System Methodology. *2018 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)*, 63–68. https://doi.org/10.1109/ICACSIS.2018.8618195

Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social Network Analysis: methods and applications*. Cambridge University Press.

Wilson, B. (1990). *Systems: Concepts, Methodologies, and Applications* (2nd ed.). Wiley.



3. Modelo de Sistemas Viables

Ana Gabriela Ramírez-Gutiérrez[1, 2 *]

3.1. Resumen

El Modelo de Sistemas Viables (MSV) es un modelo neurocibérnetico desarrollado por Stafford Beer, el cual tiene por objetivo la viabilidad de las organizaciones a través del uso de herramientas adecuadas al grado de complejidad que los cambios del entorno plantean. Se basa en la Cibernética de Wiener, la Ley de la Variedad Requerida de Ashby y la Teoría de Redes Neuronales de McCulloch. El modelo distingue cinco subsistemas que se encuentran en continua interacción con el fin de mantener el sistema en un estado de equilibrio homeostático; es decir, bajo control. El proceso regulador persigue asegurar la supervivencia a corto y largo plazo del sistema mediante procesos de aprendizaje, adaptación, y evolución. La denominación dada a los cinco subsistemas es la siguiente: a) Sistema 1. Encargado de producir y entregar al entorno los bienes y servicios que genera la organización (operaciones); b) Sistema 2. Está a cargo del funcionamiento armónico de las unidades operativas que constituyen el Sistema 1 (coordinación); c) Sistema 3. Gestiona las unidades del Sistema, se ocupa del aquí y presente de la organización (dirección); d) Sistema 4. Se ocupa del futuro y el entorno de la organización (inteligencia); y, f) Sistema 5. Constituye la máxima autoridad de la organización, equilibra el presente y futuro de la organización teniendo en cuenta factores internos y externos que afectan a la organización (política). Adicionalmente, como apoyo, se encuentra el Sistema 3*, el cual capta información del funcionamiento del subsistema 1 que el Sistema 2 no puede proporcionar (auditoría). El MSV sirve para configurar una nueva organización o realizar el diagnóstico de una ya existente buscando que cumpla la finalidad para la que se crea o ha sido creada. El MSV ha sido probado en distintos sectores y países y puede ser utilizado a nivel de teoría, metodología o como una aplicación.

Palabras clave: organizaciones, viabilidad, sustentabilidad, sistémica, sistemas suaves.

[1] Universidad Panamericana. ESDAI. Álvaro del Portillo 49, Zapopan, Jalisco, 45010, México.

[2] Networks and Systems Thinking Research Group – NeST.

* Autor de correspondencia: agramirez@up.edu.mx

3.2. Introducción: Antecedentes y origen del Modelo de Sistemas Viables

El Modelo de Sistemas Viables (MSV) es un modelo neurocibérnetico desarrollado por Stafford Beer, que tiene por objetivo la viabilidad de las organizaciones a través del uso de diversas herramientas acordes a los cambios que el entorno plantea; es decir, al grado de complejidad. Está basado en la neurofisiología, la Cibernética de Wiener (1985), la Ley de la Variedad Requerida de Ashby y la Teoría de Redes Neuronales de McCulloch. Este modelo surge como respuesta a la insatisfacción que Beer tenía por el enfoque tradicional del Management en los años 50´s.

Para comprender el Modelo de Sistemas Viables, es necesario conocer algunos conceptos como viabilidad y cibernética de segundo orden. Beer (1994) define la viabilidad como el mantenimiento de la identidad de la organización por medio de procesos de aprendizaje, adaptación y evolución, los cuales regulan el sistema por completo y permiten su supervivencia; es decir, el concepto de viabilidad incluye el desarrollo sustentable a largo plazo. Por otro lado, la cibernética de segundo orden, creada por Heinz von Foerster, surge como resultado del interés de la cibernética para estudiar las similitudes entre las máquinas y los sistemas vivientes; por tanto, estudia el rol del humano u observador en la construcción de modelos de sistemas y otros observadores. De acuerdo con su creador, la cibernética de segundo orden es un proceso de cibernética de cibernética (von Foerster, 1991), en el cual el cambio epistemológico fundamental es que el observador independiente o investigador se considera a sí mismo para ser un agente participante en la interacción; además de ello, el científico de cibernética de segundo orden trabaja con un sistema suave o social en el que se reconoce a su sistema como un agente interactuando con otros agentes, encontrándose entre ellos a él mismo.

Otro concepto que se vuelve relevante para comprender el MSV es la variedad; este concepto es utilizado para caracterizar la complejidad. La variedad manifiesta el grado de complejidad de un sistema y equivale al número de estados posibles y comportamientos actuales o potenciales que se pueden dar en una determinada situación (Pérez Ríos, 2008). Es por ello que se requiere la ingeniería de la variedad para generar un balance de variedades.

De acuerdo con el Teorema de Conant, un buen regulador del sistema debe ser un modelo del sistema, pero dicho modelo y, consecuentemente, el sistema regulado debe poseer un grado de variedad (complejidad) acorde con la del sistema que trata de regular (gobernar) (Ashby, 1999). En referencia a ello, el MSV toma en consideración la Ley de la variedad requerida, la cual menciona que sólo la variedad absorbe la variedad y es el observador quien define el sistema y su propósito, así como su variedad.

Con base en lo anterior, el MSV busca proporcionar las condiciones suficientes y necesarias de viabilidad para que cualquier sistema reconozca su propia identidad y pueda obtener el reconocimiento por parte de otros (Beer, 1990). De lo anterior, se concibe como sistema a cualquier organización de cualquier dimensión, el cual, a su vez, estará incrustado en un entorno con el que interactúa todo el tiempo.

Para el funcionamiento de un sistema, el MSV parte de tres elementos básicos (Figura 1). Estos son: 1) el ambiente en el que opera el sistema, pensando en organizaciones se puede definir al mercado que sirve; 2) el sistema operativo, que es el encargado de producir los bienes y/o servicios que ofrece la organización; y 3) la unidad de dirección, que es la encargada de asegurar el correcto funcionamiento del sistema operativo (Beer, 1994).

El contar con esos elementos, además de asegurar su correcta comunicación, se vuelve fundamental para asegurar la viabilidad del sistema, así como mantiene la forma de organización en distintos niveles recursivos, lo cual se conoce como sistemas anidados; es decir, un sistema viable que contiene y es contenido en un sistema viable.

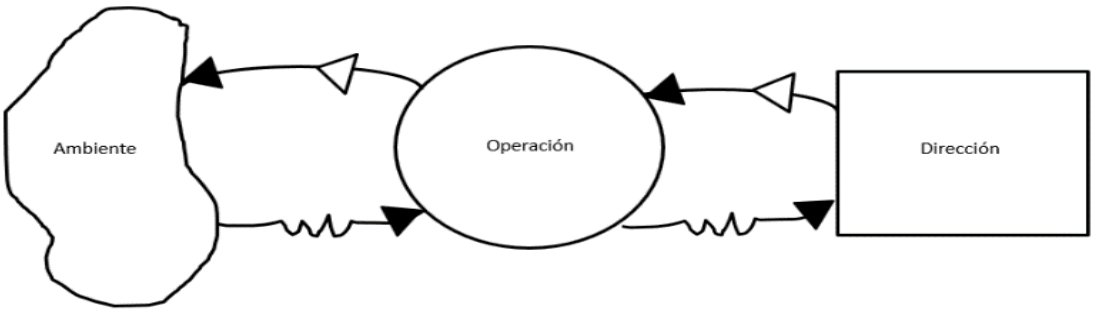


Figura 1. Elementos básicos para la viabilidad de un sistema

Fuente: Beer (1994).

Aunado a los tres elementos ya mencionados, el sistema cuenta con dos mecanismos adicionales que sirven de soporte para regular la variedad; estos son los atenuadores y amplificadores, los cuales ayudarán a absorber de la variedad del ambiente sólo aquella requerida por el sistema y, por el contrario, amplificar la variedad que el sistema quiere hacer llegar al ambiente.

Otra aportación importante que realizó Beer, y que es de vital importancia para la viabilidad de los sistemas, es el concepto de Cibernética Organizacional (CO). Esto lo definió como resultado de la aplicación de la cibernética dentro de las organizaciones. Un concepto clave en la CO es la caja negra de Ashby (Cardoso, 2011), en la cual se conocen las entradas y los resultados a emerger, pero no el proceso de transformación para lograrlo. Esto nos lleva a reconocer la importancia que la CO y la ley de la variedad requerida tienen para que las organizaciones puedan asegurar su viabilidad y cumplir con la finalidad para la que se crea o ha sido creada, ya que requieren la disponibilidad de herramientas adecuadas al grado de complejidad que los cambios del entorno plantean.

Para cumplir lo anterior, la CO tiene dos opciones:

1. Desdoblamiento vertical de la complejidad, la cual consiste en ir descomponiendo el entorno en entornos más pequeños contenidos en el inicial (dimensión vertical).
2. Dimensión horizontal, en la cual se encuentran los componentes existentes en un determinado nivel que son los tres elementos básicos que ya se mencionaron (ambiente, operación y dirección). Para que se cumpla con la Ley de Ashby se necesitan mecanismos que hagan posible el equilibrio entre ellos; es decir, los atenuadores y los amplificadores.

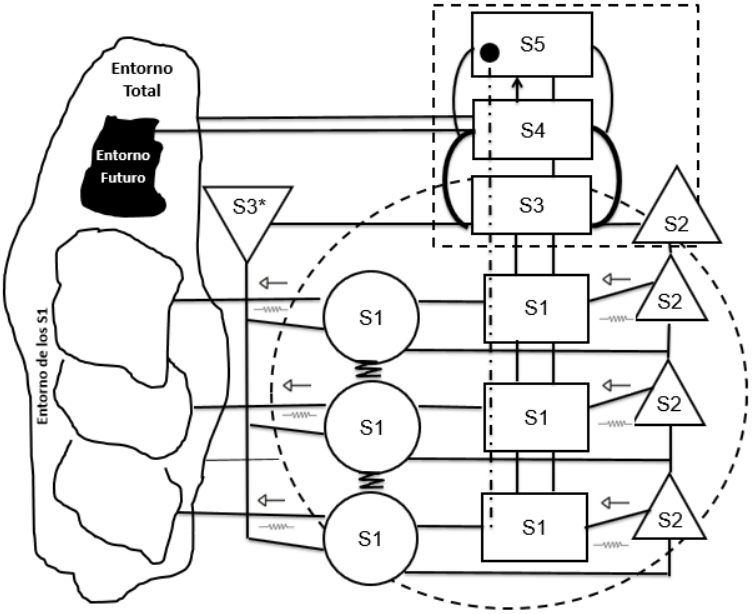
Más adelante se explicarán todos los elementos que conforman al MSV, lo que ayudará a la comprensión y aplicación en el modelo de estos conceptos mencionados.

Es importante tener en cuenta que el MSV se puede utilizar a nivel de teoría, metodología o como una aplicación dependiendo del problema de estudio; y sirve para configurar una nueva organización o realizar el diagnóstico de una ya existente buscando que cumpla la finalidad para la que se crea o ha sido creada. El modelo se ha utilizado en distintas industrias en todo el mundo (Espejo et al., 1999; Espinosa, 2015).

3.3. Elementos del Modelo de Sistemas Viables

El Modelo de Sistemas Viables (MSV) distingue cinco subsistemas para su funcionamiento, éstos se encuentran en continua interacción y tienen el fin de mantener al sistema en equilibrio homeostático; es decir, bajo control. El proceso regulador, a través de procesos de aprendizaje, adaptación, y evolución busca asegurar la supervivencia del sistema a corto y largo plazo. La denominación dada por Beer (1994) a los cinco subsistemas es la siguiente:

- **Sistema 1. Operaciones:** Es el encargado de producir y entregar al entorno los bienes y servicios que genera la organización.
- **Sistema 2. Coordinación:** Está a cargo del funcionamiento armónico de las unidades operativas que constituyen el Sistema 1.
- **Sistema 3. Administración:** Es el encargado de la gestión de las unidades del Sistema; se ocupa del aquí y presente de la organización.
- **Sistema 4. Inteligencia:** Su principal función es ocuparse del futuro y entorno de la organización.
- **Sistema 5. Política:** Constituye la máxima autoridad de la organización; equilibra el presente y futuro de la organización teniendo en cuenta los factores internos y externos que afectan a la organización.
- **Sistema 3*. Canal Auditor:** Adicionalmente se integra este sistema, el cual es un sistema de apoyo que capta información del funcionamiento de las unidades operativas del sistema 1, que el sistema 2 no puede proporcionar.



Símbolo	Descripción
○	Unidad Operativa (Sistema 1) – Se puede tener uno para cada unidad operativa, unidad de negocio o sucursal, dependiendo el sistema en foco o sistema en estudio.
△	Unidad de Coordinación (Sistema 2) – Se tiene uno para cada sistema 1; está a cargo del funcionamiento armónico de las unidades operativas. Los mecanismos del sistema 2 actúan en el eje horizontal del despliegue de la complejidad. Pueden ser sistemas de información, normas contables, procedimientos, programación de tareas, entre otros.
▭	Unidad de Dirección (Sistemas 3, 4 y 5) – Sistema de gestión de las unidades operativas; se cuenta con una unidad de dirección para cada una. Además, conforma el metasistema de la organización a través de los sistemas 3, 4 y 5. También se conoce como sistema de integración.
▽	Auditoría (Sistema 3*) – Sistema de auditoría que busca obtener información del funcionamiento del sistema 1 a través de auditorías fiscales, de calidad, certificaciones, entre otras.
	Entorno – Mercado al que sirve la organización y cada una de las unidades operativas.
——	Relaciones – Canal a través del cual fluye la información. Existen tres tipos de relaciones elementales para el sistema: 1) recepción de instrucciones y directrices, 2) rendición de cuentas y 3) negociación de recursos.
⟵	Amplificadores – Amplían la capacidad de la organización para desplegar más capacidad frente al entorno o la capacidad de directivos de la empresa hacia la propia organización.
⟿	Atenuadores - Mecanismos que seleccionan entre la variedad del entorno; solamente aquella que es relevante para la organización.
	Canal Algedónico - Canal de respuesta inmediata en el que un asunto de urgencia puede ser resuelto por el sistema 5.

Figura 2. Modelo de Sistemas Viables

Fuente: Elaboración propia modificado de Beer (1994).

Adicional a lo mencionado por Beer (1994), se sugiere la implementación del subsistema 6 que es el encargado de la comunicación de todos los subsistemas. Este es un sistema de información tipo Planeación de los Recursos Empresariales (ERP, por sus siglas en inglés).

La Figura 2 muestra estos elementos modificados a partir de la propuesta de Beer además de describir la simbología de cada uno de ellos.

Adicionalmente, Beer (1994) propone un glosario de reglas para hacer un sistema viable, el cual está compuesto de dos aforismos regulatorios, cuatro principios para la organización, un teorema y cuatro axiomas. Es necesario tenerlos en consideración al momento de diseñar una organización o diagnosticar su estado. A continuación, se resume dicho glosario con la propia interpretación a manera de hacer más fácil la comprensión de este:

3.3.1. Aforismos

1er aforismo regulador. - No es necesario ingresar al sistema o a los procesos de la organización para comprender la función que realiza.

2do aforismo regulador. - No es necesario ingresar al sistema o a los procesos de la organización para calcular la variedad o estados posibles que puede generar el sistema.

3.3.2. Principios

1er principio de la organización. - En las organizaciones debe haber un equilibrio en la variedad (cambios) del área de gestión, el área operativa y el ambiente. Cada uno de estos elementos debe estar diseñado para absorber la variedad generando el mínimo daño a las personas y al ambiente, a un menor costo.

2do principio de la organización. - Los canales de información deben tener la mayor capacidad para transmitir la información relevante para las unidades de dirección, las operaciones y el ambiente en un tiempo determinado acorde a las necesidades.

3er principio de la organización. - La información que capta un canal debe ser codificada y traducida a un lenguaje o indicadores que sean realmente entendidos por el sistema.

4to principio de la organización. - El funcionamiento de los tres primeros principios debe ser cíclico en el tiempo, sin retrasos o interrupciones.

3.3.3. Teorema del sistema recursivo

En una estructura organizacional con diferentes niveles recursivos, existen sistemas anidados; es decir, sistemas viables que contienen y están contenidos en otros sistemas viables.

3.3.4. Axiomas

1er axioma de gestión. - La suma de la variedad horizontal o de los sistemas operativos es igual a la suma de la variedad vertical dispuesta en los seis sistemas básicos de la organización.

2do axioma de gestión. - La variedad del sistema 3, que resulta de las variedades horizontal y vertical, es igual a la variedad dispuesta por el sistema 4; es decir, la variedad del aquí y ahora debe igualar a la variedad para comprender el futuro de la organización. El canal homeostático apoya en asegurar esto.

3er axioma de gestión. - La variedad del Sistema 5 es igual a la variedad residual generada por la operación de los sistemas 3 y 4.

3.3.5. Ley de cohesión para las múltiples recursiones de los sistemas viables

La variedad del Sistema 1 que accede al Sistema 3 de recursión *x* es igual a la variedad dispuesta por la suma de los metasistemas de recursión y para cada par recursivo.

Como se puede observar, el glosario está centrado en la función de un balance apropiado entre la autonomía de los subsistemas y su integración dentro del sistema, o el balance entre estabilidad y adaptación.

3.4. Algunas otras interpretaciones del MSV

El MSV ha sido estudiado por diversos autores a lo largo de los años (Espejo et al., 1999; Espinosa & Walker, 2011; Pérez Ríos, 2006; Schwaninger, 2006), los cuales han desarrollado su propia interpretación del MSV, algunos como método o como metodología para diseñar organizaciones viables a partir de las necesidades de estudio propias. Se puede consultar a Harwood (2018) para revisar un minucioso recuento de aquellos autores que han hecho su interpretación del MSV y una descripción de la postura de estos. De igual manera menciona la importancia de incorporar el MSV a una metodología que permita conocer el contexto de la organización; es decir, conocer cuál es la problemática y cuáles son todos los agentes involucrados en el sistema, así como su compromiso o relación con el sistema, lo cual puede ser identificado a través del uso en conjunto con algunas metodologías, tales como la Metodología de Sistemas Suaves (MSS). Más adelante se explicará

cómo la combinación de estás metodologías ha sido de gran utilidad para estudiar diferentes organizaciones. Por tanto, podemos identificar al MSV como una metodología o herramienta metodológica a utilizar para dar respuestas a las interrogantes del tipo "¿Qué?" y "¿Cómo?" ante una situación problemática; es decir, ya conocemos que es un problema organizacional el que se tiene y a través del modelo definiremos cómo resolverlo.

En este capítulo se presenta la interpretación de tres autores para el MSV y los principales cambios que incorporan con base en el modelo propuesto por Beer.

3.4.1. La interpretación del MSV por Espejo

La propuesta presentada por Espejo et al. (1999) es el Método Viplan. Como se puede observar en el nombre, se presenta como un método con pasos estructurados; esta propuesta se ha desarrollado durante los años de aplicación del MSV en organizaciones de distintas dimensiones en los sectores público y privado. El método se utiliza en dos modos: I) se estudia una organización existente y su finalidad es diagnosticar y II) es un instrumento de diseño para una empresa que está en proceso de establecerse o está experimentando un proceso fundamental de cambio de identidad.

Los pasos para la aplicación del método son los siguientes:

1. Establecimiento de la identidad organizacional. - La identidad expresa el significado de la organización para los miembros de ésta, se considera como una declaración concisa pero altamente descriptiva de la organización como un sistema total desde un punto de vista particular. Las declaraciones de identidad ayudan a los participantes relevantes a identificar su interacción.
2. Modelación de niveles estructurales. - El Viplan basa los modelos estructurales en una serie de consideraciones estratégicas, como las relaciones con proveedores y clientes, la cobertura geográfica, los procesos tecnológicos y el tiempo. El propósito de este paso es comenzar a examinar la complejidad de la organización en su totalidad, lo cual es fundamental para la estrategia de la organización y la forma en que funciona. Algunas de las herramientas de modelación estructural más utilizadas son los modelos tecnológicos, los cuales muestran qué actividades producen la transformación y la forma en que éstas se relacionan entre sí. La construcción del modelo permitirá indagar la complejidad de las tareas que conforman la transformación y evaluar su impacto en la estructura de la organización.
3. Desdoblamiento de la complejidad. - Para el Viplan se deben definir las "actividades primarias" o unidades autónomas, ya sean emergentes o existentes. Estas actividades pueden tener su propia división de actividades primarias dentro de sí misma y estas divisiones pueden tener las unidades de negocios estratégicas dentro de sí mismas y así sucesivamente (sistemas viables contenidos en otros sistemas viables) hasta la entrega de productos o servicios de la organización. En todas las organizaciones existe este despliegue de complejidad, en gran medida como resultado de procesos naturales de la organización. Dentro de este proceso natural de desarrollo, hay elecciones que se pueden hacer, ya que este orden incide en el desempeño de la organización y en su capacidad para cumplir con el propósito

asignado. Todas las actividades primarias, en todos los niveles estructurales, enfrentan el problema de sobrevivir en un entorno complejo. Para ello, el Viplan cuenta con mecanismos de cohesión (o control de monitoreo) y adaptación; estos mecanismos son los denominados por Beer (1994) como atenuadores y amplificadores.

4. Modelación de la distribución de la discreción. - Esta capacidad funcional se relaciona con los recursos discrecionales y funciones afines dentro de cada actividad primaria. La discreción funcional puede variar según las consideraciones estratégicas de la organización. La distribución de la discreción entre las actividades primarias es el núcleo del problema de la centralización-descentralización en el diseño organizativo. Si, en términos relativos, se mantiene demasiada discreción a nivel corporativo, la flexibilidad de los niveles estructurales más bajos puede verse obstaculizada, su respuesta a los cambios locales puede volverse inefectiva. Si, por otro lado, no queda suficiente discreción a nivel corporativo, las economías de escala y la sinergia se verán afectadas. Por lo tanto, la relevancia es la de saber cómo lograr una distribución efectiva de la discreción en cada caso. Para ello, la distribución de la discreción se modela en una tabla de "recursiones contra funciones"; esta tabla relaciona funciones como finanzas, marketing, cumplimiento de pedidos, desarrollo de productos, entre otros.
5. Modelación de la estructura organizativa: estudio, diagnóstico y diseño de los mecanismos regulatorios (adaptación y cohesión). - La modelación de un MSV para la organización es el paso final del método, esto se hace al mapear las actividades primarias en función de las operaciones del MSV y las de regulación en las funciones de política, inteligencia, cohesión y coordinación. Los recursos relacionados con cada una de estas funciones definen la capacidad de las actividades primarias. Es sólo en este punto donde puede tener lugar una discusión adecuada de las relaciones entre las funciones del sistema.

3.4.2. La interpretación de Espinosa y Walker: un acercamiento a la MSS

Por su parte, la metodología presentada por Espinosa y Walker (2013) muestra de una manera sistemática la aplicación del MSV a través de una metodología genérica de seis pasos. Esta metodología es muy acorde con aquella propuesta por Espejo et al. (1999) e incluyen algunas herramientas de esta, las cuales, a su vez, están basadas en la MSS (Checkland, 2001); además de ello, esta metodología cuenta con diversos elementos relacionadas con la MSS. Estos son los pasos que describe la metodología:

1. Especificar el sistema en foco y establecer la identidad de la organización.
2. Identificar los niveles recursivos; es decir, los sistemas anidados y que anidan al sistema.
3. Realizar el diagnóstico estructural identificando las debilidades en la viabilidad del sistema, tomando en consideración meta preguntas (pueden revisarse en Espinosa y Walker, 2013) las cuales incluyen temas de identidad, autonomía operativa, mecanismos para tratar la complejidad del ambiente e interno, autogobierno y para conocimiento administrativo.
4. Generar la estrategia para la alineación estructural de acuerdo con las debilidades encontradas.
5. Implementación de los cambios requeridos.
6. Monitoreo y evaluación de los cambios.

Estos dos últimos pasos basados en la MSS.

El diagnóstico del MSV, de acuerdo con los autores, requiere varias iteraciones. Para ello, se necesita la colaboración de los miembros del sistema para participar en el proceso de co-diseño a través de talleres. Espinosa (2015) encuentra además al MSV como un meta-lenguaje para facilitar las intervenciones sistémicas a través de debates estructurados sobre temas fundamentales sobre la autoorganización y el autogobierno en comunidades o empresa.

Dentro de la metodología, los autores hacen uso de un mix metodológico, incluyendo el Análisis de Redes Sociales (para valorar el proceso de la dinámica de autoorganización) y la MSS (para la construcción de visiones enriquecidas), así como el establecimiento de definiciones raíz; además de, como ya se mencionó, la implementación, evaluación y monitoreo de los cambios requeridos.

3.4.3. La complementariedad del MSV y la MSS de Ramírez Gutiérrez et al. (2021)

Esta es una propuesta metodológica en la cual se combinan la MSS y el MSV con el objetivo de evaluar la estructura organizacional de una empresa u organización. Establece la integración de ambas metodologías desde las etapas iniciales, al tomar en cuenta las aplicaciones realizadas anteriormente por diferentes autores (Bustard et al., 2006; Donaires et al., 2010; Hildbrand & Bodhanya, 2017; Kinloch et al., 2009;) e identificar la compatibilidad y complementariedad de las metodologías. Una de las principales críticas al MSV, y que Beer aclara para comprender el modelo, es que diversos autores lo describen como un modelo jerárquico, determinista y prescriptivo. Por el contrario, se puede comprender a nivel de herramienta como un complemento que soporta a la MSS para operacionalizar los modelos conceptuales.

La propuesta establece una metodología en seis pasos, los cuales se pueden observar en la Figura 3 y que se describen a continuación de manera breve. Para conocer la aplicación y materiales complementarios para realizar el diagnóstico se sugiere consultar a Ramírez Gutiérrez et al. (2021).

Etapa 1: Definición de la problemática percibida del mundo real, definiendo el sistema en foco. Se identifica el sistema en foco o nivel recursivo a analizar, así como los elementos que contiene la organización y los del entorno. Todo ello con base en la definición de visiones enriquecidas. La identificación de estos elementos conduce a la etapa 2.

Etapa 2: Selección de Sistemas relevantes de actividad y su definición raíz. Se identifican los sistemas relevantes con ayuda del mnemónico CATWOES que, además de aquellos descritos por Checkland (2001), considera a los proveedores de la organización (en inglés *suppliers* - S) tomados de la propuesta realizada por Espejo et al (1999). Una vez identificados los sistemas relevantes, se expresa la definición raíz del sistema en general y de aquellos sistemas relevantes que conforman la organización. Esto ayuda a determinar la identidad de la organización.

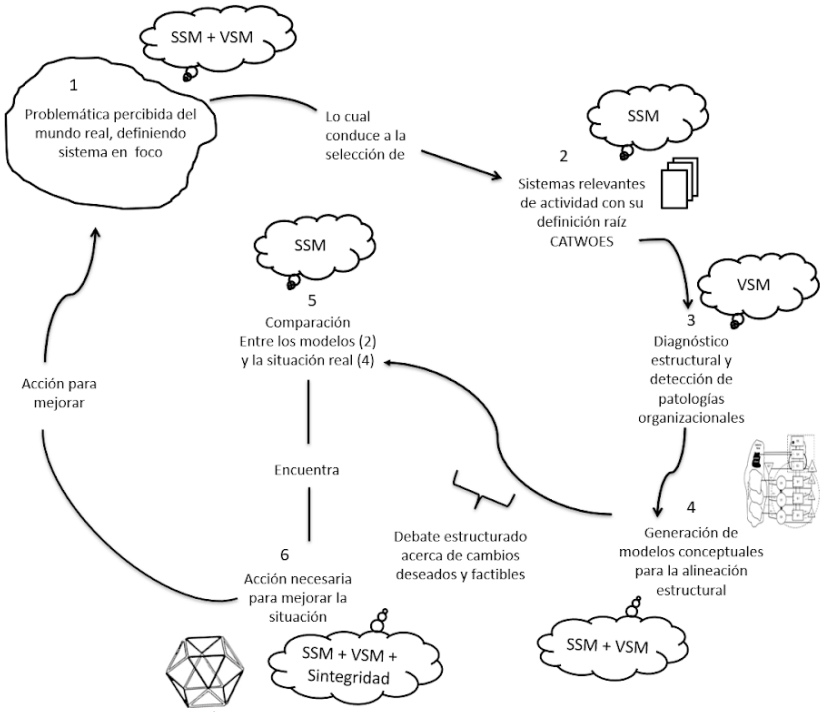


Figura 3. Complementariedad de la MSS y el MSV

Fuente: Ramírez-Gutiérrez (2019).

Etapa 3: Diagnóstico organizacional y detección de patologías organizacionales. Se hace uso de la tabla de meta preguntas del MSV propuesta por Espinosa y Walker (2013) para generar el diagnóstico de la organización, además de un cuestionario basado en la propuesta de Pfiffner (2017) el cual está diseñado para ser aplicado a los elementos asociados a la organización y con ello poder realizar el diagnóstico organizacional. Cardoso y Espinosa (2019) han definido las patologías o disfunciones sistémicas encontradas durante el diagnóstico de la organización, las cuales son asociadas como parte del resultado del diagnóstico.

Etapa 4: Generación de modelos conceptuales para la alineación estructural. Se generan modelos conceptuales para describir los ajustes organizativos necesarios para implementar la estrategia organizacional.

Etapa 5: Comparación entre los modelos conceptuales y la realidad. Se comparan los modelos conceptuales con la situación actual de la organización para conocer las patologías organizacionales encontradas.

Etapa 6: Acción necesaria para mejorar la situación. Se proponen cambios deseables y viables basados en el resultado del paso anterior. Posteriormente, se procede a la acción de dichos cambios y el control de los mismos en un proceso iterativo. Para la realización de esto es conveniente hacer uso de la Sintegración de Beer para realizar la toma de decisiones de manera participativa.

Como se puede analizar, cada una de las propuestas tiene su propia interpretación de la aplicación del MSV en las organizaciones; sin embargo, lo que se busca a través de ellas es facilitar la operacionalización del modelo para diagnosticar patologías organizacionales o diseñar una nueva organización que pueda evitarla. Todas las propuestas anteriores se basan y respetan el glosario de términos propuesto por Beer (1994).

Para concluir, el capítulo hace un breve recuento de los principales estudios en los que se ha aplicado el MSV.

3.5. Aplicaciones del MSV

Como se mencionó anteriormente, el MSV ha sido probado desde su creación en organizaciones de distintas industrias, así como en distintos países y dimensiones, lo que modifica el contexto.

Una búsqueda rápida en Scopus arroja más de 670 trabajos referentes al MSV siendo la mayoría de ellos enfocados al área de ingeniería, ciencias computacionales y negocios, gestión y contabilidad.

En cuanto a su aplicación, es tan diversa que abarca temas de manejo de residuos, refinerías petroleras, turismo, gobierno, sector salud, cosméticos, sólo por mencionar algunos (Adamides et al., 2023; Adham et al., 2023; Espinosa et al., 2023; Murphy & Regenold, 2023; Sánchez-García et al., 2019).

En cuanto al sector agroindustrial sólo dos resultados fueron arrojados (Smirnova et al., 2021; Velásquez-Rodríguez & Payán-Durán, 2022), en los cuales se desarrolla el diseño organizacional, por una parte, para el estudio de pequeños productores cafetaleros en el Municipio de Viotá – Colombia; por el otro, para la formación de clústeres agroindustriales transfronterizos y desarrollo. A pesar de ser pocos, estos estudios abren el panorama para el uso de este modelo en dicho sector.

3.6. Conclusiones

El MSV es una herramienta metodológica muy completa que puede ser utilizada a nivel de teoría, metodología o instrumento para la configuración o diagnóstico de organizaciones de cualquier sector o tamaño; esto se ha podido probar a través de distintos estudios que se han realizado para diferentes organizaciones en distintos sectores económicos.

El objetivo principal del modelo es que la organización cumpla con la finalidad para la que se crea o ha sido creada siendo sostenible a lo largo del tiempo. Este punto es crucial para la relevancia del modelo y la vigencia de su aplicación; en la actualidad, el cambio rápido de las organizaciones y su entorno, así como la importancia de contemplar la sustentabilidad como parte de ellas, hace vital considerar metodologías que contemplen estos aspectos como parte de su estudio.

A través del capítulo se presentan diversas conceptualizaciones del modelo a partir de la original de Beer (1990) y las distintas visiones de autores que han implementado cambios en el modelo a fin de adecuarlo a los cambios que se van presentando a lo largo del tiempo. Se menciona que la variedad y el contexto son dos conceptos indispensables para comprender el sistema; lo mismo sucede para comprender los métodos o metodologías de estudio, es por ello que, dependiendo las necesidades de estudio, se puede adecuar la aproximación idónea.

Finalmente, es importante conocer que, si bien en algunos países de Latinoamérica como México, Chile y Argentina se ha explorado y se sigue desarrollando el estudio del MSV, se han encontrado mayores estudios y aplicaciones del modelo en países europeos como Reino Unido, Alemania y Suiza.

3.7. Referencias

Adamides, E. D., Georgousoglou, K., & Mouzakitis, Y. (2023). Designing a Flexible and Adaptive Municipal Waste Management Organisation Using the Viable System Model. *Sustainability*, *15*(18), 13323. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su151813323

Adham, K. A., Muhamad, N. S., Masood, A., & Rahim, A. A. (2023). Diagnosing a Halal Certification System for Cosmetics: The Viable System Model Approach. *Systemic Practice and Action Research*. https://doi.org/10.1007/s11213-023-09647-x

Ashby, W. R. (1999). *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall.

Beer, S. (1990) *The Heart of Enterprise*. John Wiley, Chichester.

Beer, S. (1994) *Brain of the Firm*. John Wiley, Chichester.

Bustard, D. W., Sterritt, R., Taleb-Bendiab, A., & Laws, A. (2006). Autonomic system design based on the integrated use of SSM and VSM. *Artificial Intelligence Review, 25*, 313–327. https://doi.org/10.1007/s10462-007-9031-8

Cardoso Castro, P. P. (2011). *Facilitating self-organization in non-hierarchical communities. A methodology for regeneration program*. Hull University Business School, Hull.

Cardoso Castro, P. P., & Espinosa, A. (2019). Identification of organisational pathologies: exploration of social network analysis to support the viable system model diagnostic. *Kybernetes*, *49*(2), 285–312. https://doi.org/10.1108/K-10-2018-0557

Checkland, P. (2001). *Systems thinking, systems practice*. Wiley, Chichester.

Donaires, O. S., Pinheiro, M. G., Cezarino, L. O., Ostanel, L. H., & Martinelli, D. P. (2010). Systemic Model for Diagnosis of the Micro, Small and Medium Enterprises from Two Cities from the Countryside of the State of São Paulo in Brazil. *Systemic Practice and Action Research*, *23*(3), 221–236 (2010). https://doi.org/10.1007/s11213-009-9157-5

Espejo, R., Bowling, D. & Hoverstadt, P. (1999). The viable system model and the Viplan software. *Kybernetes*, *28* (6-7). 661–678. https://doi.org/10.1108/03684929910282944

Espinosa, A. (2015). Governance for sustainability: learning from VSM practice. *Kybernetes*, *44*(6-7), 955-969. https://doi.org/10.1108/K-02-2015-0043

Espinosa, A. & Walker, J. (2013). Complexity management in practice: a viable system model intervention in an Irish eco-community. *European Journal of Operational Research*, *225*(1), 118–129. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.015

Espinosa, A. M., Walker, J., Grover, K., & Vachkova, M. V. (2023). Theviability and sustainability approach to support organisational resilience: Learning in a recent case study in the health sector. *Systems Research and Behavioral Science*, *40*(4), 689–700. https://doi.org/10.1002/sres.2951

Harwood, S. A. (2018). A question of interpretation: The Viable System Model (VSM), *European Journal of Operational Research*, *274*(3), 1198-1201. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.10.054

Hildbrand S., & Bodhanya, S. (2017). Exploring the complexity of sugarcane supply chains via systemic approaches. *Kybernetes 46*(2), 310–329. https://doi.org/10.1108/K-05-2014-0094

Kinloch, P., Francis, H., Francis, M., & Taylor, M. (2009). Supporting crime detection and operational planning with soft systems methodology and viable systems model. *Systems Research and Behavioral Science*, *26*(1), 3–14. https://doi.org/10.1002/sres.943

Murphy, S. E. & Regenold, T. A. (2023). Applying the Viable System Model to Local Government in a Post-Pandemic Context. In M. Azukas & M. Kim (Eds.), *Reimagining Systems Thinking in a Post-Pandemic World* (pp. 79-96). https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7285-9.ch004

Pérez Ríos, J. (2006) Communication and information technologies to enable viable organizations. *Kybernetes*, *35*(7-8), 1109-1125. https://doi.org/10.1108/03684920610675111

Pérez Ríos, J. (2008). *Diseño y diagnóstico de organizaciones viables: un Enfoque Sistémico*. Universidad de Valladolid. España.

Pfiffner, M. (2017). *System viability of organizations and the Aetiology of organizational crisis*. [Tesis de Doctorado, Universität Utrecht]. https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/356772

Ramírez-Gutiérrez, A. G. (2019). Modelo sistémico viable para el turismo de reuniones en México. [Tesis¨ de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional]. https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/26987

Ramírez-Gutiérrez, A. G., Cardoso-Castro, P. P. & Tejeida-Padilla, R. (2021). A Methodological Proposal for the Complementarity of the SSM and the VSM for the Analysis of Viability in Organizations. *Systemic Practice and Action Research*, *34*, 331–357 https://doi.org/10.1007/s11213-020-09536-7

Sánchez-García, J. Y., Ramírez-Gutiérrez, A. G., Núñez-Ríos, J. E., Cardoso-Castro, P. P., & G. Rojas, O. (2019). Systems Thinking Approach to Sustainable Performance in RAMSAR Sites. *Sustainability*, *11*(22), 6469. http://dx.doi.org/10.3390/su11226469

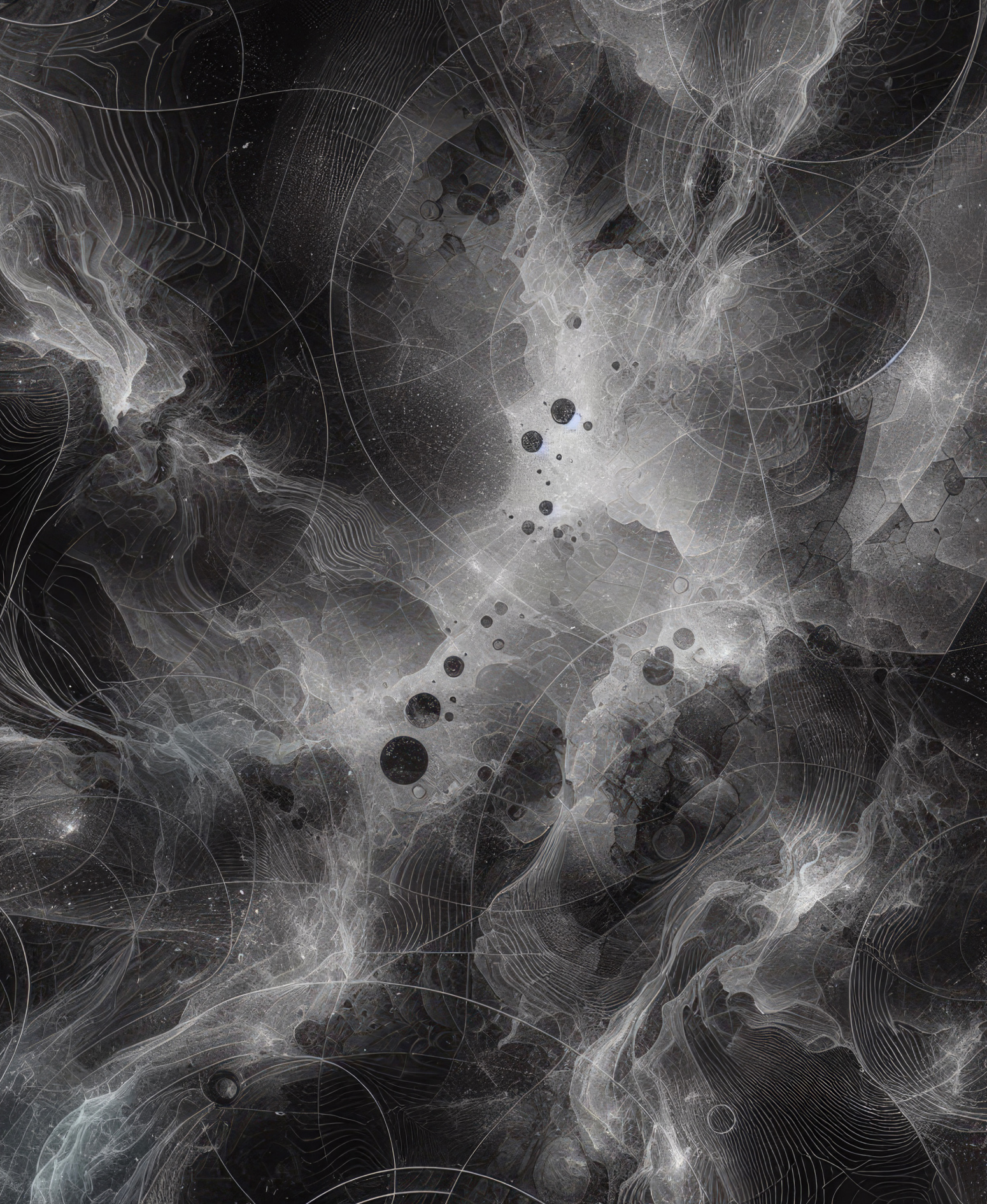
Schwaninger M. (2006). Theories of viability: a comparison. *Systems Research and Behavioral Science*, *23*(3), 337–347. https://doi.org/10.1002/sres.731

Smirnova, E. A., Sivash, O. S., & Potekhina, E. N. (2021). Trans-Border Agro-Industrial Cluster Formation and Development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *720*(1), 012100. https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012100

Velásquez-Rodríguez, C., & Payán-Durán, L. (2022). Organizational Model Design for Small Coffee Farmers in the Municipality of Viotá - Colombia Case Study: Creo en el Agro. *Systemic Practice and Action Research*, *35*, 33–53. https://doi.org/10.1007/s11213-021-09557-w

Von Foerster, H. (1991). *Understanding: Essays on Cybernetics and Cognitions*. Springer.

Wiener, N. (1985) *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. (2nd ed.). The MIT Press, Cambridge Massachusetts.



4. Pensamiento de sistemas y propiedades fractales de sistemas complejos

Oswaldo Morales Matamoros[1*]
Jesús Jaime Moreno Escobar[1]
Ana Lilia Coria Páez[2]

4.1. Resumen

La ciencia de la complejidad estudia la dinámica de los sistemas complejos que exhiben relaciones no lineales entre muchas variables independientes que conducen a la emergencia de patrones que modifican sus estados internos. Los sistemas complejos poseen propiedades genéricas, independientemente de sus detalles específicos, lo que permite clasificarlos en Clases de Universalidad. La clase de universalidad del crecimiento de interfases rugosas posee cuatro propiedades fractales: i) fractal auto-afín, ii) invariancia de escala, iii) correlaciones descritas por leyes de potencia, y iv) caracterización cuantitativa con modelos teóricos de escalamiento dinámico. Un parámetro que permite determinar si un sistema complejo posee propiedades fractales es el exponente Hurst, el cual indica el grado de anisotropía del sistema en estudio, o el grado de rugosidad de las superficies e interfases que poseen geometrías muy complejas e irregulares; a mayor irregularidad, mayor complejidad posee el sistema. Se presenta como caso de estudio la investigación sobre la Dinámica fractal del mercado petrolero, en donde: i) se identifican y caracterizan los parámetros que gobiernan globalmente el comportamiento de los precios del petróleo a diferentes escalas; y ii) se desarrolla, aplica y valida una metodología de predicción de precios del petróleo. Asimismo, se presentan ejemplos de cómo este análisis fractal se ha aplicado en el estudio de la dinámica de las fluctuaciones de los precios de algunos productos agroindustriales, así como en la caracterización de las condiciones climatológicas.

Palabras clave: pensamiento de sistemas, sistemas complejos, petróleo crudo, fractales, pronósticos.

[1] Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México.

[2] Escuela Superior de Comercio y Administración Unidad Tepepan, Instituto Politécnico Nacional, México.

[*] Autor de correspondencia: omoralesm@ipn.mx

4.2. Introducción: Pensamiento sistémico

Para el estudio de la complejidad se desarrolló y aplicó el método analítico, bajo el pensamiento del modernismo, cuya visión, según Cilliers (1998), es entender algo complejo en su conjunto dividiendolo en unidades manejables a fin de analizar dichas unidades por separado y luego volver a ensamblarlas

El pensamiento del modernismo (o mecanicista) se caracteriza por el reduccionismo basado en la división y partición al establecer diferentes tipos de divisiones funcionales en la estructura del cerebro, cada una con su propia compartimentación. Asimismo, para esta corriente de pensamiento, "un sistema complejo no está constituido únicamente por la suma de sus componentes, sino también por las intrincadas relaciones entre estos componentes. Al dividir un sistema, el método analítico destruye lo que busca entender" (Cilliers, 1998).

La Teoría General de Sistemas (TGS), desarrollada por Bertalanffy, contribuye a la transformación del pensamiento del modernismo al del postmodernismo (o de la complejidad) al definir a un sistema como la agregación de elementos interconectados: el sistema completo está compuesto por partes, por lo que debe entenderse y estudiarse reduciéndolo a sus partes. El todo es una colección que es la suma de los elementos. Así, la TGS puede considerarse como una teoría constitutiva que se entiende como holismo limitado (Davidson, 1983).

El pensamiento mecanicista se basa en las siguientes tres ideas: i) el universo es comprensible, ii) el método analítico es la única forma de investigación; y iii) todo en el mundo puede explicarse mediante la causalidad (Johnson, 1997). Asimismo, este pensamiento modernista se fundamenta en cuatro aspectos: a) continuidad o atributo inquebrantable; b) certeza, que conduce al determinismo; c) separabilidad, reduccionismo y la teoría constitutiva que llevan a la negación de la conexión entre las cosas y la integridad de los sistemas; y d) predictibilidad estricta, negación de la aleatoriedad y contingencia, y negación de la emergencia y generación de las cosas.

Por otro lado, el pensamiento de la complejidad sostiene que diferentes entidades interactúan y se conectan. La interacción y la conexión son no lineales y no deterministas causales. Los sistemas son abiertos, tienen la propiedad de autoorganización y autogeneración. Estas cuatro propiedades se resumen como: no continuidad, incertidumbre, inseparabilidad e imprevisibilidad.

En su libro *Complejidad y Posmodernismo*, Cilliers (1998) desarrolla el modelo conexionista a través de los estudios de la complejidad y explica la característica de redes de sistemas complejos utilizando ejemplos como el cerebro y el lenguaje, entre otros. Estas redes son distribuidas, autoorganizadas y operan con información local sin control central. Los elementos de las redes son no lineales, asimétricos y no tienen un significado atomístico ni determinismo.

La visión natural y el pensamiento mecanicista de Newton sentaron las bases del mecanismo y el reduccionismo; en cambio, la teoría de la relatividad, la física cuántica y la teoría de la complejidad dieron lugar a los conceptos de autoorganización y emergencia. El desarrollo de las

ciencias de la complejidad ofrece una nueva imagen del mundo basada en el holismo: los cambios en las cosas son inciertos y existen interacciones y conexiones en ellas; las cosas están en constante transformación, generación y desaparición.

El proceso generativo no es la descomposición o reorganización de los elementos de las estructuras materiales, sino la emergencia, autoorganización y generación de nuevas cosas (Holland, 1995, 1998), a lo que llamamos teoría generativa que nos ha conducido al pensamiento de la posmodernidad o pensamiento de sistemas.

En el libro *Pensamiento de Sistemas, Práctica de Sistemas*, Checkland (1981) señala que el pensamiento de sistemas se basa en dos pares de ideas, los de emergencia y jerarquía, y comunicación y control. Los dos pares de ideas se expresaron como dos paraguas, lo que indicaba que podían abarcar todos los campos de investigación de los estudios de sistemas en ese momento.

El pensamiento de sistemas es un nuevo paradigma de investigación que se desarrolla a partir de la insuficiencia e incapacidad del método reductivo para resolver los problemas relacionados con la complejidad. Por lo tanto, las ideas y conceptos básicos del pensamiento de sistemas avanzan de acuerdo con el desarrollo del movimiento de la ciencia de sistemas. El movimiento de sistemas ha experimentado cuatro olas en el siglo XX.

La primera ola se originó en el debate sobre la naturaleza de la vida entre el vitalismo y el mecanicismo. El mecanicismo sostenía que el organismo vivo no era más que una máquina complicada que podía explicarse completamente mediante las opiniones y teorías de la mecánica, la física y la química, mientras que el vitalismo sostenía que la vida no era un fenómeno físico y químico común, y que su formación presentaba una especie de entelequia desconocida y misteriosa que funcionaba de manera oculta. En este debate surgió un punto intermedio, que propuso que el organismo vivo era una emergencia con respecto a la física y la química lo que significaba que el todo no era la suma de sus partes. Como resultado, surgió la evolución por emergencia. A principios del siglo XX, algunos científicos y filósofos (Alexander, 1920; Broad, 1925; Morgan, 1927; Smuts, 1962) desarrollaron la idea de emergencia y el concepto de jerarquía.

La segunda ola del movimiento de sistemas fue la investigación interdisciplinaria que surgió después de la Segunda Guerra Mundial con la TGS y la Cibernética como base teórica y la ayuda de la teoría de la información, la investigación de operaciones, el análisis de sistemas y algunas disciplinas aplicadas, cuyos precursores incluyen a von Bertalanffy (1973), Wiener (1948) y Ashby (1956). Von Bertalanffy propuso el concepto de sistema abierto en 1940 y el concepto de sistema general en 1943 y estableció el modelo matemático para expresar sistemas generales en 1945. Una subclase de sistemas generales en las décadas de 1940 y 1950 es la creciente investigación de la cibernética general, que fue mucho más influyente que la TGS de Bertalanffy. En cuanto a la investigación transdisciplinaria, la Cibernética logró mucho en el estudio de la ciencia del control y la comunicación en los animales y las máquinas (Wiener, 1948).

La tercera ola fue el desarrollo de la teoría de la autoorganización en la década de 1970, cuya primera contribución importante provino de Prigogine, destacando el papel de la lejanía del equi-

librio en la autoorganización de los sistemas y proponiendo la teoría de las estructuras disipativas; en esta última teoría se incluyeron ideas como el desequilibrio como fuente de orden, el orden a través de la fluctuación o cambio y la interacción no lineal del desarrollo local a global. También se desarrolló el concepto de la sinergética de Haken y la teoría del superciclo de Eigen. Las teorías de la autoorganización se integran para formar una teoría general universal aplicada en la investigación de las ciencias sociales que llevó a la teoría de los sistemas complejos.

La cuarta ola fue el surgimiento de la ciencia de los sistemas complejos en la década de 1980 con la teoría del caos y la ciencia de la complejidad en el Instituto Santa Fe (Estados Unidos). Las ciencias de la vida se habían convertido en la disciplina dominante en las ciencias naturales, y la sociedad humana global y el sistema ecológico global fueron sistemas complejos de interés público. Por ende, surgieron estudios de los sistemas adaptativos complejos y nuevos conceptos como emergencia, caos, algoritmo genético y autómata celular acompañados de nuevos métodos matemáticos y de cómputo como las teorías físicas de la dinámica no lineal (por ejemplo, la geometría fractal) y la simulación por computadora basada en agentes múltiples.

En suma, cada movimiento de sistemas proporcionó al pensamiento de sistemas nuevos conceptos y principios. La primera ola produjo el primer paraguas: emergencia y jerarquía; la segunda, el segundo paraguas: comunicación y control; la tercera, el concepto de autoorganización y; la cuarta, el concepto de evolución adaptativa (patrón de pensamiento posmoderno).

El estudio de los sistemas complejos, bajo el marco del pensamiento de sistemas, persigue hallar propiedades comunes (cualidades/cantidades) y leyes generales del funcionamiento y evolución de los sistemas complejos, incluyendo a los sistemas vivos, sistemas humanos-sociales y el sistema ecológico global, para formar un nuevo paradigma de ciencia y pensamiento para resolver diversos problemas graves que enfrenta la humanidad en la actualidad.

4.3. Sistemas complejos

Los Sistemas complejos constan de un gran número de componentes que interactúan entre sí; estas interacciones dan lugar a estructuras jerárquicas emergentes. Los componentes del sistema y las propiedades a nivel de sistema suelen cambiar con el tiempo. Un sistema complejo es inherentemente abierto y sus límites, a menudo, son una cuestión de convención.

Las interacciones entre los numerosos componentes de un sistema complejo suelen ser tan fuertes que las correlaciones no pueden ser despreciadas, por lo tanto, cuando sumamos las contribuciones de las partes individuales, es posible que no tengamos el teorema del límite central que garantice que las cantidades macroscópicas estén distribuidas de manera normal o gaussiana. En lugar de distribuciones pico con un promedio bien definido y momentos más altos, típicamente hallamos distribuciones de colas pesadas, que a menudo se extienden tan lejos que ni siquiera existe un promedio. Cuando esto sucede, una descripción en términos de lo típico o del

escenario promedio, no es posible. Esto hace que no solo las fluctuaciones (cambios) del sistema sean significativas, sino que la descripción y comprensión de estas fluctuaciones sean absolutamente esenciales.

La materia en el universo está organizada en una estructura jerárquica; en la base tenemos partículas elementales como los átomos y moléculas, de los cuales obtenemos macromoléculas como proteínas y ADN, que son los bloques de construcción de organelos; juntos forman las células. A partir de las células obtenemos órganos, que al unirse forman organismos: animales y plantas de una gran variedad de especies. Un nivel de estructura emerge del nivel inferior. El concepto de emergencia, por el cual los patrones de posibilidad surgen a través de interacciones no lineales de agentes a lo largo del espacio o del tiempo, acepta que incluso con las mismas condiciones iniciales sea posible que el mismo patrón no se repita necesariamente.

La naturaleza jerárquica de los sistemas complejos puede implicar comportamientos distintos a diferentes escalas de tiempo o espacio, por lo que puede ser inapropiado asumir que los parámetros estadísticos en todas las escalas estudiadas se comporten de forma estacionaria. Los componentes jerárquicos emergentes cambian su estado interno con el tiempo. La fuerte interacción entre los componentes, por sí mismos, sin una evolución temporal interna, evita que el conjunto colectivo de componentes alcance un equilibrio o un estado estacionario asintótico. En tales casos, es necesario comprender cómo describir y predecir el comportamiento de un sistema que está en una transición para todas las escalas de espacio o tiempo relevantes.

De acuerdo con Sornette (2009), el estudio de la dinámica lejos del equilibrio (transiciones de fase) y de sistemas heterogéneos ha popularizado en la física el concepto de sistema complejo y la importancia del pensamiento de sistemas: los sistemas con un gran número de partes que interactúan mutuamente, a menudo abiertos a su entorno, autoorganizan su estructura interna y su dinámica con propiedades macroscópicas (emergentes) novedosas y a veces sorprendentes. El enfoque de sistemas complejos, que implica observar las interconexiones y relaciones, es decir, la imagen completa, así como las partes individuales, se ha vuelto omnipresente en el control moderno de dispositivos de ingeniería y la gestión empresarial. También desempeña un papel más trascendente en la mayoría de las disciplinas científicas, incluyendo a la biología (redes biológicas, ecología, evolución, origen de la vida, inmunología, neurobiología, biología molecular, etc.), la geología (tectónica de placas, terremotos y volcanes, erosión y paisajes, clima y tiempo, medio ambiente, etc.), la economía y las ciencias sociales (cognición, aprendizaje distribuido, agentes que interactúan, etc.).

Una propiedad central de un sistema complejo es la posible ocurrencia de comportamientos colectivos a gran escala coherentes con una estructura muy rica, resultado de las interacciones no lineales repetidas entre sus componentes: el conjunto resulta ser mucho más que la suma de sus partes. La mayoría de los sistemas complejos que nos rodean muestran transiciones raras y repentinas que ocurren en intervalos de tiempo, que son cortos en comparación con las escalas de tiempo características de su evolución previa. Estos eventos extremos expresan más que cualquier otra cosa las fuerzas subyacentes generalmente ocultas por un equilibrio casi perfecto y, por lo tanto, brindan el potencial para una mejor comprensión científica de los sistemas complejos.

Estas crisis tienen impactos fundamentales en la sociedad y abarcan desde grandes catástrofes naturales como terremotos, erupciones volcánicas, huracanes y tornados, deslizamientos de tierra, avalanchas, hasta eventos catastróficos de degradación ambiental, fallas en estructuras de ingeniería, caídas en el mercado de valores, agitación social que lleva a huelgas y disturbios a gran escala, desplomes económicos a nivel nacional y global, enfermedades y epidemias, etc. (Sornette, 2009).

Dada la dinámica compleja de estos sistemas, un primer intento es cuantificar y clasificar sus características y los posibles regímenes; este intento consiste en: i) identificar eventos discretos, ii) medir sus tamaños y iii) construir su distribución de probabilidad (Sornette, 2009).

Las distribuciones de probabilidad suelen considerarse como las primeras características cuantitativas de los sistemas complejos, lo que permite detectar la posible ocurrencia de regularidades que proporcionan un paso hacia la definición de una clasificación de los diferentes niveles de organización (clases de universalidad).

El interés en las distribuciones de probabilidad en los sistemas complejos se debe a que su forma matemática puede proporcionar restricciones y pautas para identificar los mecanismos subyacentes en su origen y, por consiguiente, en el origen del comportamiento de estos sistemas. Esta comprensión mejorada puede conducir a una mayor habilidad para pronosticar los probables estados futuros de los sistemas complejos (Satinover & Sornette, 2007).

4.4. Distribuciones de colas pesadas y escalamiento dinámico

Sea X un proceso cuyo resultado sea un número real. La función de densidad de probabilidad $P(x)$ de X (función de distribución de probabilidad) es tal que la probabilidad de que X esté en el intervalo Δx alrededor de x es $P(x)\Delta x$. La probabilidad de que X esté entre a y b se calcula mediante la integral de $P(x)$ desde a hasta b:

$$\mathcal{P}(a < X < b) = \int_a^b P(x)\mathrm{d}x. \quad (1)$$

Si los datos son escasos, el número de eventos en cada intervalo se vuelve pequeño y puede fluctuar implicando una representación deficiente de los datos. Por ende, se construye la distribución acumulativa $\mathcal{P} \leq (x)$:

$$\mathcal{P} \leq (X) = \mathcal{P}(X \leq x) = \int_{-\infty}^{x} P(y)\mathrm{d}y, \quad (2)$$

que es mucho menos sensible a las fluctuaciones. $\mathcal{P} \leq (x)$ representa la fracción de eventos con valores menores o iguales a x. $\mathcal{P} \leq (x)$ aumenta monótonamente con x desde 0 hasta 1.

En la caracterización de los sistemas complejos, dos distribuciones han sido relevantes: la distribución normal (o gaussiana) y la distribución de ley de potencia. La primera es el paradigma de la familia "suave" de distribuciones y la segunda es representativa de la familia "brusca" (Sornette, 2009).

La distribución normal. La función de densidad de probabilidad normal de una variable aleatoria x, con media x_0 y desviación estándar σ, se expresa como:

$$P_G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right) \text{ definida para } -\infty < x < +\infty . \quad (3)$$

Muchas mediciones de fenómenos físicos y sociales pueden aproximarse bien mediante la distribución normal debido a que maximiza la entropía de la información entre todas las distribuciones con media y varianza conocidas. En la teoría de probabilidad, la distribución normal estándar surge como la distribución límite de una gran clase de distribuciones de variables aleatorias caracterizadas por una varianza finita, lo cual es la afirmación del teorema del límite central.

La distribución de ley de potencia. Una función de distribución de probabilidad $P(x)$ que exhibe un comportamiento de ley de potencia en las colas se expresa como:

$$P(x) \propto \frac{C_\mu}{x^{1+\mu}}, \text{ para valores grandes de } x. \quad (4)$$

Para $\mu < 2$ se tiene una "cola pesada" cuya varianza teóricamente no está definida. Para una distribución de ley de potencia, el factor de escala C_μ es análogo a la varianza en las distribuciones normales. Asimismo, para una distribución de colas pesadas el factor de escala de la distribución de la suma de variables aleatorias independientes, cada una con una distribución que exhibe una cola de ley de potencia con el mismo exponente μ, es igual a la suma de los factores de escala que caracterizan cada distribución de cada variable aleatoria en la suma.

Las leyes de potencia obedecen a la simetría de la invarianza de escala, es decir, verifican la siguiente propiedad: para un número real arbitrario λ, existe un número real γ tal que:

$$P(x) = \gamma P(\lambda x) \text{ para todo } x, \text{ y con } \gamma = \lambda^{1+\mu}. \quad (5)$$

La ecuación (5) establece que la proporción de las probabilidades de ocurrencia de dos tamaños x_1 y x_2 depende sólo de su proporción x_1 / x_2 y no de sus valores absolutos. Por ejemplo, según la ley de Zipf ($\mu = 1$) para la distribución de tamaños de ciudades, la proporción del número de ciudades con más de un millón de habitantes a las que tienen más de 100,000 habitantes es la misma que la proporción del número de ciudades con más de 100,000 habitantes a las que tienen más de 10,000 habitantes, ambas proporciones siendo iguales a 1/10. El concepto de la simetría de invarianza de escala (5) se extiende al espacio de funciones que caracterizan a los objetos geométricos fractales.

Antes de construir la función de distribución acumulativa complementaria y la función de densidad, se recomienda explorar visualmente la representación gráfica de las distribuciones de densidad en (i) coordenadas lineales-lineales, (ii) coordenadas logarítmicas-lineales (abscisa li-

neal y ordenada logarítmica) y (iii) coordenadas logarítmicas-logarítmicas. Una distribución de ley de potencia aparecerá como una curva convexa en los gráficos lineales-lineales y logarítmicas-lineales, y como una línea recta en el gráfico logarítmicas- logarítmicas. Una distribución normal aparecerá como una curva en forma de campana en el gráfico lineal-lineal, como una parábola invertida en el gráfico logarítmicas-lineal y como una curva fuertemente cóncava y descendente en el gráfico logarítmicas-logarítmicas. Una distribución exponencial aparecerá como una curva convexa en el gráfico lineal-lineal, como una línea recta en el gráfico logarítmicas-lineal y como una curva cóncava en el gráfico logarítmicas-logarítmicas. Las desviaciones de la linealidad en el gráfico logarítmicas-logarítmicas sugieren los límites (puntos críticos) dentro de los cuales se mantiene el régimen de ley de potencia (Sornette, 2009).

4.5. Leyes de potencia y comportamiento de escalamiento

Las funciones de distribución de probabilidad con una dependencia de ley de potencia, en términos de eventos o tamaños de objetos, parecen ser características estadísticas ubicuas de sistemas naturales y sociales. Tal observación se basa en un mecanismo subyacente de autoorganización, y, por lo tanto, las leyes de potencia deben considerarse como las huellas estadísticas de los sistemas complejos. La observación de una relación de ley de potencia en los datos a menudo apunta a mecanismos específicos en su origen que suelen sugerir una conexión profunda con otros sistemas aparentemente no relacionados. En los sistemas complejos, la aparición de distribuciones de ley de potencia comúnmente se considera la manifestación de jerarquía y robustez (durante las últimas tres décadas) para terremotos, cambios climáticos, erupciones solares, registros fósiles y muchos otros sistemas, resaltando a la criticidad autoorganizada como un mecanismo subyacente para la organización de sistemas complejos (Bak, 1996).

El estudio de fenómenos críticos en la física estadística sugiere que las leyes de potencia emergen cerca de puntos críticos o bifurcaciones especiales que separan dos fases o regímenes diferentes del sistema. En sistemas en equilibrio termodinámico Wilson (1979) demostró la existencia de universalidad, de modo que diversos sistemas exhiben los mismos exponentes críticos y un comportamiento de escala idéntico a medida que se acercan a la criticidad, es decir, comparten las mismas propiedades macroscópicas fundamentales. De hecho, casi todas las transiciones de fase de materiales se describen mediante un pequeño conjunto de clases de universalidad.

Desde esta perspectiva, las leyes de potencia caracterizan las muchas escalas coexistentes y delicadamente interactivas en un punto crítico. La existencia de muchas escalas que conducen a propiedades geométricas complejas a menudo se asocia con fractales (Mandelbrot, 1982). Los puntos críticos y los fractales comparten relaciones de ley de potencia (Stauffer & Aharony, 1994).

La criticidad autoorganizada se refiere a la organización espontánea de un sistema impulsado desde el exterior hacia un estado global estacionario, que se caracteriza por distribuciones autosimilares de tamaños de eventos y propiedades geométricas fractales. Este estado estacionario es dinámico y se caracteriza por fluctuaciones estadísticas que genéricamente se denominan "avalanchas".

El término autoorganización crítica contiene dos partes. La palabra "crítica" se refiere al estado de un sistema en un punto crítico en el que la longitud de correlación y la susceptibilidad se vuelven infinitas en el límite de tamaño infinito. La etiqueta "autoorganizada" se aplica a la formación de patrones entre muchos elementos interactivos. Estructuración, patrones y organización a gran escala aparecen espontáneamente. La noción de autoorganización se refiere a la ausencia de parámetros de control.

Cuanto más aprendemos sobre sistemas complejos lejos del equilibrio, más entendemos que el concepto de "universalidad", desarrollado para fenómenos críticos en equilibrio, debe ampliarse para abarcar un significado más cualitativo: los exponentes críticos que definen las clases de universalidad son muy sensibles a muchos (pero no a todos) los detalles de los modelos (Gabrielov et al., 1994).

Una de las características destacadas de la criticidad autoorganizada es la existencia de distribuciones de ley de potencia de "avalanchas" (Bak, 1996; Jensen, 2000) y el escalado es la característica de la universalidad (Fisher, 1967). Se estudia a un sistema complejo para determinar si éste despliega escalamiento y, de ser así, si las características del comportamiento de escalamiento sugieren que pertenece a una cierta clase de universalidad. La hipótesis de universalidad permite extender el poder predictivo de un modelo simple a situaciones más realistas y clases enteras de procesos estocásticos.

Las series de datos generadas por sistemas complejos muestran fluctuaciones en una amplia gama de escalas de tiempo y/o distribuciones de los valores. En situaciones de equilibrio y no equilibrio, a menudo se encuentra que las fluctuaciones naturales siguen una relación de escalamiento en varios órdenes de magnitud. Tales leyes de escalamiento permiten caracterizar los datos y el sistema generador mediante exponentes de escalamiento fractal, que pueden ser huellas características de los sistemas, en comparación con otros sistemas y modelos. El comportamiento de escalamiento fractal se ha observado en muchas series de tiempo en física experimental, geofísica, medicina, fisiología y ciencias sociales. La caracterización fractal se puede utilizar para simular datos, modelar series de tiempo y derivar predicciones sobre eventos extremos o comportamientos futuros. Sin embargo, la aplicación principal sigue siendo la caracterización de diferentes estados o fases del sistema complejo en función del comportamiento de escalamiento observado.

La caracterización y comprensión de sistemas complejos es una tarea difícil, ya que no se pueden dividir en subsistemas más simples sin afectar las propiedades dinámicas. Un enfoque para estudiar dichos sistemas es el registro de series de tiempo de varias variables seleccionadas (observables) que reflejen el estado del sistema en una representación dimensional reducida. En los sistemas complejos los componentes periódicos suelen extenderse sobre un amplio espectro y se encuentran fluctuaciones en muchas escalas de tiempo, así como distribuciones de los valores. A menudo no se puede observar un límite de frecuencia inferior específico, o una escala de tiempo característica superior. En estos casos, la dinámica se puede caracterizar mediante leyes de escalamiento que son válidas en un amplio (posiblemente ilimitado) rango de escalas de tiempo o frecuencias; al menos en órdenes de magnitud. Esta dinámica o comportamiento suele denominarse "fractal".

Si se encuentra que un sistema complejo está caracterizado por exponentes de escalamiento particulares, esto ayudará a obtener predicciones sobre el comportamiento futuro del sistema y su reacción a perturbaciones externas o cambios en las condiciones límite. Las transiciones de fase en el comportamiento de regulación de un sistema complejo a menudo se asocian con cambios en su dinámica fractal, lo que permite la detección de tales transiciones (o los estados correspondientes) mediante análisis fractales. Un ejemplo es el sistema cardiovascular humano, donde se ha demostrado que la fractalidad de las series de tiempo de intervalos entre latidos del corazón refleja ciertos trastornos cardíacos y etapas del sueño (Peng et al., 1993; Bunde et al., 2000).

Si se aplican métodos estadísticos convencionales para el análisis de series de tiempo que representan la dinámica de un sistema complejo existen dos problemas principales: (i) el número de series de datos y sus duraciones (longitudes) suelen ser muy limitados, lo que dificulta extraer información significativa sobre la dinámica del sistema de manera confiable; y (ii) si se extiende la longitud de los datos mediante técnicas de registro basadas en computadora o datos históricos (aproximaciones), las no estacionariedades en las señales tienden a superponerse a las propiedades intrínsecas de fluctuación y al ruido de medición. Las no estacionariedades son causadas por efectos externos o internos que conducen a cambios continuos o repentinos en los valores promedio, desviaciones estándar o mecanismos de regulación.

4.6. Persistencia, correlaciones de corto y largo plazo

Además de la distribución de ley de potencia, otro indicador estadístico importante en el estudio de los sistemas complejos es el análisis de correlación. Detectar la invarianza de escala (autosimilitud) y sus relaciones fundamentales con las estructuras estadísticas es uno de los problemas más relevantes en el análisis de correlación.

En la teoría de probabilidad y estadística, una correlación mide la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias. Una correlación refleja la desviación de dos o más variables de la independencia mutua, aunque la correlación no implica causalidad. Hay algunos cuantificadores que miden el grado de correlación adaptados a la naturaleza de los datos. En las últimas tres décadas se ha prestado más atención al estudio de los efectos de memoria estadística en procesos aleatorios que se originan en la naturaleza a través de la física estadística lejos del equilibrio. El papel de la memoria tiene sus raíces en las ciencias naturales desde 1906, cuando Markov escribió su primer artículo sobre la teoría de Procesos Aleatorios de Markov (Markov, 1906). Su teoría se basa en la noción de una pérdida instantánea de memoria de la prehistoria (propiedad sin memoria) de los procesos aleatorios. En contraste, hay una abundancia de fenómenos y procesos físicos que pueden caracterizarse por efectos de memoria estadística (correlaciones de largo alcance o plazo): crecimiento de interfaces, clima, fisiología y mercados financieros.

Considerando los incrementos $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ de una serie de datos, (x_i), $i = 1, \dots, N$ con N valores medidos equidistantemente en el tiempo, se encuentra que los Δx_i pueden ser persistentes (correlaciones positivas), independientes (caminata aleatoria o no correlacionadas) o antiper-

sistentes (correlaciones negativas). Los incrementos persistentes y antipersistentes, donde es probable que un incremento positivo sea seguido por otro incremento positivo o negativo, respectivamente, también conducen a series integradas persistentes, $\sum_{j=1}^{i} \Delta x_j$ (Kantelhardt, 2009).

Para datos estacionarios con media y desviación estándar constantes, la función de autocovarianza de los incrementos,

$$C(s) = \left(\Delta_{x_i} \Delta_{x_{i+s}}\right) = \frac{1}{N-s} \sum_{i=1}^{N-s} \Delta_{x_i} \Delta_{x_{i+s}}, \quad (6)$$

puede estudiarse para determinar el grado de persistencia. Si $C(s)$ se divide por la varianza $\langle (\Delta x_i)^2 \rangle$, se convierte en la "función de autocorrelación". Si los Δx_i no están correlacionados, $C(s)$ es cero para $s > 0$. Las correlaciones de corto plazo de los incrementos Δx_i suelen describirse mediante una $C(s)$ que decae exponencialmente,

$$C(s) \sim \exp(-s/t_\times), \quad (7)$$

con un tiempo característico de decrecimiento $t_\times$. Este comportamiento es típico para incrementos generados por un proceso autorregresivo

$$\Delta x_i = c \Delta x_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (8)$$

donde c es una constante y ε_i es una variable aleatoria independiente.

Por otro lado, si los incrementos Δx_i muestran correlaciones de largo plazo, la función de autocovarianza no decrecerá rápidamente y puede seguir una relación de ley de potencia,

$$\Delta x_i = c \Delta x_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (9)$$

con desplazamientos ε_i no correlacionados al azar y $c = \exp(-1/t_\times)$ (Kantelhardt, 2009).

La Figura 1a (panel superior) (Kantelhardt, 2009) muestra la función de autocorrelación para una configuración de un proceso autorregresivo con $t_\times = 48$.

Para las llamadas "correlaciones de largo plazo", $\int_0^\infty C(s)\, ds$ diverge en el límite de series infinitamente extensas ($N \to \infty$). En la práctica, esto significa que $t_\times$ no se puede definir porque crece con el aumento de N. Por ejemplo, $C(s)$ disminuye siguiendo una ley de potencia

$$C(s) \propto s^{-\gamma}, \quad (10)$$

con el exponente de correlación $0 < \gamma < 1$. La Figura 1b (panel inferior) (Kantelhardt, 2009) muestra $C(s)$ para una configuración con $\gamma = 0.4$. El comportamiento correlacionado de largo plazo, es decir, persistente, de los Δx_i conduce a un comportamiento de escalamiento autoafín de los x_i, caracterizado por $H = 1 - \gamma/2$.

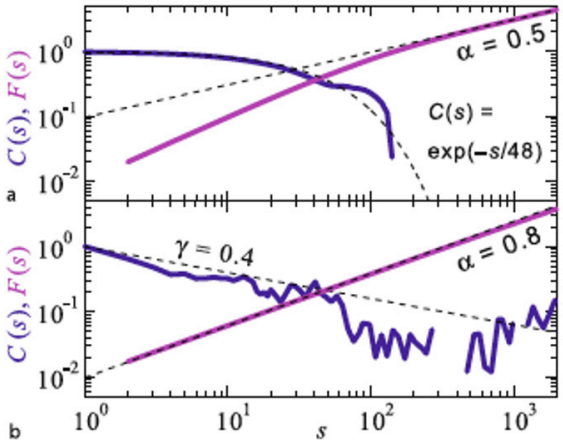


Figura 1. Comparación de las funciones de autocorrelación $C(s)$ (funciones decrecientes) y las funciones de fluctuación $F_2(s)$ (funciones crecientes) para datos con correlación de corto plazo (panel superior) y datos con correlación de largo plazo ($\gamma = 0.4$, panel inferior)

NOTA: La pendiente asintótica $H \approx \alpha = 0.5$ de $F_2(s)$ indica claramente la falta de correlaciones de largo plazo, mientras que $H \approx \alpha = 1 - \gamma/2 > 0.5$ indica correlaciones de largo plazo. La diferencia es mucho más difícil de observar en $C(s)$, , donde las fluctuaciones estadísticas y los valores negativos comienzan a ocurrir por encima de $s \approx 100$. Las líneas discontinuas indican las curvas teóricas.

Según Kantelhardt (2009), un *crossover* (punto de cambio) en una ley de escalamiento donde se aplica un exponente de escalamiento para pequeños parámetros de escala y otro exponente de escalamiento para parámetros de escala grandes; el centro del crossover se denota mediante su parámetro de escala característico s_x.

Los incrementos con correlación de corto plazo Δx_i caracterizados por un tiempo de decrecimiento de correlación característico finito $t_\times$ conducen a un crossover en el comportamiento de escalamiento de la serie integrada $x_i = \sum_{j=1}^{i} \Delta x_j$ (Figura 1a). Dado que la posición del crossover podría ser numéricamente diferente de $t_\times$, la denotamos como s_x. Las series de tiempos con un crossover no son autoafínes y no hay un único exponente de Hurst H que las caracterice. Mientras $H > 0.5$ en pequeñas escalas de tiempo (indicando correlaciones en los incrementos), el comportamiento asintótico (para escalas de tiempo grandes $s \gg t_\times$ y $\gg s_\times$) siempre se caracteriza por $H = 0.5$, ya que todas las correlaciones han decrecido. Muchos registros de sistemas complejos se caracterizan por correlaciones de corto plazo pronunciadas, además de correlaciones de largo plazo. Por ejemplo, existen correlaciones de corto plazo debido a situaciones climáticas particulares en datos de temperatura, y debido a efectos de la respiración en datos de frecuencia cardíaca. Los crossovers en el comportamiento de escalamiento de series de tiempo complejas también pueden ser causados por diferentes mecanismos de regulación en escalas de tiempo rápidas y lentas (Kantelhardt, 2009).

4.7. Fractales

Los fractales generalizan objetos geométricos euclidianos a dimensiones no enteras y nos permiten adentrarnos en el estudio de los sistemas complejos, desordenados y caóticos. En palabras de Mandelbrot (1982) "Las nubes no son esferas, las montañas no son conos, las líneas costeras no son círculos, la corteza no es lisa, ni los relámpagos viajan en línea recta".

Los fractales se refieren a objetos geométricos y a cualquier tipo de fenómeno que posea escalabilidad y exhiba simetría de dilatación o invarianza de escala, a menudo caracterizada por la aparición de una distribución de ley de potencia. Fenómenos fractales de este tipo encuentran aplicaciones en diversos campos de interés, como finanzas y economía, geología, análisis de secuencias de ADN, biología e incluso en integrales de trayectoria en la teoría cuántica del espacio-tiempo.

Los sistemas de invarianza de escala suelen caracterizarse por dimensiones no enteras ("fractales"). La noción de dimensiones no enteras y algunas propiedades básicas de objetos fractales se estudiaron hace mucho tiempo, desde el siglo pasado, por Georg Cantor, Giuseppe Peano y David Hilbert, y a principios de este siglo por Helge von Koch, Waclaw Sierpinski, Gaston Julia y Felix Hausdorff. Incluso antes se pueden encontrar rastros de este concepto en el estudio de promedios aritmético-geométricos por Carl Friedrich Gauss hace más de 200 años, y en la obra de Albrecht Dürer hace más de 500 años. Georg Friedrich Lichtenberg descubrió hace más de 250 años patrones de descarga fractal. Mandelbrot (1982) desarrolló la idea de la geometría fractal para unificar una serie de estudios anteriores sobre formas irregulares y procesos naturales. Mandelbrot se centró en un conjunto particular de objetos y formas, aquellos que son autosimilares, es decir, donde una parte del objeto es idéntica a una parte más grande. Los llamó "fractales" y notó la sorprendente omnipresencia de formas autosimilares en la naturaleza.

La geometría fractal es una herramienta matemática para tratar con sistemas complejos que no tienen una escala característica. Un ejemplo es la forma de una línea costera, que es invariante ante la escala o, equivalentemente, no tiene una escala característica. Asimismo, al observar un registro diario, mensual o anual del precio de algún activo financiero, no se puede notar la diferencia todos parecen iguales (Bunde et al., 2000).

Es bien sabido que en los sistemas regulares (con densidad uniforme) como alambres largos, placas delgadas grandes o cubos grandes llenos, la dimensión d caracteriza cómo cambia la masa $M(L)$ con el tamaño lineal L del sistema. Si consideramos una parte más pequeña del sistema de tamaño lineal bL ($b < 1$), entonces $M(bL)$ se reduce por un factor de b^d, es decir:

$$M(bL) = b^d M(L). \tag{11}$$

La solución de la ecuación funcional (11) es simplemente $M(L) = AL^{d_f}$. Para el alambre largo la masa cambia linealmente con b, es decir, d=1. Para las placas delgadas obtenemos d=2, y para los cubos d=3 (Figura 2 [Bunde et al., 2000]).

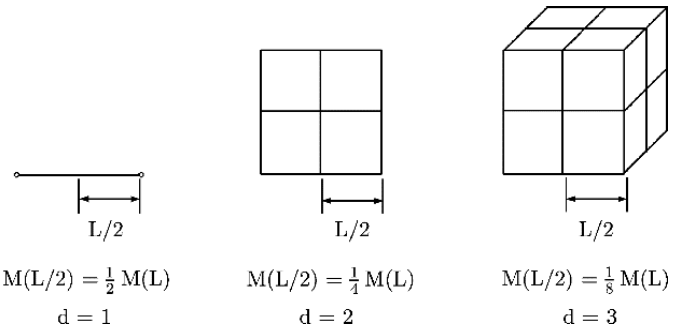


Figura 2. Ejemplos de sistemas regulares con dimensiones $d = 1$, $d = 2$ y $d = 3$

Fuente: Bunde et al. (2000).

Los fractales determinísticos se generan de manera iterativa y determinística, mientras que los fractales aleatorios se generan mediante un proceso estocástico. Aunque las estructuras fractales en la naturaleza son aleatorias, es útil estudiar fractales determinísticos donde las propiedades fractales se pueden determinar con precisión. Al estudiar fractales determinísticos, uno también puede obtener una comprensión de las propiedades de los fractales aleatorios.

4.7.1. Fractales Determinísticos

Hablamos de fractales determinísticos cuando cortamos un pequeño trozo de un fractal y lo ampliamos isotrópicamente al tamaño del original, y tanto el original como el de la ampliación se ven iguales. Al ampliar isotrópicamente hemos re-escalado los ejes *x*, *y* y *z* y por el mismo factor.

La **Curva de Koch**. La Figura 3 muestra las primeras $n = 4$ iteraciones de la curva de Koch. En cada iteración, la longitud de la curva se incrementa en un factor de 4/3. El fractal matemático se define en el límite de iteraciones infinitas, $n \to \infty$, donde la longitud total de la curva se acerca a infinito.

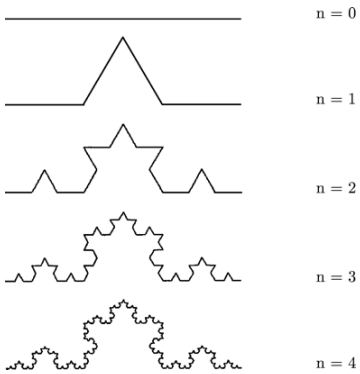


Figura 3. La dimensión fractal de la curva de Koch es $d_f = \log 4/\log 3$

Fuente: Bunde et al. (2000).

La dimensión de la curva se puede obtener de la misma manera que para objetos regulares. A partir de la Figura 3 notamos que si disminuimos el tamaño lineal por un factor de $b = 1/3$, la longitud total (masa) de la curva disminuye por un factor de 1/4, es decir,

$$M\left(\frac{1}{3}L\right) = \frac{1}{4}M(L) \tag{12}$$

Esta característica es muy diferente de las curvas regulares, donde la longitud del objeto disminuye de manera proporcional a la escala lineal. Para satisfacer las ecuaciones (11) y (12) se ha introducido una dimensión no entera que satisface $1/4 = (1/3)^d$; es decir: $d = \log 4/\log 3$. Para dimensiones no enteras como esta, Mandelbrot acuñó el nombre de 'dimensión fractal', y los objetos descritos por una dimensión fractal se llaman 'fractales'. Así, para incluir estructuras fractales, la ecuación (11) se generaliza como:

$$M(L) = AL^{d_\mathrm{f}} \tag{13}$$

y

$$M(bL) = b^{d_f}M(L), \tag{14}$$

donde d_f es la dimensión fractal.

Al generar la curva de Koch y calcular d_f observamos la propiedad de los fractales: 'autosimilitud' o 'invarianza de escala', que es la característica básica de todos los fractales determinísticos y aleatorios: si tomamos una parte de un fractal y la ampliamos por el mismo factor de ampliación en todas las direcciones, la imagen ampliada no se puede distinguir del original. En la curva de Koch hay un objeto central en la figura que recuerda a un muñeco de nieve. A la derecha e izquierda de ese muñeco de nieve central hay otros dos muñecos de nieve, cada uno siendo una reproducción exacta, solo que más pequeña por un factor de 1/3. Cada uno de los muñecos de nieve más pequeños tiene copias aún más pequeñas (en 1/3) de sí mismos a la derecha y a la izquierda, etc. Ahora, si tomamos cualquier conjunto de tres muñecos de nieve (que consiste en $1/3^m$ de la curva) para cualquier valor de m, y lo ampliamos por 3^m, obtendremos exactamente la curva de Koch original.

4.7.2. Fractales autoafínes

Existen sistemas que son invariantes sólo bajo magnificaciones 'anisotrópicas', estos sistemas se llaman 'autoafínes' (Mandelbrot, 1982). Un modelo simple de un fractal autoafín se muestra en la Figura 4. La estructura es invariante bajo la magnificación anisotrópica $x \to 4x$, $y \to 2y$. Si tomamos una pequeña parte de la imagen original (en el límite de $n \to \infty$ iteraciones) y redimensionamos el eje x por un factor de cuatro y el eje y por un factor de dos, obtendremos exactamente la estructura original.

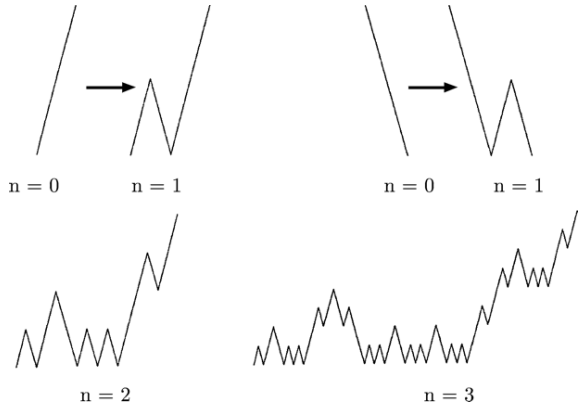


Figura 4. Un modelo determinista simple de un fractal autoafín

Fuente: Bunde et al. (2000).

En general, si una curva autoafín es invariante bajo la transformación $x \to bx$, $y \to ay$, tenemos:

$$F(bx) = aF(x) \equiv b^H F(x), \tag{15}$$

donde el exponente $H = \log a / \log b$ se llama el *exponente de Hurst* (Mandelbrot, 1982). La solución de la ecuación funcional (15) es simplemente $F(x) = Ax^H$. En el ejemplo de la Figura 4, $H = 1/2$, es decir, una estructura autoafín aleatoria. Las estructuras autoafines aleatorias se utilizan como modelos para superficies aleatorias, por ejemplo, interfaces de crecimiento en transiciones de fase.

Ejemplos de estructuras fractales autosimilares o autoafínes incluyen cúmulos de galaxias, el paisaje de cráteres de la luna, la distribución de terremotos y la estructura de líneas costeras, ríos, montañas y nubes.

Muchas plantas que crecen de manera natural muestran estructuras fractales, ejemplos van desde árboles y sus raíces hasta la coliflor y el brócoli. Los patrones de vasos sanguíneos en el cuerpo humano, el riñón, el pulmón y algunos tipos de células nerviosas tienen características fractales. En las ciencias de los materiales, los fractales aparecen en polímeros, geles, vidrios iónicos, agregados, electrodeposición, interfaces y superficies rugosas, así como en sistemas de partículas finas (Kaye, 1989). En todas estas estructuras no existe una escala de longitud característica en el sistema, además de los límites físicos superiores e inferiores. La presencia de fractales autosimilares o autoafínes no se limita a estructuras en el espacio real.

En la siguiente sección se presenta un ejemplo para estudiar y caracterizar un sistema complejo desde el enfoque sistémico.

4.7.3. Fractales en los Mercados Financieros

Según Mandelbrot (2004), el concepto de fractal fue inspirado cuando estaba estudiando datos económicos; en ese momento encontró dos propiedades básicas en los datos de series de tiempo de los precios diarios del mercado de algodón de Nueva York (Mandelbrot, 1963):

a) Similitud geométrica entre un gráfico a gran escala y un gráfico ampliado.
b) Distribución de ley de potencia de cambios de precios en un intervalo de tiempo unitario, que es independiente de la escala de tiempo de la unidad.

Mandelbrot pensó que tal invarianza de escala, tanto en forma como en distribución, es una propiedad bastante general, no sólo en gráficos de precios sino también en la naturaleza en general. En la historia de la ciencia, es un evento raro que un concepto originalmente nacido en economía se haya difundido ampliamente en todas las áreas de la ciencia.

En las décadas de 1960, 1970 y 1980, en vez de un análisis científico serio de datos, se popularizaron los modelos matemáticos artificiales de precios de mercado basados en la teoría de la caminata aleatoria (movimiento browniano) bajo el nombre de Tecnología Financiera.

Las propiedades fractales de los precios de varios mercados se confirmaron con una gran cantidad de datos de mercado de alta frecuencia desde la década de 1990 (Mandelbrot, 2004; Takayasu & Inaoka, 1992; Takayasu, 2003) debido a la informatización de los mercados financieros en los que las órdenes de transacción son procesadas por computadoras y la información detallada se registra automáticamente. Hasta la década de 1980 muchas personas se reunían en un mercado y los precios, sin ser registrados, se determinaban mediante gritos. Ahora existen más de 100 proveedores de registros de datos de los mercados financieros en todo el mundo y el número de elementos transaccionados supera el millón; es decir, millones de precios en los mercados financieros cambian con una escala de tiempo en segundos, y cualquiera puede acceder a cualquier precio de mercado en tiempo real si tiene una terminal de proveedor financiero en su escritorio a través de la Internet.

A continuación, se presenta la caracterización fractal de los precios del petróleo crudo, así como su modelación y predicción, considerando al mercado petrolero como un sistema complejo.

4.7.4. Propiedades fractales del mercado de petróleo crudo

Muchas propiedades estadísticas de los mercados financieros ya han sido exploradas y han revelado similitudes sorprendentes entre la dinámica de la volatilidad de precios y el crecimiento de interfaces rugosas, que son superficies autoafínes con fluctuaciones de escala caracterizadas por la superficie intrínseca con ancho w_i (Figura 5). En consecuencia, los modelos físicos se han mostrado útiles para comprender la dinámica de los mercados financieros. Esto permitió a Balankin et al. (2004) utilizar el enfoque de escalamiento dinámico desarrollado para analizar el crecimiento de interfaces rugosas en el estudio de las propiedades fractales del mercado de petróleo crudo.

El mercado mundial del petróleo es un entorno intensivo en capital caracterizado por interacciones complejas derivadas de la amplia variedad de productos, problemas de transporte-almacenamiento y regulaciones medioambientales estrictas. El petróleo crudo es el producto agroindustrial más cotizado en el mundo, su mercado se caracteriza por niveles extremadamente altos de volatilidad de precios; la volatilidad (fluctuaciones) en su precio es causada por desequilibrios entre la oferta y la demanda que surgen de eventos como guerras, cambios en regímenes políticos, crisis económicas, rupturas en acuerdos comerciales, patrones climáticos inesperados, etc. Al mismo tiempo, muchos de los modelos de pronóstico de precios se basan en la creencia de que las series de precios históricos exhiben algunas propiedades estadísticas que permiten predecir movimientos futuros de precios.

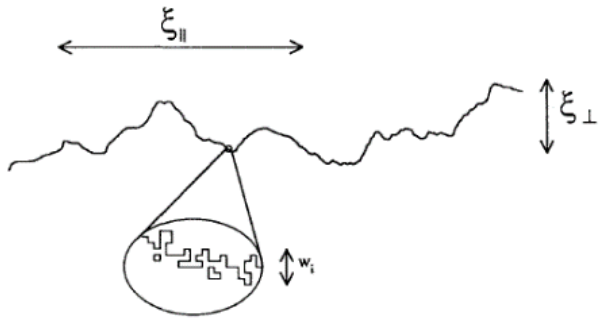


Figura 5. Estructura esquemática de una interfaz en crecimiento

NOTA: ξ_|| es la longitud de correlación que caracteriza la fluctuación de propagación en la dirección paralela al sustrato y $\xi_{\perp}$ en la dirección perpendicular al sustrato. El ancho intrínseco de la superficie w_i se indica en la parte ampliada.

Fuente: Kertész y Vicsek (1994).

4.8. Datos

Para cuantificar el escalamiento dinámico del mercado de petróleo crudo, Balankin et al. (2004) estudiaron los registros diarios de los precios spot $P(t)$ (Figura 6, inciso a) y la volatilidad de precios $V_n(t)$ (Figura 6, incisos b - d) del petróleo crudo West Texas Intermediate (WTI). Específicamente analizaron el precio en dólares estadounidenses constantes de 1983 durante el período 30 de diciembre de 1984 - 23 de junio de 2003, lo que representó 5,181 observaciones (excluyendo fines de semana y días festivos). Luego construyeron 699 series de tiempo de la volatilidad realizada, aplicando la siguiente ecuación:

$$V_n(\tau) = [\langle P^2(t)\rangle_n - \langle P(t)\rangle_n^2]^{1/2} \quad (16)$$

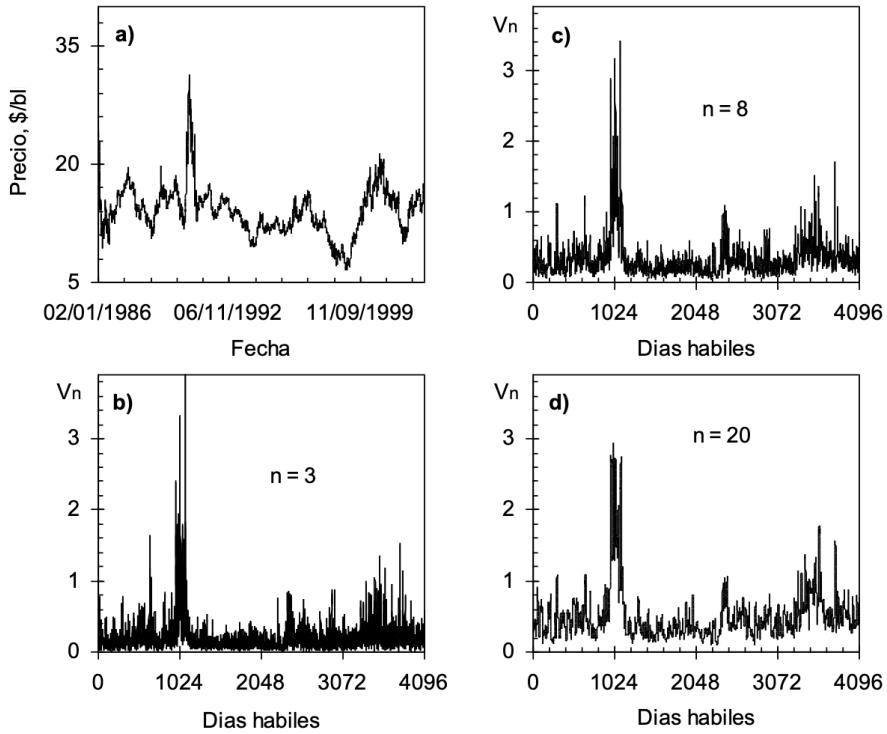


Figura 6. (a) Registros del precio spot del petróleo crudo West Texas Intermediate; y (b)–(d) volatilidades de precios realizadas

NOTA: Precios en dólares constantes de 1983 por barril ($/bbl). Volatilidades de precios para 4,096 días para: (b) $n = 3$, (c) $n = 8$, y (d) $n = 20$ días laborables.

Fuente: Balankin et al. (2004).

La longitud de los días laborables fue $T = 4096$ días (aproximadamente 16 años laborables) para diferentes horizontes de tiempo $n = 2,3,...,700$ (desde dos días laborables hasta aproximadamente tres años laborables), donde t es el tiempo laborable y $\langle \cdots \rangle_n$ denota el promedio de tiempo laborable dentro de una ventana de tamaño n. En este estudio, todos los registros de volatilidad (Figura 6, incisos b - d) corresponden al período 15 de octubre de 1986 - 23 de diciembre de 2002. La volatilidad de precios cambia de un día a otro, de tal manera que las series de tiempo de volatilidades realizadas a diferentes intervalos de tiempo n parecen similares.

4.9. Caracterización fractal

Para detectar y cuantificar el comportamiento de escalamiento dinámico de la volatilidad de precios en el marco de la dinámica de interfaces rugosas, Balankin et al. (2004) trataron el horizonte de volatilidad n como una variable análoga a la variable de tiempo (t), mientras que el tiempo la-

boral t se trató como una variable análoga a la extensión lateral (X) de la interface en crecimiento. En consecuencia, las fluctuaciones de volatilidad de precios $\sigma(\Delta, \tau)$ se caracterizaron de forma análoga a las fluctuaciones de altura de la interface, definidas como:

$$\sigma(n,\tau) = \langle [V_n(t) - \langle V_n(t)\rangle_\tau]^2 \rangle_R^{1/2} \propto \Phi\left(\tau^{H_n}, n^{\beta(\tau)}\right), \tag{17}$$

donde $\langle \cdots \rangle_\tau$ denota el promedio del tiempo laborable, dentro de una ventana de tamaño τ, $\langle \cdots \rangle_R$ denota el promedio sobre diferentes realizaciones, Φ es la función de escala y $\beta(\tau)$ es el exponente de crecimiento de la volatilidad.

Para caracterizar las propiedades fractales de las series de tiempo, dentro del marco del escalamiento dinámico (17), el exponente de crecimiento de la volatilidad $\beta(\tau)$ puede determinarse a partir del siguiente comportamiento de escalamiento para diferentes intervalos de tiempo laborable t:

$$\sigma(n,\Delta t) \propto n^{\beta(\tau)}, \tag{18}$$

Para corroborar las correlaciones en la escala del tiempo laborable ($t \leq T = 4\ 096$) se estudiaron las funciones de autocorrelación:

$$C(\tau) = \langle P(t+\tau)P(t)\rangle_T / \langle P^2(t)\rangle_T \tag{19}$$

y

$$C_n(\tau) = \langle V_n(t+\tau)V_n(t)\rangle_T / \langle {V_n}^2(t)\rangle_T, \tag{20}$$

donde los corchetes angulares denotan el promedio de tiempo. Los comportamientos de la función de correlación en $\tau \to 0$ y $\tau \to T \to \infty$ caracterizan la "memoria" estocástica de la serie de tiempo.

Para cuantificar la intensidad de las correlaciones a largo plazo, se determinaron los exponentes de escalamiento local (Hurst) de P(t), así como de cada registro de tiempo V_n(t), mediante cuatro métodos autoafínes: i) análisis del rango reescalado, ii) longitud de rugosidad, iii) variograma y iv) espectro de potencia.

Asimismo, Balankin et al. (2004) encontraron que la función de autocorrelación (Figura 7, inciso a) del registro de precios del petróleo crudo (Figura 6, inciso a) decae exponencialmente (cuadro pequeño de la Figura 7, inciso a) como $C \propto \exp(t/t_0)$, con un tiempo característico $\tau_0 = 120$ días laborables (aproximadamente medio año laborable). Además, los autores encontraron que el exponente de Hurst del registro de precios es $H = 0.50 + 0.02$ (Figura 7, incisos b–d).

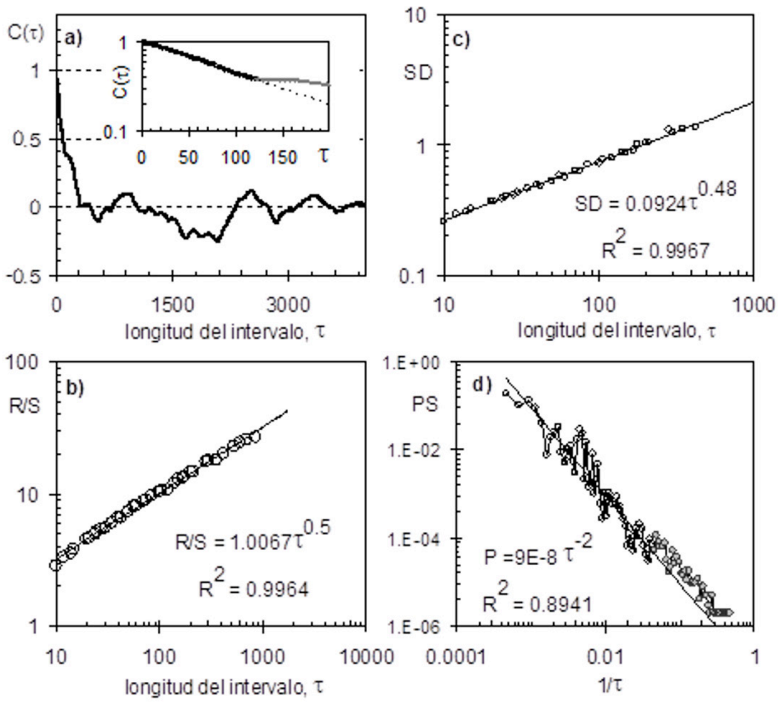


Figura 7. (a) Función de autocorrelación de registros de precios, y (b)–(d) gráficos fractales de registros de precios obtenidos diferentes métodos

NOTA: (a) El cuadro insertado muestra a $C(t)$ en coordenadas semilogarítmicas. (b)-(c) Gráficos fractales obtenidos por (b) el método del rango rescalado, (c) el método de la longitud de la rugosidad y (d) el método del espectro de potencia (longitud del intervalo de tiempo en días laborables).

Fuente: Balankin et al. (2004).

Lo anterior significa que no hay correlaciones a largo plazo en el registro de precios del petróleo crudo. Esto es consistente con el hallazgo de que la distribución de precios spot del petróleo crudo es una distribución logística simétrica (Figura 8, inciso a) que proporciona el mejor ajuste de los datos, según las pruebas estadísticas de χ^2, Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov.

Al mismo tiempo, las volatilidades realizadas (Figura 6, incisos b–d) poseen una invarianza de escala estadística dentro de amplios rangos de escala de tiempo laborable $[3 < \tau < \tau_C(n)]$ caracterizados por un exponente de Hurst bien definido, H_n, para cada horizonte n (Figura 8, incisos a–d):

$$H_n = 0.0621n, \qquad \text{cuando } n \leq 12 \tag{21}$$

$$H_n = 0.83 \pm 0.04, \qquad \text{cuando } n \geq 18 \tag{22}$$

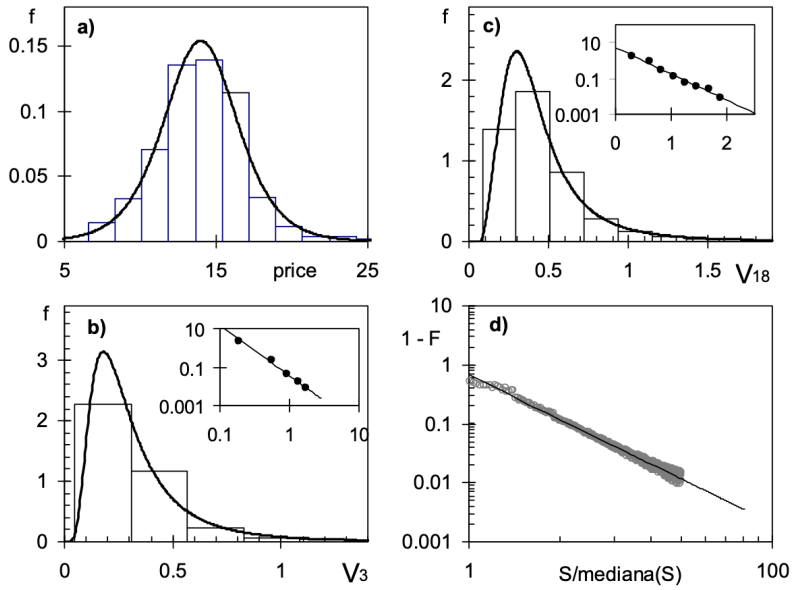


Figura 8. (a) Distribución de probabilidad condicional del precio del petróleo crudo. (b-d) Distribuciones de probabilidad condicional de la volatilidad de precios para: (b) $n = 3$, (c) $n = 18$ y (d) avalanchas normalizadas en coordenadas logarítmicas-logarítmicas

NOTA: (a) El precio del petróleo crudo es en dólares estadounidenses por barril (barras: datos experimentales, líneas sólidas: ajuste mediante la distribución logística). (b) Barras: datos experimentales, líneas sólidas ajuste mediante la distribución Pearson (25) (valor de $p = 0.41$). Cuadro insertado: la cola de la distribución en coordenadas semilogarítmicas. (c) Barras: datos experimentales, líneas sólidas: ajuste mediante la distribución log-logística (26) (valor de $p = 0.38$). Cuadro insertado: la cola de la distribución en coordenadas logarítmicas-logarítmicas]. (d) Círculos: datos experimentales, líneas sólidas: el gráfico de la ecuación (26). El coeficiente de correlación cuadrado entre los datos y la línea teórica es igual a $R^2 = 0.955$.

Fuente: Balankin et al. (2004).

Este hallazgo indica que las volatilidades realizadas a largo plazo ($n > 18$) son persistentes; es decir, los incrementos de volatilidad están positivamente correlacionados en el tiempo laborable, mientras que las volatilidades a corto plazo ($n < 18$) son antipersistentes; es decir, $V_{n<8}$ (t) muestra autocorrelaciones negativas en el tiempo laborable.

La transición de la volatilidad antipersistente a la persistente en $n = 8$ está acompañada de un cambio abrupto en el comportamiento de $\min_n\{V_n(T = 4096)\}$ en función de n (Figura 10); sin embargo, el promedio de tiempo y las desviaciones estándar de V_n(t) no muestran ninguna anomalía en $n = 8$ (Figura 10b). Específicamente, la volatilidad promedio en el tiempo se comporta

como $\langle V_n(\tau)\rangle_{\tau=4096} \propto n^{0.50}$ hasta $n = 700$, mientras que la desviación estándar de la volatilidad realizada se comporta como $\sigma(\tau = T = 4096) \propto n^{0.25}$ hasta $n = 18$, pero se escala como $\sigma \propto n^{0.50}$ cuando la volatilidad realizada se caracteriza por $H = 0.83 \pm 0.04$ (constante).

Además, el exponente de crecimiento se comporta como $\beta = 0.25\tau_C/\tau$ si $\tau < \tau_C(n)$ y $\beta = 0.25$ si $\tau > \tau_C(n)$, cuando $n < 18$, mientras que $\beta = 0.5$ para cualquier τ, cuando $n > 18$ (Figura 9, incisos a y c).

El intervalo de correlaciones τ_C en la escala de tiempo laborable aumenta con el horizonte de volatilidad como $\tau_C \propto n^{z(n,\tau)}$, donde el exponente dinámico es una función de n y τ si $n < 18$, mientras que $z = H/b = 1.66$ para grandes horizontes, $n \geq 18$ (Figura 9d).

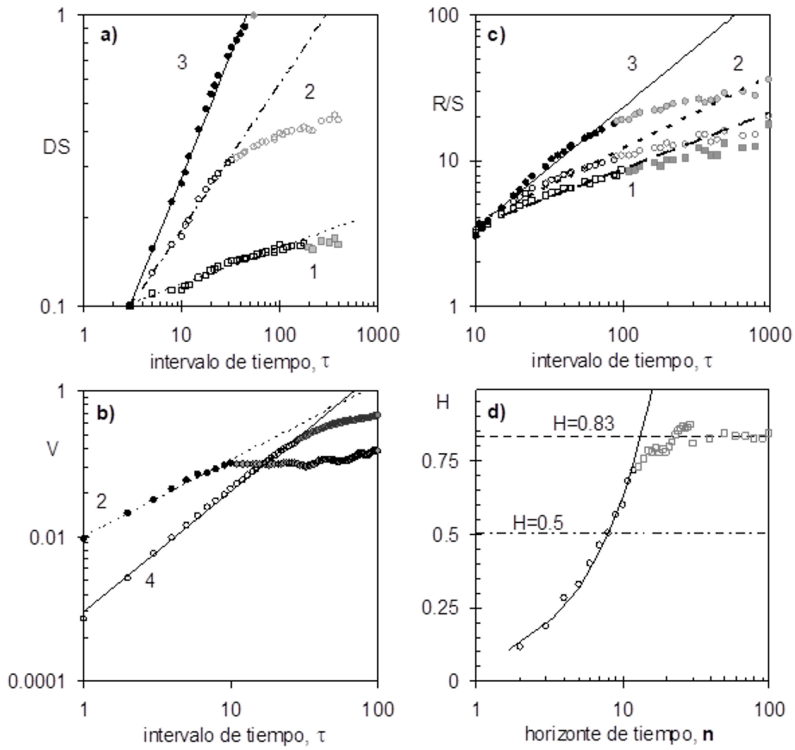


Figura 9. (a)-(c) Gráficas fractales de registros de volatilidad de precios [figuras 6b-6c]. (d) Dependencia del horizonte del exponente de Hurst

NOTA: (a)-(c) Gráficas fractales obtenidas mediante (a) el método de longitud de rugosidad, (b) el variograma y (c) el método de rango rescalado [los números corresponden a diferentes horizontes: (1) corresponde a $n = 3$, (2) corresponde a $n = 8$, (3) corresponde a $n = 20$ y (4) corresponde a $n = 60$ días hábiles]. (d) Los valores de H_n se promedian a través de los cinco métodos. La gráfica se generó en coordenadas semilogarítmicas [escala de tiempo en días hábiles, círculos y cuadrados: datos experimentales, línea sólida: ajuste de datos mediante la ecuación (20), R^2=0.9882].

Fuente: Balankin et al. (2004).

De acuerdo con lo anterior, se encontró que la volatilidad a largo plazo ($n > 18$) satisface el escalamiento dinámico de Family-Viscek:

$$\sigma(\Delta, t) \propto t^{\beta} f[\Delta/\xi^{z}(t)], \tag{23}$$

donde $\xi(t) \propto t^{1/z}$ es la longitud de correlación de la escala 'espacial' y la función de escalamiento se comporta como $f(y) \propto y^{H}$, si $y \ll 1$, o $f(y) \approx 1$, si $y \gg 1$; aquí, H es el exponente de Hurst o de rugosidad; z es el exponente dinámico y $\beta = H/z$ es el exponente de crecimiento. El exponente de Hurst indica si el comportamiento del sistema es aleatorio ($H = 0.5$) o muestra persistencia ($0.5 < H < 1$) o antipersistencia ($0\ H < 0.5$).

Por otro lado, para horizontes de tiempo menores a 18 días hábiles, la volatilidad del precio del petróleo crudo satisface la ley de escalamiento dinámico generalizada de la siguiente manera:

$$\sigma(n, \tau) \propto F''\left[(\tau)^{H(n)}, n^{\beta(\tau)}\right] \tag{24}$$

con exponentes de escalamiento que varían continuamente (21) y $n < 18$.

El crossover, o transición de un comportamiento antipersistente a otro persistente, indica la existencia de una escala de horizonte intrínseca de volatilidad de precios $n_C \approx 8$.

Para horizontes de tiempo pequeños, $n < 8$, la probabilidad condicional de volatilidad realizada se ajusta mejor a la distribución Pearson de colas ligeras (Figura 8, inciso b):

$$f(V_n) = \frac{(V_n - \phi)^{-(\gamma+1)}}{\rho^{-\gamma}\Gamma(\gamma)} \exp\left(\frac{V_n - \phi}{\rho}\right) \tag{25}$$

con parámetros dependientes del horizonte $\gamma = 3.60 \pm 0.10$, $(R^2 = 0.950)$ y $\phi = 0.13n^{-0.69}$ $(R^2 = 0.97)$, donde $\Gamma(\gamma)$ es la función gamma.

Para horizontes de tiempo más grandes, $n > 8$, la probabilidad condicional de volatilidad realizada sigue la distribución log-logística (Figura 8, inciso c); es decir, una distribución de ley de potencia:

$$f(V_n) = \frac{\gamma[(V_n - \phi)/\rho]^{\gamma-1}}{\rho\{1+[(V_n-\phi)/\rho]^{\gamma}\}^2} \tag{26}$$

donde $\gamma = 2.55 \pm 0.07$, $\rho = 0.104n^{0.38}$ $(R^2 = 0.998)$ y $\phi = 0.008n^{0.74}$ $(R^2 = 0.996)$; es decir, la distribución de volatilidad a largo plazo tiene colas gruesas, pero está fuera del rango estable de Lévy, $0 < \gamma < 2$. $\rho = 0.48n^{0.34}$.

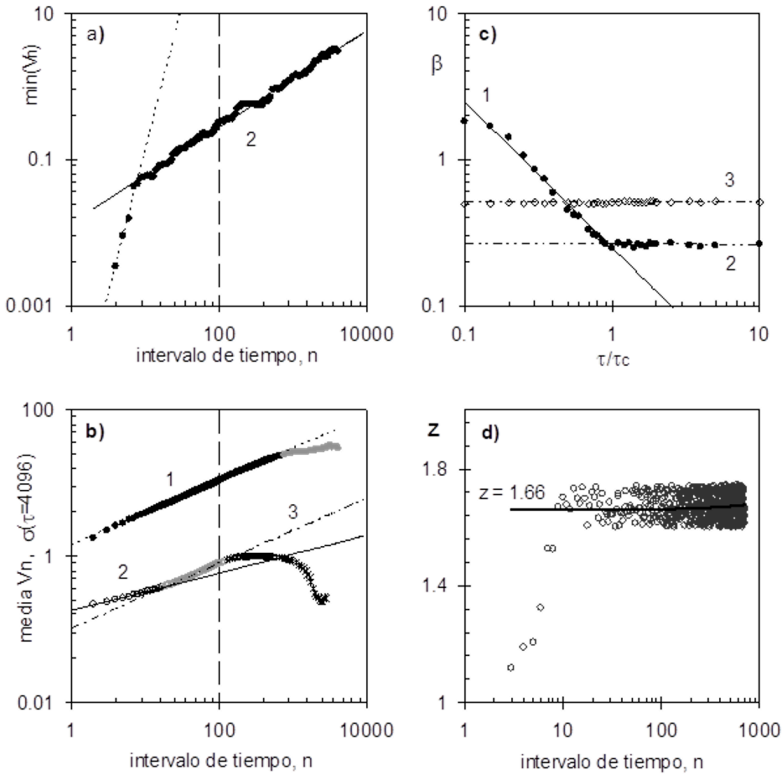


Figura 10. Gráficas fractales de la volatilidad del precio del petróleo crudo. (a) El mínimo de la volatilidad realizada frente al horizonte de tiempo. (b) Media (1) y desviación estándar (2,3) de la volatilidad realizada $(t = 4096)$ frente al rezago temporal, n. (c) El exponente de crecimiento de la volatilidad β frente al intervalo de tiempo normalizado para horizontes de volatilidad $n = 3$ (1,2) and $n = 60$ (3). (d) Dependencia del horizonte de tiempo del exponente dinámico para la volatilidad del precio

NOTA: (a) Puntos: datos experimentales. Líneas: ajustes de ley de potencia (1) $\min(V_n) = 10^{-5}n^{3.95}$, $R^2 = 0.970$ y (2) $\min(V_n) = 0.014n^{0.66}$, $R^2 = 0.993$. (b) Puntos: datos experimentales. Líneas: ajustes de ley de potencia. (1) $\langle V_n(\tau = 4096)\rangle = 1.5n^{0.50}$, $R^2 = 0.999$, (2) $\sigma\{V_n(\tau = 4096)\} = 0.18n^{0.26}$, $R^2 = 0.995$, y (3) $\sigma\{V_n(\tau = 4096)\} = 0.10n^{0.45}$, $R^2 = 0.998$; las etiquetas del eje y indican la cantidad. (c) Puntos: resultados del análisis. Líneas: ajuste cuando $n < 18$ and $\beta = 0.50$ para cualquier τ, cuando $n > 18$. (d) Escala de tiempo en días laborables.

Fuente: Balankin et al. (2004).

Por último, Balankin et al. (2004) encontraron que la distribución estadística de las avalanchas también se ajusta mejor a la distribución log-logística con $p = 0.48$, $\phi = 0$, $\rho = 0.75n^{-0.68}$ y $\gamma = 1.46 \pm 0.02$, obedeciendo una cola de ley de potencia (Figura 9d):

$$F \propto 1 - \{Q/\text{median}[Q(\tau)]\}^{-1.46} \tag{27}$$

con el exponente de escalamiento γ dentro del rango estable de Lévy. Esto indica que el comportamiento observado en la volatilidad del precio del petróleo crudo se puede interpretar en términos de avalanchas sin escala, que definen la escala de horizonte intrínseca y generan correlaciones a largo plazo en la volatilidad de precios.

4.10. Pronósticos de precios del petróleo crudo WTI

Es factible predecir los probables estados de un sistema complejo con base en las series de tiempo de fluctuaciones del sistema que desplieguen alguna dependencia o correlación a largo plazo (Morales, 2004). A partir del comportamiento observado en la volatilidad histórica de los precios del petróleo crudo, Morales (2004) determinó dos parámetros estadísticos cuando las series de tiempo alcanzan un estado estacionario: (i) el promedio global del exponente de Hurst, $H_{|\delta(\tau)|} = 0.38$, y (ii) el rango de $|\delta(\tau = 15)| = 0.48$.

Para generar escenarios probabilísticos del precio del petróleo crudo WTI, Morales (2004) construyó aleatoriamente 300 series de tiempo (o trazas autoafínes) de rendimientos logarítmicos con la ayuda del software BENOIT 1.3, a partir de: $H = 0.38$, 225 puntos en cada traza y rango del conjunto de 0.48 y durante 15 días laborables (tres semanas naturales). Entonces, el horizonte de predicción fue enero 2004 - noviembre 2016; es decir, 3,375 días laborables (225 datos*15 días) o 12.9 años naturales (Figura 11).

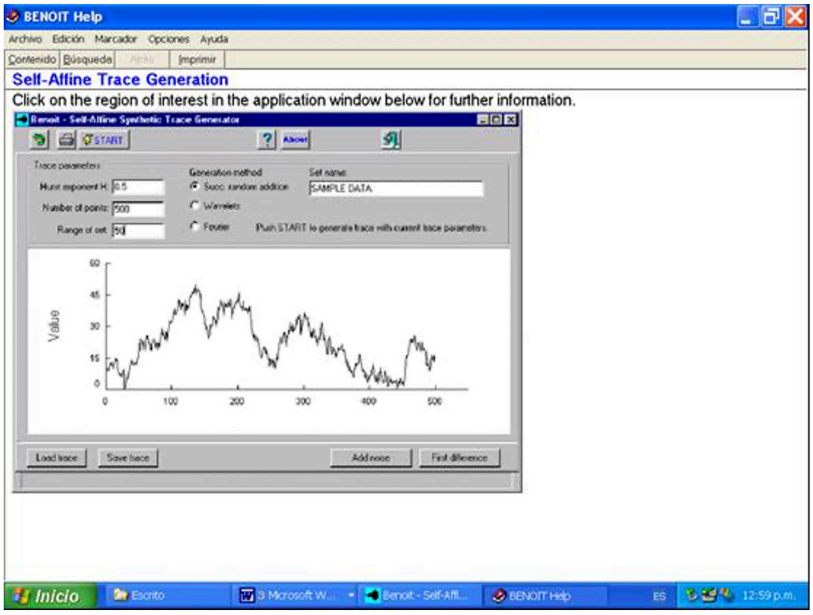


Figura 11. Ventana del software Benoit 1.3 para crear 300 trazas autoafínes de rendimientos logarítmicos

Fuente: Morales (2004).

Los 225 datos de cada traza son los valores de una variable idéntica e independientemente distribuida, por lo que al primer dato de cada traza se le asignó el signo positivo, al segundo el signo negativo, al tercero el signo positivo, al cuarto el signo negativo; así sucesivamente, hasta que al dato 225 se le asignó el signo contrario al del dato 224; esto con el propósito de considerar la tendencia (alcista o bajista) del precio del mercado petrolero.

Después se calcularon, para cada traza, los 225 precios promedio del petróleo cada 15 días laborables con base en los 225 datos de $\delta(\tau)$ con sus respectivos signos positivos y negativos, aplicando la ecuación $\delta(\tau) = \ln P(t)/\ln P(t-\tau)$. Por tanto, el valor del precio $P(t)$ se calculó así:

$$P(t) = P(t-\tau) * e^{\delta(\tau)} \tag{28}$$

El primer valor de $P(t-\tau)$ considerado para calcular los 225 $P(t)$ fue 16.69 $/bl, por ser el precio promedio de los últimos 15 días laborales de diciembre de 2003. Se dividió cada serie de tiempo (o traza) en dos subseries: una subserie con datos de signo positivo (113 datos) y la otra con los datos de signo negativo (112 datos) para tener 300 series tiempo de precios promedio con tendencia alcista y otras 300 series con tendencia descendente. Se calculó el valor máximo global y el valor mínimo global para cada punto; estos 225 valores máximos y 225 valores mínimos representaban, respectivamente, los precios más altos y los más bajos del petróleo crudo para escenarios con guerras, desastres naturales y recesiones económicas. Para las 300 subseries con signo positivo y 300 con signo negativo, se determinó su promedio global; 112 promedios representaban el valor máximo y los otros 112 el valor mínimo que podría alcanzar el precio promedio del petróleo crudo en un escenario de estabilidad. El promedio del valor máximo y el valor mínimo, en cada punto proyectado representaba el valor más probable de ocurrir.

Después se generaron los precios promedio mensuales futuros (enero 2004 - noviembre 2016) y los precios promedio mensuales históricos (enero 1986 - diciembre 2003) a dólares constantes de 2003, para comparar los precios promedio mensuales de Morales (2004) con los generados por consultoras y por Petróleos Mexicanos (PEMEX).

La Figura 12 muestra los precios promedio mensuales pronosticados del petróleo crudo, incluyendo escenarios con desequilibrios provocados por movimientos sociales y naturales (curvas de valores máximos y valores mínimos), así como un escenario de precios bajo condiciones de estabilidad (curva más gruesa). Era más probable que perturbaciones externas dispararan los precios del petróleo crudo hacia arriba (hasta 95 $/bl), aunque el escenario más probable era que los precios del petróleo se mantuvieran prácticamente entre los 30 y los 32.5 $/bl).

La Figura 13 muestra el escenario de pronósticos de los precios del petróleo crudo en condiciones de estabilidad (escenario más probable), base para que Morales (2004) comparara sus pronósticos de precios mensuales del petróleo crudo WTI con los pronósticos de cinco empresas consultoras (E(1): Purvin & Gertz NGL Market Outlook, E(2): Global Insight Inc., E(3): Petroleum Industry Research ASS , E(4): EIA y E(5): Pace Global Energy Services) y de PEMEX.

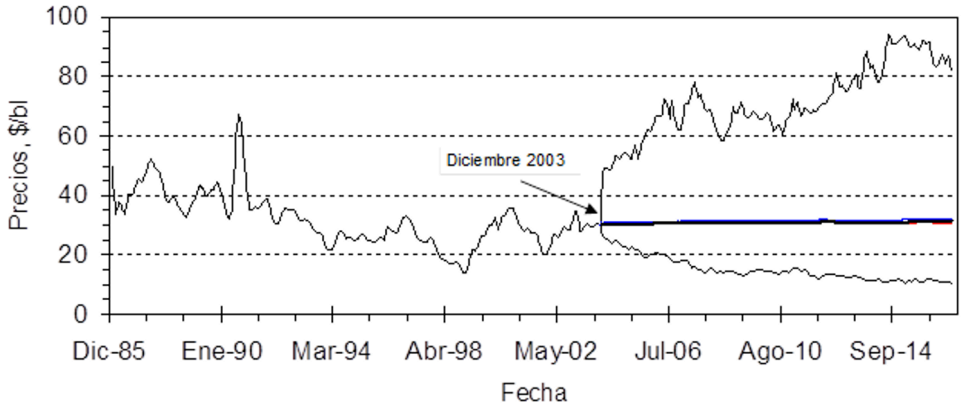


Figura 12. Precios promedio mensuales históricos y pronósticos de precios promedio mensuales del petróleo crudo WTI a dólares constantes de 2003

Fuente: Morales (2004).

La Figura 14 muestra las curvas de los pronósticos de los precios mensuales del petróleo crudo WTI. Las consultoras y PEMEX pronosticaban una baja en los precios del petróleo crudo WTI en los tres primeros años, y a partir del año 2008 una subida de éstos, pero siempre manteniéndose dentro de la banda de la OPEP: 22–28 $/bl. Los pronósticos de precios de Morales (2004) fueron los más altos, promediando 30.82 $/bl.

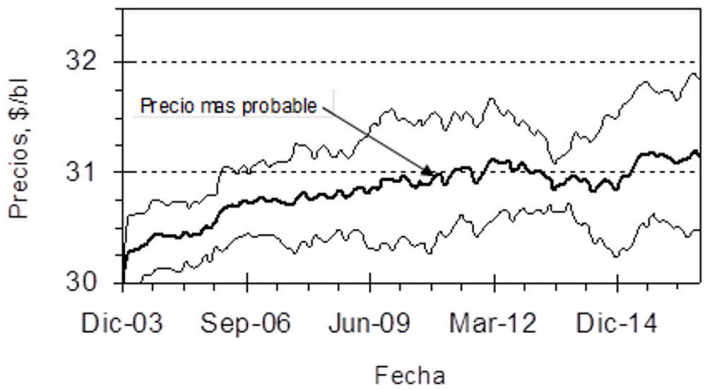


Figura 13. Precios promedio mensuales pronosticados del petróleo crudo WTI (a dólares constantes de 2003) en condiciones de estabilidad

Fuente: Morales (2004).

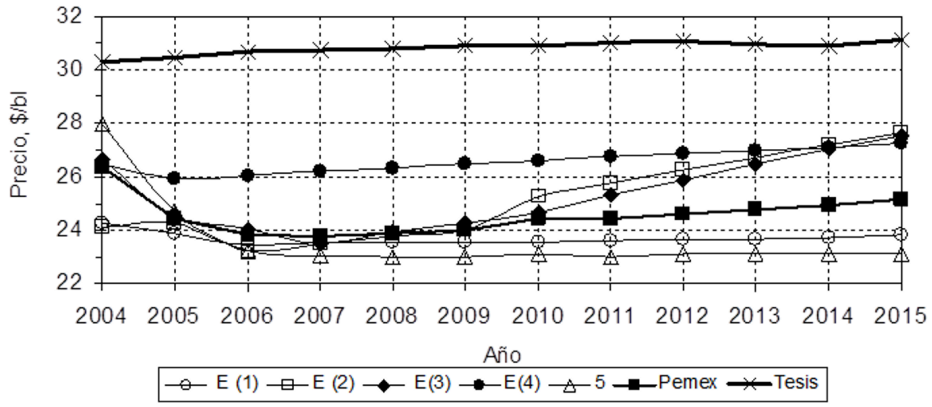


Figura 14. Pronósticos de precios mensuales del petróleo crudo WTI de cinco consultoras, de PEMEX y de Morales (2024): 2004 – 2015 (dólares constantes 2003)

Fuente: Morales (2024).

En la realidad, el escenario que se dio fue el de la subida del precio del petróleo crudo WTI hasta los 100 dólares por barril; es decir, el escenario de precio máximo generado por Morales (2004). Esto dio lugar a que el trabajo de Morales (2004) ganara el XX Premio Nacional de Investigación Financiera, otorgado por el Instituto Mexicano de Ejecutivos de Finanzas en 2004.

4.11. Conclusiones

En este capítulo se expusieron brevemente los dos patrones de pensamiento para abordar el estudio de la complejidad: modernismo (mecanicista) y posmodernismo (pensamiento de sistemas). La forma principal del primero es el mecanismo que acompaña a la ciencia moderna, mientras que para el segundo se han desarrollado métodos pluralistas y colaborativos transdisciplinarios.

El estudio de sistemas complejos en un marco unificado se ha reconocido recientemente como una nueva disciplina científica, la última de los campos transdisciplinarios y que surge de una síntesis de conceptos desarrollados en la teoría de sistemas, la cibernética, los modelos de autoorganización, las matemáticas no lineales (incluyendo a la geometría fractal) y las ciencias cognitivas.

Por lo tanto, en esta investigación se adoptó el enfoque del pensamiento de sistemas para mostrar que es posible estudiar y caracterizar el comportamiento de los mercados de productos agroindustriales (en este caso, el petróleo crudo WTI) como sistemas complejos.

Balankin et al. (2004) demostraron que las series de tiempo de la volatilidad de precios del petróleo crudo pueden analizarse dentro de un marco de rugosidad cinética de interfaces en movimiento tratando a la longitud de la serie de manera análoga a la variable espacial y al horizonte de volatilidad de forma análoga a la variable temporal, hallando que estas series de tiempo poseen propiedades fractales: un comportamiento de escalamiento dinámico de Family-Viscek, comúnmente utilizado para describir y modelar el crecimiento de interfaces rugosas. Asimismo, los autores observaron una transición de un comportamiento antipersistente a otro persistente de la volatilidad en el tiempo, acompañada por un cambio en el tipo de distribución estadística de la volatilidad (de colas ligeras para horizontes cortos y de colas de ley de potencia para horizontes largos); se espera observar esta transición de un comportamiento antipersistente a otro persistente en una amplia variedad de mercados de productos agroindustriales que desplieguen escalamiento dinámico generalizado.

La existencia de un mecanismo "universal" que propicie la transición de un comportamiento antipersistente a otro persistente, en diversos mercados de productos agroindustriales, puede dar lugar a la construcción de un modelo de descripción y predicción de precios de diversos productos agroindustriales. Dicho mecanismo universal podría sustentarse en el hallazgo de que las series de tiempo de fluctuaciones de precios despliegan: a) distribuciones de leyes de potencias, b) escalamientos dinámicos y c) correlaciones a largo plazo, todas ellas propiedades fractales.

Finalmente, el estudio de la complejidad no puede llevarse a cabo sólo desde una perspectiva cuantitativa o sólo desde una cualitativa, sino más bien desde el pensamiento de sistemas; es decir, desde una síntesis dialéctica entre métodos cuantitativos y métodos cualitativos, con el fin de comprender no sólo los fenómenos, sino también de estar en condiciones de transformar su realidad. Por ejemplo, el poder predecir de manera más confiable y precisa el precio del petróleo crudo WTI (marcador) no sólo posibilitará pronosticar mejor el precio de la mezcla mexicana (por tener una correlación directa con el WTI), sino que permitirá al gobierno federal de México generar un presupuesto federal anual más apegado a la realidad y, con ello, evitar recortes presupuestales drásticos que afecten al gasto social y a las inversiones en infraestructura.

4.12. Referencias

Alexander, A. (1920). *Space, Time, and Deity*. (Vol. 2). Macmillan.

Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics*. Chapman and Hall.

Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-organized Criticality*. Copernicus.

Balankin, A. S., Morales, M. O., Galvez, M. E., & Perez, A. A. (2004). Crossover from antipersistent to persistent behavior in time series possessing the generalized dynamic scaling law. *Physical Review E*, 69, 036121.

Broad, C. D. (1925). *The Mind and Its Place in Nature*. Routledge & Kegan Paul.

BENOIT 1.3 http://www.scioncorp.com.

Bunde, A., Havlin, S., Kantelhardt, J. W., Penzel, T., Peter, J. H., & Voigt, K. (2000). Correlated and uncorrelated regions in heart-rate fluctuations during sleep. *Physical review letters*, 85(17), 3736–3739. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3736.

Checkland, P. (1981). *Systems Thinking, Systems Practice*. Wiley, New York.

Cillers, P. (1998). *Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems*. Routledge.

Davidson, M. (1983). *Uncommon Sense: The Life and Thoughts of Ludwing von Bertalanffy*. Jeremy P. Tarcher, Inc.

Fisher, M. E. (1967). The Theory of equilibrium critical phenomena. *Reports on Progress in Physics, 30*, 615–730.

Gabrielov, A., Newman, W. I., & Knopoff, L. (1994). Lattice models of Fracture: Sensitivity to the Local Dynamics. *Physical Review E, 50*, 188–197.

Holland, J. H. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, Mass, Addison–Wesley.

Holland, J. H. (1998). *Emergence: From Chaos to Order*. Addison-Wesley Publishing Company Inc.

Kantelhardt, J. W. (2009). *Fractal and multifractal time series*. Encyclopedia of Complexity and Systems Science, Springer.

Kaye, B. H. (1994). *A Random Walk Through Fractal Dimensions*. Wiley.

Kertész, J., & Vicsek, T. (1994). Self-Affine Interfaces. In A. Bunde & S. Havlin (Eds.), *Fractals in Science*. Springer-Verlag.

Jensen, H. J. (2000). Self-Organized Criticality: Emergent Complex Behavior. In *Physical and Biological Systems*. Cambridge Lecture Notes in Physics, Cambridge University Press.

Johnson, L. (1997). *From Mechanistic to Social Systemic Thinking: A Digest of Talk by Russell L.*

Mandelbrot, B. B. (1963). The variation of certain speculative prices. *Journal of Business, 36*, 394–419.

Mandelbrot, B. B. (1982). *The fractal Geometry of Nature*. Freeman WH.

Mandelbrot, B. B. (2004). The (Mis)behavior of Markets. Basic Books.

Markov, A. A. (1906). Two-dimensional Brownian motion and harmonic functions. *Proceedings of the Physical and Mathematical Society of Kazan Imperial University, 15*(4):135–178.

Morales, M. O. (2004). *Modelos mecánicos de la dinámica fractal del mercado petrolero*. [Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional].

Morgan, C. L. (1927). *Emergent Evolution*. Williams and Norgate LTD.

Peng, C. K., Mietus, J., Hausdorff, J. M., Havlin, S., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1993). Long-range anti-correlations and non-Gaussian behaviour of the heartbeat. *Physical Review Letters, 70*, 1343.

Satinover, J. B., & Sornette, D. (2007). Illusion of Control in a Brownian Game. *Physica A, 386*, 339-344.

Sornette, D. (2009). *Probability Distributions in Complex Systems*. In Encyclopedia of Complexity and Systems Science, Springer.

Stauffer, D., & Aharony, A. (1994). *Introduction to Percolation Theory.* (2nd ed). Taylor & Francis.

Smuts, J. C. (1962). *Holism and Evolution*. Macmillan.

Takayasu, H., & Inaoka, H. (1992). New type of self-organized criticality in a model of erosion. *Physical Review Letters, 68*, 966–969.

Takayasu, H. (2003). *Application of Econophysics*. Springer.

von Bertalanffy, L. (1973). *General System Theory*. (2nd ed). George Braziller.

Wiener, N. (1948). *Cybernetics*. MIT Press.

Wilson, K. G. (1979). Problems in physics with many scales of length. *Scientific American, 241*,158–179.



5. Dinámica de Sistemas

Jacqueline Yvette Sánchez-García[1,2]*

5.1. Resumen

Las sociedades están en constante cambio y enfrentan una serie de problemas que cada vez se tornan más graves, tales como el calentamiento global, situación socioeconómica, sobreexplotación de recursos naturales, extinción de algunas especies, muchos de estos relacionados con la dinámica de los sistemas agrícolas. Las metodologías y técnicas de investigación fundamentadas en el pensamiento sistémico (enfoque interdisciplinar) son cada vez más utilizadas para abordar estos problemas, dado que buscan estudiar una problemática complejo de manera integrativa, pues además de comprender el problema en su contexto, precisan en la identificación de cómo las propiedades y el comportamiento del problema se relacionan con este contexto; es decir, se va más allá de la no linealidad. En consideración a la necesidad de implementar vías que permitan a los agrónomos, responsables políticos y agricultores comprender la dinámica de sus sistemas complejos, este capítulo precisa en la Dinámica de Sistemas orientada al diseño de modelos basados en el concepto de retroalimentación; es decir, un cambio en una variable afecta a otras a lo largo del tiempo, lo que su vez afecta la variable original y así sucesivamente; a fin de examinar con cambios y las tendencias de comportamiento para la totalidad denominada sistema. Se espera que este primer acercamiento a la Dinámica de Sistemas pueda ayudar a comprender cómo responden los sistemas a los cambios externos y a identificar estrategias de adaptación.

Palabras clave: stocks, flujos, sistemas agrícolas, comportamientos dinámicos, retroalimentación.

[1] Universidad Panamericana. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Álvaro del Portillo 49, Zapopan, Jalisco, 45010, México.

[2] Networks and Systems Thinking Research Group – NeST.

* Autor de correspondencia: jsanchezg@up.edu.mx

5.2. Introducción

La Dinámica de Sistemas (DS) fue desarrollada en la década de los 50's por el profesor Jay Forrester en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés) en la escuela de negocios (Forrester, 1989). El profesor Forrester propone cómo la estructura de realimentación de los sistemas complejos produce pautas o patrones de conducta y, con base en su comprensión, se pueden diseñar estrategias y trabajar para atender comportamientos indeseados o contraintuitivos (Forrester, 1989; Sterman, 2000). En este sentido, la DS constituye una herramienta que facilita la comprensión del comportamiento de las estructuras internas de las totalidades (sistemas) y los mecanismos que mantienen invariable una organización dinámica.

Esta base se puede comprender desde un sistema cotidiano, por ejemplo: un estudiante que se prepara para un examen a través de un método de estudio, procesos de producción de una granja, cooperativa o una red colaborativa, una empresa, entre algunos otros; al involucrarse con cualquiera de estos sistemas, se puede considerar que cualquier patrón de interacciones entre los componentes representa un factor limitante que produce un tipo de comportamiento concreto y no otro. Retomando el ejemplo del estudiante que se prepara para una evaluación podría tener diferentes resultados de acuerdo a la selección del método de estudio y los recursos utilizados (por ejemplo: diferentes parámetros de tiempo).

A partir de esta idea base se precisan algunos estudios que han abordado problemas sociales, comprendidos desde diversas áreas del conocimiento: la confianza y la lealtad (Martínez García & Martínez Caro, 2009), gestión sostenible de la cadena de suministro (Rebs et al., 2019), urbanización (Pejic Bach et al., 2019), contaminación (Mousavi et al., 2023; Vafa-Arani et al., 2014), emprendimiento (Bloodgood et al., 2015; Nofiani et al., 2021), políticas públicas (Ghaffarzadegan et al., 2010; Sing et al., 2019; Uriona & (Saartjie) Grobbelaar, 2019; Wang et al., 2022), agronomía (Esteso et al., 2023; Marandure et al., 2020; Turner et al., 2016). Estos estudios permiten considerar la versatilidad, flexibilidad y la perspectiva integrativa de la DS, que mantiene una forma estructurada de modelar y analizar sistemas dinámicos complejos.

El propósito de este capítulo es retomar las bases de la DS y comprender las estructuras empleadas en su desarrollo. Una vez el lector se familiarice con los conceptos, se precisa en el proceso de aplicación de DS, finalmente se facilita el planteamiento de sistemas mediante los diagramas de la DS que permiten incluir la información que se procesa en los límites de lo que se observe como sistema (Ricciardi et al., 2020). Esta cuestión de los límites adecuados del sistema, está relacionada o condicionada por el propósito concreto del sistema y es importante tener presente las relaciones que inciden significativamente al mismo. Además, como resultado de un ejercicio mental, el modelo de todo sistema será siempre la representación abstracta de lo que se percibe como mundo real (Stary, 2017). Por tanto, el lector no deberá olvidar que dicha representación debe ser complementada con información a fin de ofrecer respuestas más robustas.

5.3. Conceptos básicos de Dinámica de Sistemas

Como se precisó en la introducción, la DS es una forma de entender y modelizar sistemas complejos. Es una herramienta para estudiar cómo cambian e interactúan las cosas a lo largo del tiempo. A continuación se desglosa la base conceptual sobre la que las personas y las organizaciones pueden construir una comprensión más completa de la Dinámica de Sistemas:

- **Sistema:** Conjunto de partes o componentes interconectados que trabajan juntos para lograr un objetivo específico. Por ejemplo, un ecosistema, una empresa o incluso el cuerpo humano pueden considerarse sistemas.
- **Dinámica:** La palabra "dinámico" en la Dinámica de Sistemas subraya que los sistemas cambian con el tiempo. Nada permanece igual; hay flujos de retroalimentación y ajustes constantes.
- **Stocks y flujos:** Piense que un sistema tiene "existencias" y "flujos". Un stock puede comprenderse como un recipiente que contiene o almacena algo, como el agua de una bañera. Los flujos representan cómo las cosas entran o salen de la reserva, como el agua que entra por el grifo o sale por el desagüe.
- **Retroalimentación:** Los bucles de retroalimentación son fundamentales en la Dinámica de Sistemas. Pueden ser positivos o negativos. Un bucle de realimentación positiva amplifica un cambio, como una bola de nieve. Un bucle de retroalimentación negativa estabiliza un sistema, como un termostato que mantiene constante la temperatura de una habitación.
- **Relaciones causales:** La Dinámica de Sistemas explora las relaciones de causa y efecto entre las distintas partes de un sistema. Es esencial comprender cómo los cambios en una parte pueden afectar a otras.
- **Retrasos:** Los retrasos son habituales en los sistemas del mundo real. Cuando se toma una decisión o se emprende una acción, es posible que se tarde un tiempo en ver los efectos. La Dinámica de Sistemas tiene en cuenta estos retrasos.
- **No linealidad:** Los sistemas pueden ser no lineales, lo que significa que pequeños cambios en una parte pueden provocar efectos desproporcionadamente grandes en otra. La no linealidad puede hacer que los sistemas sean difíciles de predecir.
- **Simulación:** La Dinámica de Sistemas suele implicar la creación de modelos informáticos que simulan cómo se comporta un sistema a lo largo del tiempo. Estos modelos nos ayudan a explorar distintos escenarios y comprender el comportamiento del sistema en diversas condiciones.
- **Prueba de políticas:** La Dinámica de Sistemas suele utilizarse para comprobar el impacto de distintas políticas o decisiones en un sistema. Al simular los efectos de distintas opciones, podemos tomar decisiones mejor informadas.
- **Aprendizaje y adaptación:** La Dinámica de Sistemas reconoce que las personas y las organizaciones pueden aprender de la retroalimentación y adaptar su comportamiento. Lo anterior es crucial para entender cómo cambian los sistemas a lo largo del tiempo.

Sin la comprensión de estos conceptos, sería difícil aplicar eficazmente la metodología de la Dinámica de Sistemas.

5.3.1. Pasos de la Dinámica Sistemas

La DS se centra en las interacciones dinámicas entre los diversos componentes de un sistema y en cómo influyen en su comportamiento a lo largo del tiempo. La Figura 1 presenta el conjunto de pasos que debe de retomar su aplicación.

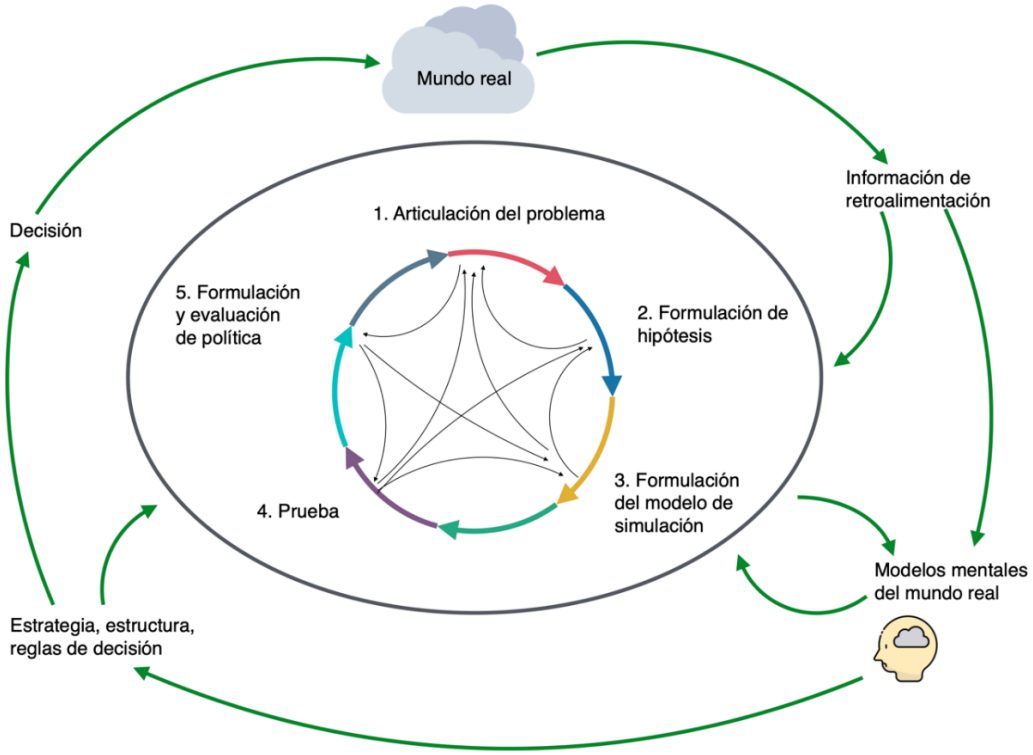


Figura 1. Pasos de la Dinámica de Sistemas

Fuente: Elaboración propia con base en Forrester (1993), Meadows et al. (1982), Robinson (1973) y Sterman (2000).

A continuación se contextualizan las cinco etapas (Forrester, 1993; Meadows et al., 1982; Robinson, 1973; Sterman, 2000). Para su explicación se aproxima al ejemplo de la gestión de una granja:

1. Articulación del problema. El primer paso consiste en definir los límites del sistema que se desea entender. En la gestión de una granja puede implicar especificar los componentes clave del sistema, incluidos los cultivos, el ganado, los recursos (como la tierra, mano de obra y capital), los factores externos (como el clima, los precios de mercado y la normativa) y las estrategias de gestión.
2. Formulación de hipótesis. Después de describir el problema, hay que empezar hacer supuestos de lo que está fallando. Estas conjeturas se llaman hipótesis, su declaración se

puede facilitar a través de los modelos de Dinámica de Sistemas, el primero de ellos se denomina diagramas de bucles causales y diagramas de flujo de existencias para representar las relaciones y los bucles de retroalimentación dentro del sistema. En el caso de la gestión del rendimiento de un sistema agrícola, esto puede implicar la creación de diagramas que muestren cómo interactúan los distintos factores. Por ejemplo, cómo influyen en el rendimiento de los cultivos las condiciones meteorológicas, el riego y la fertilización, o cómo afectan los precios de mercado a los ingresos de la explotación.

3. La Dinámica de Sistemas hace especial hincapié en los circuitos de retroalimentación que pueden ser de refuerzo (positivos) o de equilibrio (negativos). En un contexto de gestión agrícola, los bucles de retroalimentación de refuerzo podrían representar el crecimiento exponencial de una población de plagas si no se controla, mientras que los bucles de retroalimentación de equilibrio podrían representar la estabilización del rendimiento de los cultivos cuando se proporcionan los cuidados y el mantenimiento adecuados.
4. Se recopilan datos de la explotación, registros históricos y fuentes externas para cuantificar las relaciones y los parámetros del modelo. Estos datos incluyen información sobre las tasas de crecimiento de los cultivos, la reproducción del ganado, la disponibilidad de recursos, los precios de mercado, etcétera.
5. Formulación del modelo de simulación. Una vez establecidas las conjeturas, éstas se pueden convertir en una especie de juego de ordenador, a través de la parametrización los componentes del sistema, buscando imitar cuál es el comportamiento del sistema establecido. Mediante programas informáticos especializados como Ithink, Stella, Powersim Studio, Vensim, entre otros los modelos de Dinámica de Sistemas se simulan a lo largo del tiempo para comprender cómo se comporta el sistema en diferentes escenarios. Los agricultores pueden utilizar estas simulaciones para probar el impacto de diferentes estrategias de gestión, cambios en la asignación de recursos y factores externos como las variaciones climáticas.
6. Pruebas. Se utilizan los distintos escenarios para ver si se comportan como el mundo real. Se debe comprobar si el modelo predice correctamente lo que ocurre. Si no fuera así, se debe modificar para que se ajuste mejor a la realidad. Los modelos de Dinámica de Sistemas pueden ayudar a los agricultores y gestores agrarios a evaluar el impacto a largo plazo de diversas políticas y decisiones de gestión. Por ejemplo, pueden explorar las consecuencias de invertir en nuevas tecnologías, cambiar los calendarios de siembra o aplicar prácticas agrícolas sostenibles.
7. Formulación de política. Una vez que los escenarios establecidos son semejantes al mundo real, se podrán utilizar para tomar decisiones o formular una política. En este caso los resultados de las simulaciones pueden ayudar a los agricultores a tomar decisiones con conocimiento de causa. Pueden utilizar el modelo para identificar posibles problemas y oportunidades, tomar decisiones más eficaces sobre la asignación de recursos y desarrollar estrategias para mejorar el rendimiento global de su explotación.

La gestión de los sistemas agrícolas es un proceso continuo, y los modelos de Dinámica de Sistemas pueden actualizarse continuamente con nuevos datos y perfeccionarse para reflejar las condiciones y objetivos cambiantes. Esto permite una gestión adaptativa y la capacidad de responder a los retos y oportunidades cambiantes.

La Dinámica de Sistemas ofrece un enfoque integral para comprender y gestionar sistemas agrícolas complejos al tener en cuenta la interconexión de diversos componentes. Ayuda a tomar decisiones más informadas y basadas en datos, lo que puede aumentar la eficiencia, productividad y sostenibilidad de la agricultura.

5.3.2. Modelación en Dinámica Sistemas

Como se precisó en el proceso de la DS, existen dos modelos que permiten representar las relaciones establecidas para el sistema, el primero de ellos desde una perspectiva cualitativa y el segundo integra la parte cualitativa y cuantitativa (Coyle, 2000). A continuación se abordan cada uno de ellos.

5.3.3. Diagramas de bucles causales

Los diagramas de bucles causales (DBC) permiten representar relaciones o estructuras de retroalimentación; es decir, aquellas que indican interdependencias entre los componentes mediante relaciones de tipo causa y efecto. También, estructuras circulares de retroalimentación que "dominan" el comportamiento en un sistema o subsistema. Podemos encontrar este tipo de articulaciones en cómo se interconecta el mundo. Otro ejemplo reciente sería la propagación del virus SARS-CoV-2 entre la población. Al encadenar varios bucles, se puede contar una historia coherente sobre determinado fenómeno. Estos diagramas, de tipo cualitativos, trazan las direcciones de las relaciones de causa y efecto que, suponemos, propician cierto conflicto o patrón de comportamiento, incluso nos ayudan a identificar por qué se producen ciertos problemas y por qué ciertas soluciones podrían, o no, funcionar. Para elaborar un DBC se pueden realizar los siguientes pasos (Kim, 1992):

1. Definir el propósito del modelo, pues será la guía para delinear el límite apropiado del sistema.
2. Identificar y definir las variables clave del sistema.
3 Trazar las relaciones causales entre las variables.
4. Distinguir y asignar la polaridad de las relaciones (+ o -).
5. Distinguir las relaciones significativas y la formación de bucles causales.

Con base en estos pasos se puede representar una relación de causa y efecto mediante una flecha entre dos variables. Por variable, se puede considerar cualquier cosa que pueda cambiar con el tiempo, por ejemplo, población, recursos, estrategias, insumos almacenados, etc. La flecha va de la variable causa (o que provoca el cambio) hacia la variable efecto (o afectada por el cambio).

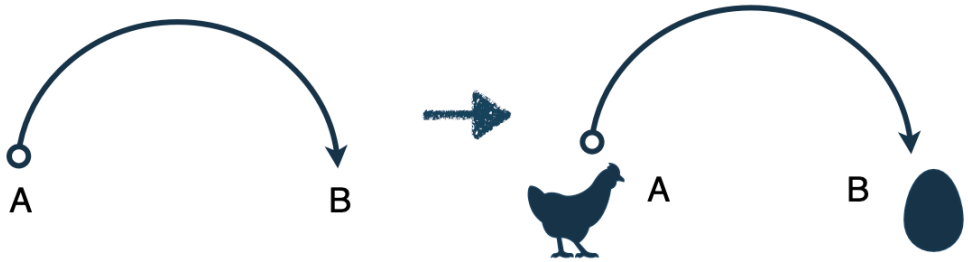


Figura 2. Relaciones causales

Fuente: Elaboración propia con base en Sterman (2000).

5.3.4. Polaridad

El DBC integra relaciones positivas representadas con el símbolo + (un incremento en una variable A establece un incremento en B y viceversa un decremento produce un decremento) y negativas con el signo - (un incremento en una variable A establece un decremento en B y viceversa). Con fines didácticos se utiliza el color azul para relaciones positivas y rojo para las negativas.

De manera conjunta, las relaciones de un DBC, conforma un bucle de retroalimentación. Los circuitos de retroalimentación pueden ser de refuerzo R (positivos) o de equilibrio B (negativos). En un contexto de gestión agrícola, los bucles de retroalimentación de refuerzo podrían representar el crecimiento exponencial de una población de plagas si no se controlan o que al incrementar la población de gallinas se tiene un aumento en la producción de huevo (Figura 3, inciso a). Mientras que los bucles de retroalimentación de equilibrio o balance podrían representar la estabilización del rendimiento de los cultivos cuando se proporcionan los cuidados necesarios, otro ejemplo podría ser el mantenimiento adecuado o la mejora de la calidad de alimento para las gallinas y así nutrirlas mejor y, con esto, a su vez, reducir el consumo de alimento (Figura 3, inciso b).

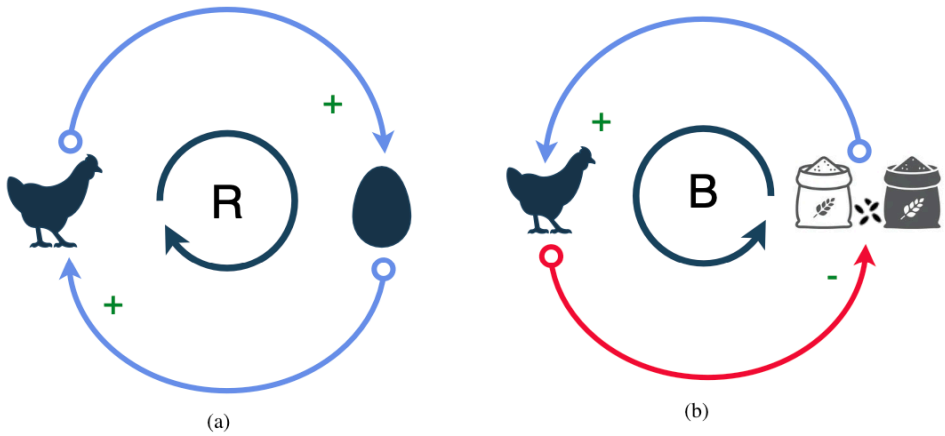


Figura 3. Bucles causales de retroalimentación y de balance

Fuente: Elaboración propia con base en Sterman (2000).

Como introducción a la comprensión de las relaciones causales en el tema, se puede suponer el crecimiento y rendimiento de los cultivos, la representación de esta iniciativa se muestra en la Figura 4, a través de este bucle se puede describir la dinámica de que al aumentar las precipitaciones, mejora el rendimiento de los cultivos lo que se traduce en mayores ingresos. El agricultor puede decidir invertir en ampliar la explotación, lo que requiere asignar más recursos a los cultivos. Al asignar más recursos, aumenta la producción de cultivos, pero también aumenta el riesgo de que disminuyan las precipitaciones, lo que repercutiría negativamente en el rendimiento de los cultivos.

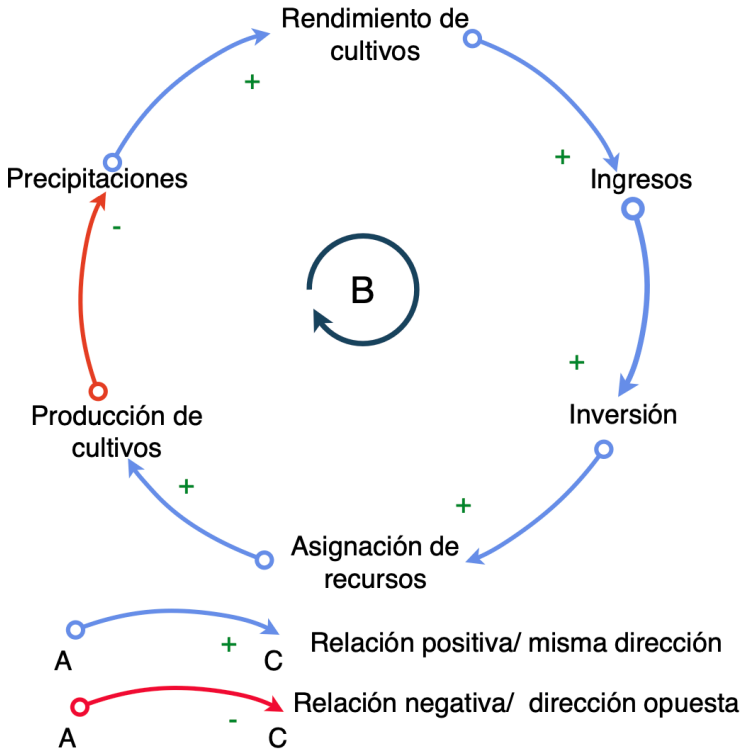


Figura 4. Relaciones causales del crecimiento y rendimiento de los cultivos

Fuente: Elaboración propia con base en Sterman (2000).

Estos diagramas facilitan suponer una serie de comportamientos, sin embargo, es necesario recocer sus limitaciones. A continuación se comparten algunas razones por las que Jay Forrester no era tan partidario a únicamente implementar este tipo modelado, los consideraba como un buen punto de partida que favorece a comprender la dinámica de los sistemas y facilitar la comunicación sobre su comportamiento, pero siempre el uso de modelos más cuantitativos y matemáticos ayudará a robustecer el análisis de la Dinámica de Sistemas (Richardson, 1997).

- Insuficiencia cuantitativa: los DBC son a menudo insuficientemente cuantitativos. Aunque los DBC son excelentes para visualizar las relaciones cualitativas de causa y efecto de un sistema, carecen de la capacidad de representar las relaciones numéricas precisas y la dinámica temporal necesarias para una simulación exacta del sistema.
- Limitado para el análisis de políticas: El principal objetivo al desarrollar la Dinámica de Sistemas era proporcionar una herramienta para comprender los sistemas dinámicos y realizar análisis políticos. Por tanto, los DBC no representaban suficientemente los aspectos cuantitativos y de retroalimentación de los sistemas complejos necesarios para la comprensión de las políticas por sí solos.
- Fomento de una modelización más rigurosa: los métodos con desarrollo de ecuaciones y modelos numéricos ofrecen una representación más completa y precisa de la dinámica del sistema, lo que permite profundizar en el análisis de las políticas y la comprobación de escenarios.
- Riesgo de simplificación excesiva: Los DBC, por su naturaleza cualitativa, pueden llevar a una simplificación excesiva de sistemas complejos. Basarse únicamente en los DBC pudiera impedir la exploración de comportamientos matizados del sistema y obstaculizar el desarrollo de modelos precisos para la toma de decisiones.

5.4. Diagrama de Forrester

El Diagrama de Forrester, también conocido como diagrama de stocks y flujos, es una representación gráfica utilizada en Dinámica de Sistemas para modelar y visualizar la dinámica de un sistema a lo largo del tiempo. Fue desarrollado por Jay Forrester y su objetivo principal es representar cómo cambian las cantidades de diferentes variables (stocks) debido a las tasas de entrada y salida (flujos) en un sistema dinámico.

Para lograr el desarrollo de estos esquemas, es necesario comprender sus componentes y su propia estructura, mismos que se explican brevemente a continuación:

5.4.1. Tipos de variables

a) **Stocks:** Las existencias representan acumulaciones de alguna cantidad dentro del sistema, como una población, dinero o la cantidad de un recurso concreto. En el diagrama, las existencias suelen representarse mediante rectángulos. Pueden considerarse como depósitos que contienen una cantidad determinada y que pueden aumentar o disminuir con el tiempo.
b) **Flujos:** Los flujos representan el ritmo al que algo entra o sale de un stock. Suelen representarse como flechas que conectan las existencias. Los flujos pueden considerarse como las entradas y salidas de un embalse. Los flujos influyen en la evolución de la población a lo largo del tiempo.

c) **Variables Auxiliares:** En algunos Diagramas de Forrester, se utilizan variables adicionales que no son existencias pero que se utilizan para describir relaciones o ecuaciones que afectan a las existencias y los flujos. Se representan mediante variables que no están conectadas a los stocks.

5.4.2. Estructura

a) **Dirección de los flujos:** La dirección de las flechas indica si un flujo es una entrada o una salida de un stock. Los flujos pueden ser positivos (aumentan las existencias) o negativos (las agotan).
b) **Retrasos:** Los retrasos suelen indicarse en los bucles de retroalimentación u otros símbolos para mostrar que hay un desfase temporal entre la causa y el efecto. Por ejemplo, dejar correr el agua en una bañera (flujo de entrada), el nivel del agua (existencias) tarda en subir.
c) **Etiquetas de variables:** Cada población y flujo se etiqueta con un nombre de variable, que representa lo que se está acumulando o cómo está cambiando. Estas etiquetas aportan claridad sobre los elementos del sistema.

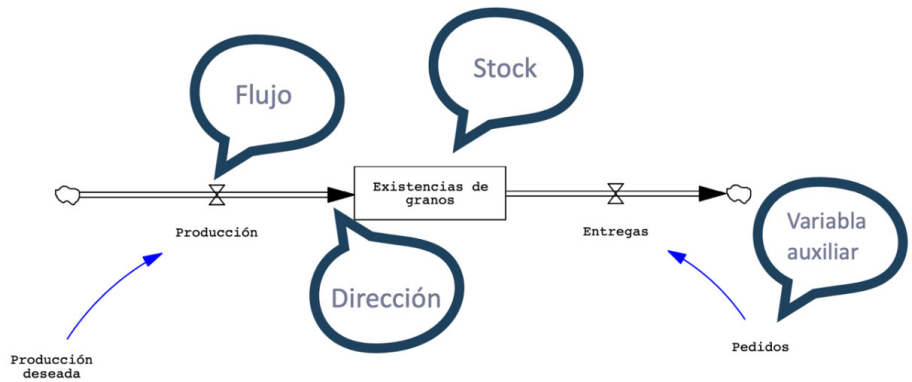


Figura 5. Componentes de Diagrama de Forrester
Fuente: Elaboración propia con base en Martín-García (2021).

Una vez revisada la base conceptual para estos diagramas con base en Forrester, (2009), Morecroft (2015) y Sterman (2000), y así lograr una aproximación aligerada, se recurre a una aplicación básica de la Dinámica de Sistemas de la gestión del aprovechamiento agrícola, para ello se realizan los siguientes pasos:

1. **Identificación del sistema:** Consiste en definir los límites del sistema de gestión del aprovechamiento agrícola. Esto implica especificar los componentes clave del sistema, incluidos los cultivos, el ganado, los recursos (como la tierra, mano de obra y capital), los factores externos (como el clima, los precios de mercado y la normativa) y las estrategias de gestión.

Si se parte de un diagrama DBC, este primer aproximamiento cualitativo se utiliza para distinguir los tipos de variables establecidos en la estructura Forrester, por ejemplo definir que fluye a través del modelo.

2. **Construcción de un modelo:** Los modelos de Dinámica de Sistemas suelen utilizar los diagramas de flujo que pueden fundamentarse de un diagrama de bucle causal de existencias para representar las relaciones y los bucles de retroalimentación dentro del sistema. En el caso de la gestión de sistemas agrícolas puede implicar la creación de diagramas que muestren cómo interactúan los distintos factores; por ejemplo, cómo influyen en el rendimiento de los cultivos las condiciones meteorológicas, el riego y la fertilización, o cómo afectan los precios de mercado a los ingresos de la explotación.
3. **Recogida de datos:** Se recopilan datos de la explotación, registros históricos y fuentes externas para cuantificar las relaciones y los parámetros del modelo. Estos datos incluyen información sobre las tasas de crecimiento de los cultivos, la reproducción del ganado, la disponibilidad de recursos, los precios de mercado, etcétera.
4. **Simulación del modelo:** Mediante programas informáticos especializados, los modelos de Dinámica de Sistemas se simulan a lo largo del tiempo para comprender cómo se comporta el sistema en diferentes escenarios. Los agricultores pueden utilizar estas simulaciones para probar el impacto de diferentes estrategias de gestión, cambios en la asignación de recursos y factores externos como las variaciones climáticas.
5. **Comprobación de políticas:** Los modelos de Dinámica de Sistemas pueden ayudar a los agricultores y gestores agropecuarios a evaluar el impacto a largo plazo de diversas políticas y decisiones de gestión. Por ejemplo, pueden explorar las consecuencias de invertir en nuevas tecnologías, cambiar los calendarios de siembra o aplicar prácticas agrícolas sostenibles.
6. **Apoyo a la toma de decisiones:** Los resultados de las simulaciones pueden ayudar a los agricultores a tomar decisiones con conocimiento de causa. Pueden utilizar el modelo para identificar posibles problemas y oportunidades, tomar decisiones más eficaces sobre la asignación de recursos y desarrollar estrategias para mejorar el rendimiento global de su explotación.
7. **Mejora continua:** La gestión de sistemas de aprovechamiento o explotación es un proceso continuo, y los modelos de Dinámica de Sistemas pueden actualizarse continuamente con nuevos datos y perfeccionarse para reflejar las condiciones y objetivos cambiantes. Esto permite una gestión adaptativa y la capacidad de responder a los retos y oportunidades cambiantes.

El siguiente es un ejemplo de un sistema sencillo sobre las entradas y salidas de granos para una granja:

Existencias de granos (STOCK): Esta variable representa la cantidad de grano disponible (parte de un valor inicial de 50,000 kg). La dinámica de las existencias de grano está influenciada por dos factores principales: la producción y las entregas.

Producción (FLUJO): La producción es el ritmo al que se produce el grano. En este modelo, se fija en un valor constante de 12,000 kg. Esto significa que el sistema tiene como objetivo producir 12,000 kg de grano a lo largo del tiempo. Si la producción cumple sistemáticamente este objetivo, las existencias de grano se mantendrán estables.

Entregas (FLUJO): Las entregas representan el ritmo al que se cumplen los pedidos de grano. En este modelo, se fija igual al número de pedidos. El stock de grano disminuye cuando las entregas superan a la producción y aumenta cuando la producción supera a las entregas.

Producción deseada (VARIABLE AUXILIAR): Es un valor constante de 12,000 kg, que indica el nivel ideal de producción de grano que el sistema pretende alcanzar.

Pedidos (VARIABLE AUXILIAR): Los pedidos representan la demanda de grano, comienza en 10,000 kg y aumenta en 100 kg con cada paso de tiempo. Este aumento de la demanda representa una demanda creciente o fluctuante de grano.

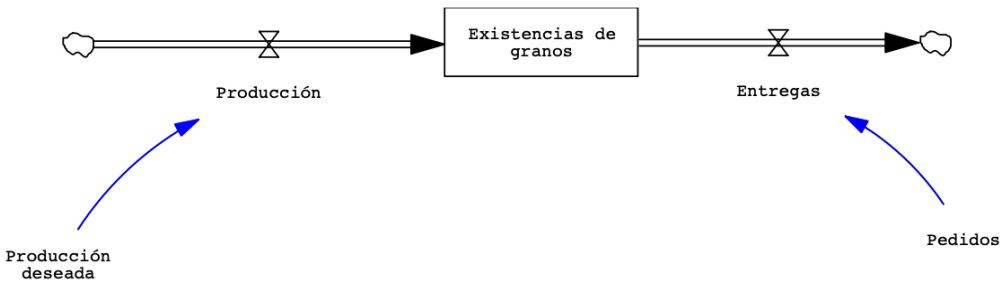


Figura 6. Modelo existencia de granos

Fuente: Elaboración propia con base en Martín-García (2021).

En el Cuadro 1 las ecuaciones fijan la producción deseada en 12,000 kg de granos y las entregas coinciden con el número de pedidos. La variable de pedidos comienza en 10,000 kg de granos y aumenta en 100 en cada paso de tiempo, simulando una demanda creciente de grano.

Cuadro 1. Descripción de las variables del modelo existencia de granos

Tipo de variable	Nombre	Ecuación y parámetros
Stock	Existencias de granos	$= \int_0^t [producción - entregas] + producción_{t0}$ Valor inicial: 50000
Flujo	Producción	= produccion deseada
Flujo	Entregas	= Pedidos
Variable auxiliar	Producción deseada	= 12000
Variable auxiliar	Pedidos.	= 10000+STEP(100,10)

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento del sistema puede explorarse más mediante su simulación en la que se puede observar cómo evoluciona con el tiempo las existencias de grano, la producción y las entregas en respuesta a los cambios en los pedidos y los niveles de producción (Figura 7).

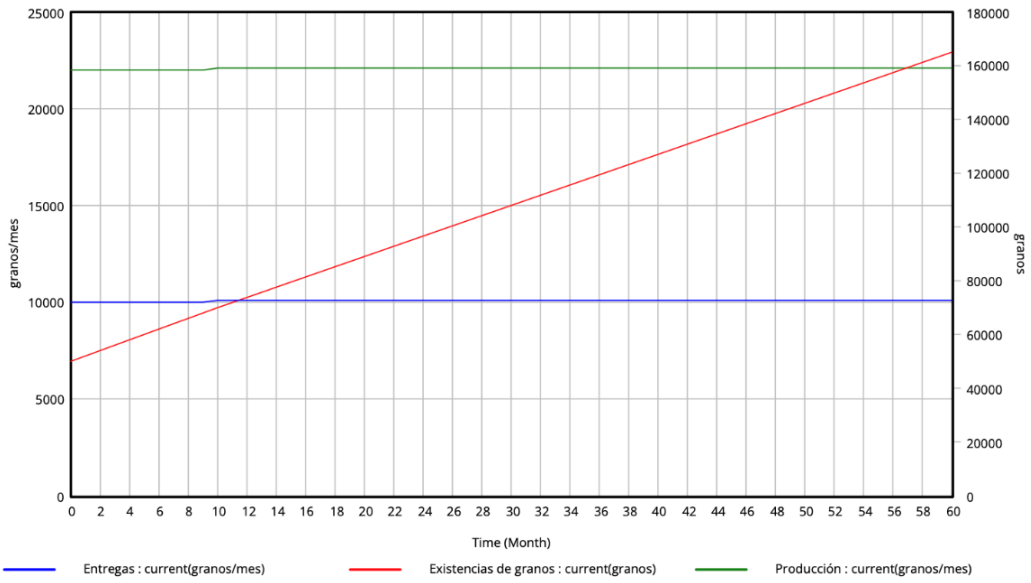


Figura 7. Simulación a través de software Vensim PLE Plus 9.4.2 (Ventana Systems, 2010)

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3. Dinámica o comportamiento del sistema

Inicialmente el stock de grano es de 50,000 kg.

El sistema se esfuerza por producir 12,000 kg de granos (la producción deseada) a lo largo del tiempo.

Los pedidos de grano comienzan en 10,000 kg y aumentan gradualmente en 100 con cada paso de tiempo reflejando una demanda que crece lentamente.

Las existencias de grano cambian con el tiempo en función del equilibrio entre la producción y las entregas. Si la producción se ajusta sistemáticamente a la producción deseada, las existencias permanecen estables. Sin embargo, si las entregas superan a la producción, las existencias disminuyen, y si la producción supera a las entregas, las existencias aumentan.

La dinámica del sistema depende de la capacidad de la producción para seguir el ritmo de la creciente demanda representada por el aumento de los pedidos. Si los pedidos superan continuamente a la producción, las existencias de grano disminuirán gradualmente.

Para finalizar, en el Cuadro 2 presenta un resumen de los dos diagramas de la DS, esto facilita que el lector, de una manera rápida y sencilla, pueda identificar sus componentes y puntos fuertes en cada uno de ellos.

Cuadro 2. Resumen de los diagramas de la Dinámica de Sistemas

Aspecto	Diagramas Causales	Diagrama de Forrester
Propósito	Mostrar las relaciones de causa y efecto dentro de un sistema, haciendo hincapié en los bucles de retroalimentación.	Ilustrar cómo las existencias, los flujos y otras variables cambian con el tiempo en un sistema.
Elementos principales	Flechas, variables y bucles de retroalimentación y de balance.	Stocks, flujos, variables auxiliares y ecuaciones que representan sus relaciones.
Bucles de retroalimentación	Centrarse en identificar e ilustrar diferentes tipos de circuitos de retroalimentación (positivos y negativos).	Hacer hincapié en las acumulaciones dinámicas (stocks) y los ritmos de cambio (flujos).
Representación de variables	Las variables se suelen etiquetar con signos + (positivo) y - (negativo) para indicar sus relaciones causales.	Las variables se definen explícitamente y pueden incluir ecuaciones que rigen su comportamiento.
Consideración del tiempo	Hace hincapié en las relaciones cualitativas de causa y efecto a lo largo del tiempo, pero no proporciona un elemento temporal preciso.	Modela explícitamente cómo cambian las existencias y los flujos a lo largo del tiempo, a menudo mediante ecuaciones diferenciales.
Nivel de abstracción	Proporciona una representación conceptual de alto nivel de la estructura del sistema y de los circuitos de retroalimentación.	Ofrece una representación más detallada y cuantitativa de la dinámica del sistema.
Facilidad de uso	Más fácil para la comprensión conceptual, y suele utilizarse para la exploración inicial de problemas y la comunicación.	Más complejo y adecuado para la modelización en profundidad que requiere herramientas informáticas para simulaciones precisas.
Aplicación	Útil para la elaboración de mapas conceptuales, la comunicación y la obtención de conocimientos sobre la estructura de un sistema.	Se aplica para desarrollar modelos cuantitativos dinámicos que permitan predecir y comprender el comportamiento de un sistema.

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Conclusiones

La Dinámica de Sistemas constituye un marco para comprender y mejorar los sistemas agrícolas. Al reconocer y adoptar los conceptos básicos, seguir los pasos sistemáticos y utilizar las herramientas disponibles, las partes interesadas pueden explorar diversos escenarios y estrategias en un entorno virtual libre de riesgos. Este enfoque promueve una toma de decisiones y la formación de políticas de una forma informada en la agricultura donde las incertidumbres, los retrasos y los bucles de retroalimentación a menudo hacen que los resultados sean impredecibles.

En palabras de George E. P. Box, "todos los modelos son erróneos, pero algunos son útiles". Aunque ningún modelo puede reproducir a la perfección la totalidad de un sistema agrícola, la utilidad de un modelo reside en su capacidad para aportar ideas, informar políticas y orientar acciones que conduzcan a sistemas agrícolas más eficientes, sostenibles y resilientes. La Dinámica de Sistemas, con su enfoque integral y su énfasis en la retroalimentación y la dinámica temporal, crea modelos útiles que pueden ayudar a afrontar los polifacéticos retos de la agricultura moderna.

5.6. Referencias

Bloodgood, J. M., Hornsby, J. S., Burkemper, A. C., & Sarooghi, H. (2015). A system dynamics perspective of corporate entrepreneurship. *Small Business Economics*, *45*(2), 383–402. https://doi.org/10.1007/s11187-015-9634-4

Coyle, G. (2000). Qualitatie and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. *System Dynamics Review*, *16*(3), 225–244.

Esteso, A., Alemany, M. M. E., Ottati, F., & Ortiz, Á. (2023). System dynamics model for improving the robustness of a fresh agri-food supply chain to disruptions. *Operational Research*, *23*(2), 28. https://doi.org/10.1007/s12351-023-00769-7

Forrester, J. (1989). The bengining of System Dynamics. *International Meeting of the System Dynamics Society*, 15.

Forrester, J. W. (1993). System Dynamics and the Lessons of 35 Years. In *A Systems-Based Approach to Policymaking* (pp. 199–240). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3226-2_7

Forrester, J. W. (2009). Some Basic Concepts in System Dynamics. In *Sloan School of Management Massachusetts Institute of Technology* (Issue 1). http://static.clexchange.org/ftp/documents/whyk12sd/Y_2009-02LearningThroughSD.pdf

Ghaffarzadegan, N., Lyneis, J., & Richardson, G. P. (2010). How small system dynamics models can help the public policy process. *System Dynamics Review*, n/a-n/a. https://doi.org/10.1002/sdr.442

Kim, D. (1992). Guidelines for Drawing Causal Loop Diagrams. *The Systems Thinker*, *3*(1), 1–4.

Marandure, T., Dzama, K., Bennett, J., Makombe, G., & Mapiye, C. (2020). Application of system dynamics modelling in evaluating sustainability of low-input ruminant farming systems in Eastern Cape Province, South Africa. *Ecological Modelling*, *438*, 109294. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109294

Martínez García, J. A., & Martínez Caro, L. (2009). Understanding customer loyalty through system dynamics. *Management Decision*, *47*(1), 151–172. https://doi.org/10.1108/00251740910929768

Martín-García, J. (2021). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas* (J. Martín-Garcia, Ed.). Martín-Garcia, J.

Meadows, D., Richardson, J., & Bruckmann, G. (1982). Groping in the Dark: The First Decade of Global Modelling. *Population and Development Review*, *8*(4), 858. https://doi.org/10.2307/1972486

Morecroft, J. (2015). *Strategic Modelling and Business Dynamics: A Feedback Systems Approach*. Wiley.

Mousavi, S. H., Kavianpour, M. R., Alcaraz, J. L. G., & Yamini, O. A. (2023). System Dynamics Modeling for Effective Strategies in Water Pollution Control: Insights and Applications. *Applied Sciences*, *13*(15), 9024. https://doi.org/10.3390/app13159024

Nofiani, D., Indarti, N., Lukito-Budi, A. S., & Manik, H. F. G. G. (2021). The dynamics between balanced and combined ambidextrous strategies: a paradoxical affair about the effect of entrepreneurial orientation on SMEs' performance. *Journal of Entrepreneurship in Emerging Economies*, *ahead-of-p*(ahead-of-print). https://doi.org/10.1108/JEEE-09-2020-0331

Pejic Bach, M., Tustanovski, E., Ip, A. W. H., Yung, K.-L., & Roblek, V. (2019). System dynamics models for the simulation of sustainable urban development. *Kybernetes*, *49*(2), 460–504. https://doi.org/10.1108/K-04-2018-0210

Rebs, T., Brandenburg, M., & Seuring, S. (2019). System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, *208*, 1265–1280. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.100

Ricciardi, F., De Bernardi, P., & Cantino, V. (2020). System dynamics modeling as a circular process: The smart commons approach to impact management. *Technological Forecasting and Social Change*, *151*, 119799. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119799

Richardson, G. (1997). Problems in causal loop diagrams revisited. *System Dynamics Review*, 247–252.

Robinson, W. C. (1973). The limits to growth: A report for the club of rome's project on the predicament of mankind Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jergen Randers, and William W. Behrens, III. *Demography*, *10*(2), 289–299. https://doi.org/10.2307/2060819

Sing, M. C. P., Love, P. E. D., & Liu, H. J. (2019). Rehabilitation of existing building stock: A system dynamics model to support policy development. *Cities*, *87*, 142–152. https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.09.018

Stary, C. (2017). System-of-Systems Design Thinking on Behavior. *Systems*, *5*(3), 16. https://doi.org/10.3390

Sterman, J. (2000). *Bussines Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a complex world*. Mc Graw Hill Higher Education.

Turner, B., Menendez, H., Gates, R., Tedeschi, L., & Atzori, A. (2016). System Dynamics Modeling for Agricultural and Natural Resource Management Issues: Review of Some Past Cases and Forecasting Future Roles. *Resources*, 5(4), 40. https://doi.org/10.3390/resources5040040

Uriona, M., & (Saartjie) Grobbelaar, S. S. (2019). Innovation system policy analysis through system dynamics modelling: A systematic review. *Science and Public Policy*, 46(1), 28–44. https://doi.org/10.1093/scipol/scy034

Vafa-Arani, H., Jahani, S., Dashti, H., Heydari, J., & Moazen, S. (2014). A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, 21–36. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.016

Ventana Systems, Inc. (2010). *Vensim PLE Software* (7.2a). Ventana Systems, INC. http://www.ventanasystems.com

Wang, W., Li, K., Liu, Y., Lian, J., & Hong, S. (2022). A system dynamics model analysis for policy impacts on green agriculture development: A case of the Sichuan Tibetan Area. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133562. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133562



6. Análisis de Redes Sociales desde la Complejidad de los Sistemas

Norman Aguilar-Gallegos[1, 2]
Leticia Elizabeth Romero-García[1, 2, 3 *]
Enrique Genaro Martínez-González[4]
Jorge Aguilar-Ávila[4]

6.1. Resumen

En los últimos años ha existido un interés creciente de analizar y entender a los sistemas desde la perspectiva y pensamiento en red. Lo anterior porque, desde un enfoque de red, es posible conceptualizar, representar, entender y estudiar un conjunto de actores relacionados a través de distintos mecanismos. Así, de forma sencilla se puede concebir que una red es un conjunto de elementos con conexiones entre ellos. A los elementos se les suele conocer como nodos o, incluso, como actores, mientras que las conexiones se conocen como aristas o vínculos y, en algunos casos, como relaciones. Representar un sistema en forma de red es útil porque a través de ésta podemos esquematizar diferentes entidades dentro de un sistema, con sus diferentes relaciones entre ellos y así focalizarnos en los roles de esas entidades, en los recursos intercambiados, entre otros aspectos. Además, es posible generar indicadores sobre la red y, por tanto, del sistema. Gracias a que se pueden combinar diferentes rasgos de los elementos de la red, es que podemos representar distintos tipos de redes, desde aquellas que sólo representan nodos y aristas no dirigidas de un solo tipo, hasta aquellas que consideran nodos y aristas dirigidas, con atributos y pesos para ambos elementos, e incluso con distintos tipos de aristas entre los nodos. Dada la importancia del enfoque de redes para representar sistemas

[1] Universidad Panamericana. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Álvaro del Portillo 49, Zapopan, Jalisco, 45010, México.

[2] Networks and Systems Thinking Research Group – NeST.

[3] Grupo de Investigación en Sistémica y Turismo.

[4] Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo (UACh), Chapingo, Estado de México, México, km. 38.5 Carretera México – Texcoco, Texcoco, Estado de México, 56230, México.

* Autor de correspondencia: leromero@up.edu.mx

complejos, es que éstos se han dividido en cuatro tipos de redes: i) sociales, ii) de información o conocimiento, iii) tecnológicas y iv) biológicas. Con esto en mente, este capítulo tiene por objetivo ofrecer un panorama introductorio al enfoque de redes, de su importancia para analizar sistemas complejos y, además, de las principales propiedades que guardan las redes complejas, entre ellas: *small-world* (mundo pequeño), *scale-free networks* (redes libres de escala) y *preferential attachment* (encadenamiento o unión preferencial).

Palabras clave: sistemas complejos, redes complejas, ARS, redes sociales, agricultura.

6.2. Introducción: redes y sistemas

Hoy en día, en diversos ámbitos sociales como los científicos, tecnológicos, educativos, políticos, profesionales, entre otros, es común tener presentes conceptos o representaciones asociadas a redes y también a sistemas; por ejemplo, podemos escuchar hablar de redes de colaboración científica, redes de patentes, sistemas de transporte, sistemas informáticos, sistemas educativos, sistemas políticos, redes de poder político, redes de corrupción, redes de narcotráfico, intercambio de conocimiento entre profesionales, sitios de formación de redes sociales o también de medios sociales, entre muchos más. En este sentido, las redes y los sistemas, en un sentido abstracto, se han convertido en elementos intrínsecos de nuestra vida diaria.

Así, una red puede ser entendida como un conjunto de elementos o ítems, también llamados vértices, nodos o actores, los cuales están conectados entre ellos; estas conexiones son conocidas como aristas, vínculos o relaciones (Newman, 2003). En su forma más simple, una red es una conexión de puntos unidos en pares por líneas (Newman, 2010). Considerando estas definiciones, por tanto, es sencillo asociar el concepto de redes al de sistemas, puesto que un sistema en su definición más sencilla es un conjunto de elementos que están relacionados entre sí para formar un todo (Bertalanffy, 1968; Gigch, 1978). Por tanto, los elementos de un sistema pueden ser representados por vértices, nodos o actores, mientras que las relaciones entre los elementos serían las aristas, vínculos o relaciones sociales.

Así, el interés puesto en la representación de sistemas con el uso de redes, también llamados grafos (Newman, 2010), es muy evidente puesto que abundan en el mundo; además, es sencillo pensar en sistemas tomando la forma de redes. Entre algunos ejemplos están el internet en su forma física (de conexiones entre equipos) pero también en digital, además de redes sociales entre conocidos o de otro tipo de relaciones entre individuos u organizaciones, redes de negocios entre compañías, redes neuronales, redes metabólicas, redes de alimentos, redes de distribución (de materias primas, de entregas postales e incluso biológicas como las que forman los vasos sanguíneos), redes de citación entre artículos, redes de colaboración, y un largo etcétera; de hecho, algunos de estos casos se verán con mayor detenimiento en este documento.

Bajo este contexto, se reconoce ampliamente la importancia y el interés que el análisis de redes tiene como una parte esencial y más amplia para estudiar sistemas complejos; hay un inte-

rés creciente de entender sistemas desde una perspectiva en red. De esta forma, el estudio de redes se ha difundido a toda la ciencia, desde la neurobiología hasta la física estadística (Strogatz, 2001); por tanto, se ha extendido a una diversidad de campos de estudio, incluidos el agrícola y agroalimentario (Aguilar-Gallegos, Martínez-González, et al., 2017).

Sin embargo, tal y como lo indica Strogatz (2001), hay que reconocer y tener siempre en cuenta la inherente dificultad que tienen las redes al representar y estudiar sistemas complejos por algunos de los siguientes puntos (Strogatz, 2001): (1) La complejidad estructural que tienen las redes al representar sistemas de la vida real. (2) Evolución de la red, cualquier sistema abierto está cambiando constantemente en el tiempo; imagine la cantidad de páginas y links de internet que se crean, modifican o eliminan a cada minuto. (3) La diversidad de conexiones, los links que unen a los nodos de una red pueden ser de diferentes tipos, pesos, direcciones, entre otras características; por lo mismo, en la siguiente sección se habla de esto con más detalle (ver sección 6.3). (4) La complejidad dinámica, es decir, los nodos de una red podrían comportarse como sistemas dinámicos no-lineales. (5) La diversidad de los nodos, así como las redes pueden estar formadas por diferentes tipos de vínculos, lo mismo aplica para la diversidad de nodos que la forman, además de las características que los mismos podrían tener. (6) Meta-complicación o meta-complejo, es decir, que cualquiera de los puntos anteriores puede influir y complicar más a uno que a otro; por ejemplo, la evolución de una red de internet (punto 2) afecta y puede complicar la estructura de la mismo (punto 1).

En este sentido es importante tener en cuenta lo indicado por Barabási (2013) sobre que la ciencia de redes busca comprender las redes que surgen y emergen en la naturaleza, la tecnología y la sociedad que convive en ella, para este propósito utiliza un conjunto de herramientas y principios que se han venido desarrollando en los últimos años. Lo anterior considerando que, a pesar de las diferencias obvias entre redes (sus actores o nodos y los vínculos o relaciones que se establecen en ellas), existen una diversidad de ejemplos que muestran que la redes surgen y evolucionan sobre un conjunto de leyes y mecanismos que justamente la ciencia de redes (Barabási, 2013), junto con el análisis de redes sociales (ARS), han ayudado a entender y, además, es un campo en expansión.

No obstante, aun reconociendo este tipo de complicaciones, se ha discutido y proporcionado evidencia contundente de que la ventaja de modelar un sistema como un grafo de red es que los sistemas (y en muchos casos los problemas de los mismos) se vuelven más tratables o manejables (Mata, 2020); tanto para analizarlos como para entenderlos y, por tanto, intervenirlos y modificarlos (Aguilar-Gallegos, Martínez-González, et al., 2017). Complementando esto, actualmente se tiene en mente que al estudiar diversos fenómenos desde la perspectiva de sistemas complejos, no lograremos entenderlos sino se desarrolla un profundo entendimiento de las redes detrás de esos sistemas (Barabási, 2016). En parte, es por esto que el actual interés en el enfoque del ARS y de la ciencia de redes es parte de un movimiento más amplio de investigación sobre sistemas complejos (Strogatz, 2001). Precisamente porque detrás de cada sistema complejo existe una red intrincada que lograría representarlo y decodificar las interacciones entre los componentes de los sistemas (Barabási, 2016).

Bajo este contexto, este documento tiene como objetivo brindar al lector una perspectiva introductoria al tema del ARS considerando su uso y, además, la aplicación que ha tenido para el estudio de los sistemas complejos mostrando con ello la valía que tiene este enfoque. Lo anterior buscamos cumplirlo, primero, explicando los elementos que componen a las redes, así como los tipos de redes que se pueden obtener de esos elementos. Después, recurrimos al enfoque de redes complejas para explorar las categorías en las cuales se han clasificado ciertas redes y sistemas del mundo real. Por último, derivado de los aportes realizados desde ambos enfoques de redes, se explican tres propiedades que han ayudado a entender y explicar el comportamiento de las redes con las cuales se han representado sistemas complejos. Al final, nos permitimos presentar diversos comentarios que ayuden a sintetizar el contenido, pero también a ampliar la perspectiva que estos temas tienen en la actualidad.

6.3. Elementos y tipos de redes

6.3.1. Elementos que componen una red

Como se ha venido argumentando, el análisis de redes nos permite y provee de herramientas para visualizar y representar sistemas en forma de redes, logrando analizar los actores y vínculos que se forman entre ellos (Borgatti et al., 2009; Wasserman & Faust, 1994). Sin embargo, aunque venimos hablando de redes, es necesario definir y explicar cuáles son los elementos que las componen; pareciera obvio, pero es necesario. En nuestro caso, consideramos que son cuatro los elementos básicos que componen la red: (1) nodos, vértices o actores; (2) vínculos, aristas, lazos o relaciones; (3) atributos para nodos y para vínculos; y (4) dirección y flujo.

Para su profundización se presenta la Figura 1. Los nodos se representan tradicionalmente con el uso de formas, por lo general se utilizan círculos; los vínculos son las líneas que unen a los nodos y que representan que entre ambos pares de nodos existe "algo" que los conecta, por ejemplo, se comunican, se conocen, intercambian información, etc. Estos dos elementos son considerados fundamentales para una red, sin embargo, se reconoce que la presencia de los datos relacionales; es decir, de los vínculos, es crucial para la red y que además, como veremos más adelante, es lo que define a la red (Wasserman & Faust, 1994).

Posteriormente, están los atributos de nodos y vínculos, ambos se utilizan para representar características específicas de los elementos mencionados. Los atributos son muy importantes porque se pueden combinar con los datos de los nodos y los vínculos para enriquecer e incrementar la posibilidad de análisis de las propiedades de la red, de los actores y de sus vínculos (Marsden, 2011). En el caso de los atributos de nodos se les conocen también como "interpretadores de nombres" (Marsden, 1990). En la Figura 1, presentamos el atributo de los nodos con dos colores, estos pudieran representar, por ejemplo: hombre y mujer para el género o dos localidades diferentes en donde viven los actores, o cualquier otro tipo de característica binaria. Para este caso, los atributos de los nodos también se pueden representar no sólo con el color, también por el tamaño

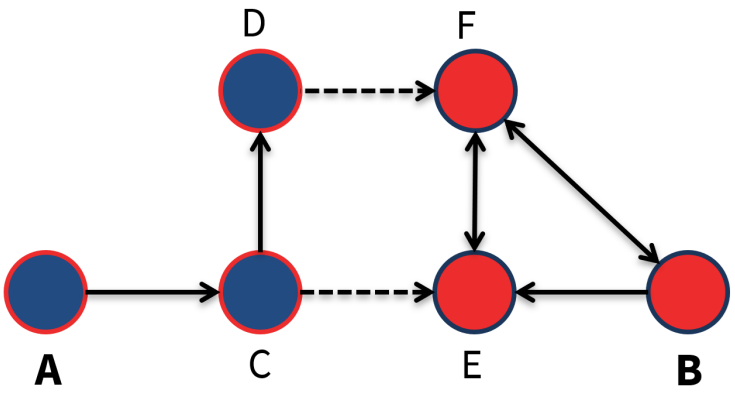


Figura 1. Elementos que componen una red

Fuente: Elaboración propia.

del nodo o incluso por su forma (Aguilar-Gallegos, Martínez-González, et al., 2017). Lo anterior permite que se puedan usar atributos con base en los distintos tipos de variables categóricas binarias, nominales y ordinales, pero también variables cuantitativas discretas y continuas.

En el mismo sentido, en la Figura 1, presentamos el atributo de los vínculos con el uso de dos tipos de líneas: sólidas y punteadas. En este caso esto podría representar dos tipos de vínculos o quizás una relación más fuerte o débil entre actores o una temporalidad de la misma. En este sentido, se reconoce el hecho de que los vínculos pueden ser binarios para marcar la presencia o ausencia de la relación y también pueden ser ponderados para representar otro tipo de característica como la intensidad del vínculo. De manera gráfica, los atributos de los vínculos se pueden representar con el tipo de línea, el color y, más comúnmente, con el grosor de la misma. Cabe hacer mención que uno de los atributos que llegan a tener los vínculos, y que actualmente tiene mucha relevancia en el análisis de redes complejas o de sistemas reales del mundo, es la temporalidad del vínculo o relación; es decir, el tiempo en el cual ocurren. Esto porque permite introducir la dimensión temporal al análisis de redes y, con ello, incrementar las posibilidades de estudio de las mismas.

Por último, en la Figura 1 presentamos la dirección o flujo. Aunque este elemento a veces no es considerado, nosotros lo incluimos y de hecho lo asumimos como muy importante porque subyace a la información relacional que da origen a la red. De esta forma, primero, esto origina que haya redes no dirigidas y dirigidas (Hanneman & Riddle, 2011); segundo, que la información relacional junto con la dirección y flujo ayudará a interpretar la red y sus vínculos. Otra característica que se desprende de la dirección o flujo, cuando ésta existe, es que los vínculos entre los actores empiezan a formar lo que se conocen como "caminos" por los cuáles se pude movilizar "algo" o hacen que distintos puntos de la red se pueden alcanzar indirectamente a través de esos "caminos". Por ejemplo, en la Figura 1 puede verse que el nodo A puede alcanzar a B vía dos caminos: (1)

C → E → F o (2) C → D → F; pero, B no puede llegar hacía A porque no hay "camino" posible. Es así que, recursos que parecieran socialmente no accesibles por algunos actores, pueden ser alcanzados de forma indirecta a través de diversos nodos (Granovetter, 1973).

6.3.2. Tipos de redes

Una vez explicados los elementos que componen las redes es más fácil imaginarse todas las combinaciones que podrían ocurrir y, con ello, los tipos de redes que se podrían obtener. Obviamente, la forma o tipo más simple y sencillo sería el de imaginar una red como un conjunto de nodos y vínculos (los dos primeros elementos explicados anteriormente). Pero, al añadir más información de los nodos, vínculos y su dirección o flujo es que hay muchas maneras en las que se pueden complejizar las redes (Newman, 2003).

Como ejemplo, en la Figura 2 (Newman, 2003) se muestran cuatro casos en donde se mezclan precisamente los cuatro elementos de las redes. Así tenemos en el inciso (a) una red simple, representando una red no dirigida, con un solo tipo de vértice, al igual que un solo tipo de vínculo; en el inciso (b), también se representa una red no dirigida, pero ahora con distintos tipos de vértices, al igual que diferentes tipos de vínculos; en el inciso (c), nuevamente se presenta una red no dirigida, con la variante de tener un atributo para los nodos representado por su tamaño, lo mismo para los vínculos que se notan ponderados, por su grosor; por último, en el inciso (d) se mues-

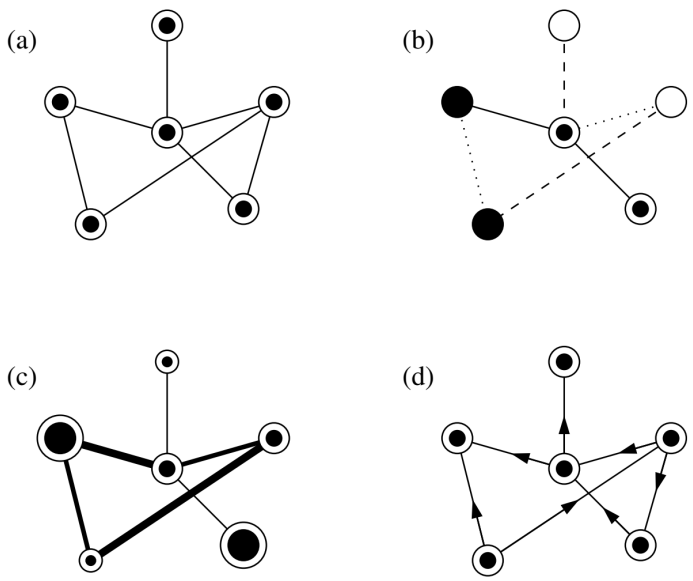


Figura 2. Ejemplos de varios tipos de redes combinando los elementos explicados en la Figura 1

Fuente: Newman (2003).

tra una red con los vínculos dirigidos o mostrando un flujo, pero ni los nodos ni los vínculos poseen alguna otra característica distintiva. Obsérvese cómo, derivado de los cuatro elementos de las redes, podrían existir más ejemplos que los mostrados anteriormente; de hecho una red de ejemplo que podría conjuntar todos los elementos sería el de una red con vínculos dirigidos y en donde, tanto los nodos como los vínculos, mostraran algún tipo de atributo; es decir, una mezcla de los incisos (b), (c) y (d).

6.4. Categorías, redes en el mundo real

Uno de los temas que siempre ha interesado al analizar redes, es la estructura que éstas tienen y que obviamente provienen de los vínculos o relaciones existentes entre los elementos que conforman dichas redes. Al lograr analizar la estructura de las redes (Newman, 2003), por tanto, también es posible conocer sus propiedades de forma numérica y esto, a su vez, ha permitido el modelado de redes enormes, de miles o millones de nodos con millones de vínculos entre ellos; por ejemplo una red de links entre páginas de internet formada por (redondeando) 326 mil páginas y 1.5 millones de relaciones entre ellas (Albert et al., 1999).

Lo anterior ha sido de gran importancia en el área de sistemas y de complejidad porque precisamente la estructura de un sistema siempre afecta la función del mismo (Boccaletti et al., 2006; Strogatz, 2001); por ejemplo, la estructura de la red puede afectar el tráfico de internet o el desempeño de un motor de búsqueda en una página de internet; también, la estructura de una red social afecta la difusión de información o incluso de una enfermedad (Strogatz, 2001). Así mismo, la estructura de una red puede afectar la dinámica de sistemas sociales o biológicos, entre otros (Newman, 2003). En este sentido, al entender la anatomía de una red, es posible saber o inferir cómo funciona el sistema e incluso intervenirlo y, con ello, modificarlo. Y no sólo lo anterior aplica a nivel de red; desde una perspectiva de sistemas, a nivel subsistema, también se sabe que, a nivel individual, un nodo puede desempeñarse de diferente forma o tener acceso a distintos recursos dependiendo en parte por la posición que tiene en la estructura de la red completa (Borgatti et al., 2013).

De esta forma, en la actualidad, estudios empíricos han revelado la tipología de diferentes redes complejas reales, entre ellas redes tróficas, redes eléctricas, redes de llamadas de celular, redes de metabolitos, redes de internet, redes de coautoría de autores o de colaboración, redes de citación, etcétera. Esto, a su vez, ha sido posible por los avances en cuanto a la accesibilidad de datos e información (muchas veces facilitada por el internet) y también por computadoras cada vez con mayor poder de procesamiento y análisis (Newman, 2003).

Derivado de lo anterior, principalmente por la evidencia empírica generada del análisis de sistemas complejos vía el uso de redes, se ha desarrollado una clasificación de redes de cuatro categorías (Barabási, 2013; Newman, 2003; Strogatz, 2001), mismas que se desglosan enseguida y que son: redes sociales, redes de información, redes tecnológicas y, por último, redes biológicas.

6.4.1. Redes sociales

Se considera que una red social es un conjunto de actores (generalmente personas) o de grupos de actores que tienen contactos o interacciones entre ellos (Wasserman & Faust, 1994). Aunque los nodos en una red de este tipo pueden representar casi cualquier cosa, en las redes sociales se hace énfasis en que los nodos son actores o agentes activos (Borgatti et al., 2013), como se ha dicho, por lo regular hablamos de personas.

Por lo anterior, existen múltiples ejemplos de este tipo de redes. La investigación en redes sociales es un tema "candente" hoy en día: en el 2009 se decía que el tema de "redes sociales" (expresado vía artículos indexados en *Web of Science*) se había triplicado en la década pasada (Borgatti et al., 2009). Una de las características que se destaca, y de ahí su relevancia, es que a través de este enfoque se puede analizar la interacción social, donde dicha interacción entre individuos podría tener distintos objetivos; por ejemplo, redes de amistad, redes de comunicación, redes de intercambio de información, redes de negocios, etcétera.

Nótese que, en estos ejemplos, la interacción es explícita precisamente por el tipo de red y, de hecho, le da nombre a la misma; por otra parte, en este tipo de redes está implícito que es entre individuos o actores sociales. Es decir que, en la red de amistad existirá un vínculo entre individuos que se consideren a sí mismos como amigos; en la red de comunicación, el vínculo entre dos individuos implicará que entre ellos se comunican; en la red de intercambio de información la conexión entre actores o individuos significará que entre ellos intercambian información, etcétera. De esta forma es que se considera que el dato relacional o el vínculo entre actores es la unidad básica del análisis de redes sociales (de Nooy et al., 2005; Wasserman & Faust, 1994).

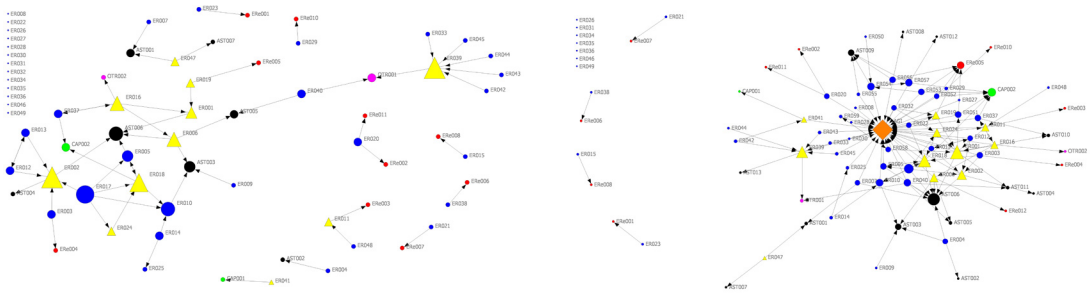
En ese sentido, las redes sociales por lo regular se distinguen por los tipos de vínculos o datos relacionales entre los actores o nodos, mismos que se han clasificado en cuatro (Borgatti et al., 2013): **(1) Vínculos por similaridad o similitud,** es decir, dos personas pueden estar vinculadas por tener características similares; entre ellas, similitud por vivir en la misma localidad, pertenecer a un mismo grupo social (e.g., un club) o por tener los mismos atributos (e.g., género). **(2) Relaciones sociales,** en este tipo las personas están vinculadas por tener una relación social; entre ellas, vínculos de parentesco (e.g., madre de…, pariente de…, etc.), vínculos basados en roles (e.g., amigo de…, jefe de…, etc.), vínculos afectivos (e.g., le gusta a…, odia a… etc.) y vínculos cognitivos (conoce a…, sabe acerca de…, etc.). **(3) Vínculos de interacción,** este tipo describe o analiza, precisamente, las redes que emergen de la interacción social (e.g., habla con…, recibe asesoría de…, ayuda a…, etc.). Por último, **(4) Vínculos de flujo,** este tipo se utiliza para representar la transmisión de algo, obviamente, entre entes sociales o activos (e.g., recibe información de…, proporciona recursos a…, vende a…, compra de…, etcétera).

Desde el punto de vista académico, en este tipo de redes, tal y como lo indica Newman (2003), es donde las ciencias sociales han incorporado una abundante cantidad de literatura científica sobre redes sociales del mundo real, existiendo múltiples ejemplos. En específico, en el sector agroalimentario, existe evidencia de trabajos que por ejemplo analizan redes de asesoría sobre prácticas agrícolas (Isaac & Matous, 2017), el capital social entre individuos (Bodin & Crona,

2008), gestión de recursos naturales (Prell et al., 2010), intercambio de información y conocimiento (Aguilar-Gallegos et al., 2015; Aguilar-Gallegos et al., 2016; Hermans et al., 2017; Hoang et al., 2006; Simon et al., 2021), intervenciones basadas en red (Aguilar-Gallegos, Olvera-Martínez, et al., 2017), entre muchos casos más.

Como se puede apreciar, este tipo de redes son abundantes y han representado distintos fenómenos que se dan entre entes sociales. En muchos de estos casos, se usan datos e información provenientes de encuestas. En este punto cabe hacer mención que en este tipo de redes sociales es común usar una técnica conocida como *"generador de nombres"* (Marsden, 1990). Esta técnica, consiste en preguntar a cada uno de los encuestados (conocidos comúnmente como, *"egos"*) que indique o haga una lista (es decir, nombren) con quiénes está en contacto o vinculado según algún tipo de relación específico (las menciones que haga el encuestado son conocidas como *"alters"*). De esta forma, cada vez que un encuestado va nombrando a los actores con los que está vinculado, se van generando los nombres que formarán parte de la red, de ahí el mismo nombre de esta técnica. Para mayor detalle al respecto, consultar Aguilar-Gallegos, Martínez-González, et al. (2017, p. 15) que, además, incluye ejemplos de dichas preguntas. También, mayor desarrollo y profundidad en estos temas referentes a la generación de datos de red puede ser encontrado en Marsden (1990) y en Marsden (2011).

Como ejemplo de este tipo de redes sociales, sólo por mencionar algunos, en la Figura 3 se muestran dos redes analizadas en distintos tiempos. En este estudio (Aguilar-Gallegos, Olvera-Martínez, et al., 2017) se usó el enfoque de redes sociales para diseñar una intervención basada en redes, en la cual se buscó que actores sociales (productores de ganado caprino) ampliaran su capacidad de innovación a través de una intervención. Con indicadores de redes sociales (e.g., densidad, nodos sueltos, componentes, diámetro, grado de entrada y salida, entre otros) se logró ver cómo actores clave pueden ayudar a movilizar conocimiento dentro de su sistema social. En el mismo sentido, en la Figura 4 se muestran tres tipos de redes obtenidas en tres diferentes países



(a) Red social antes de una intervención.

(b) Red social después de una intervención.

Figura 3. Red social de productores caprinos en dos momentos, antes (a) y después (b) de una intervención

Fuente: Aguilar-Gallegos, Olvera-Martínez, et al. (2017).

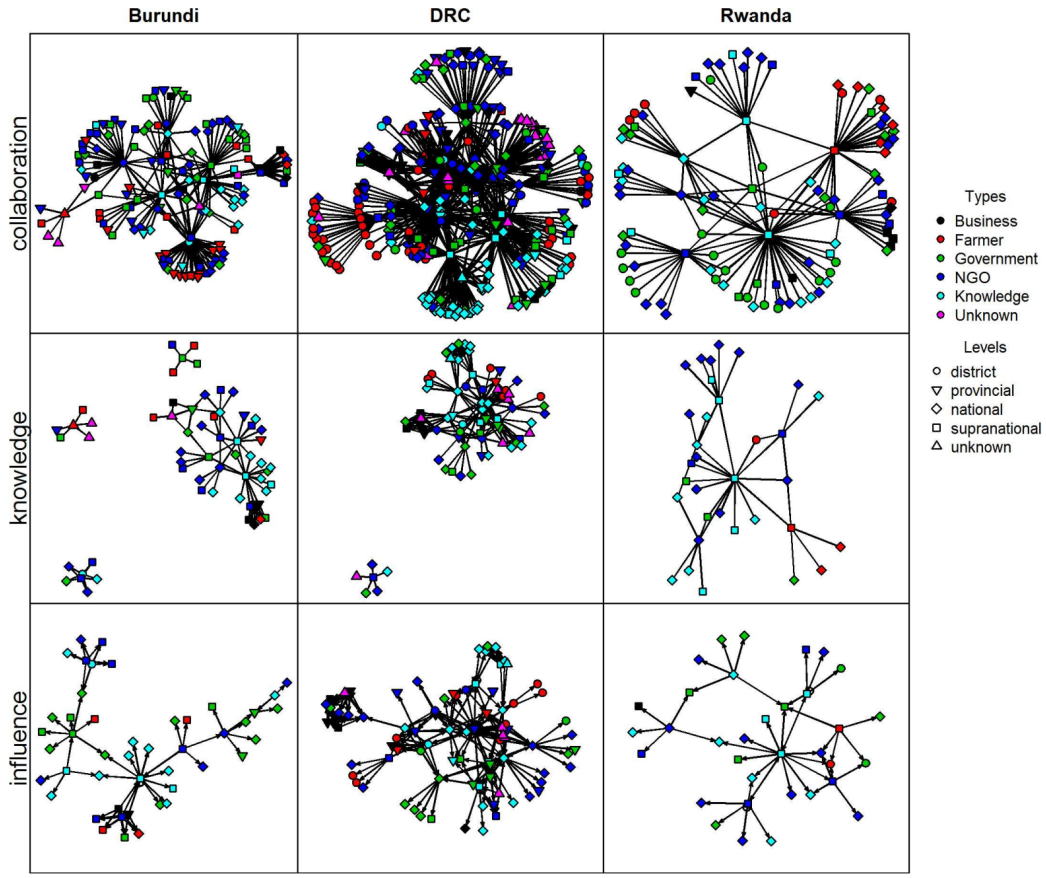


Figura 4. Redes sociales que representan tres tipos de vínculos en tres países

Fuente: Hermans et al. (2017).

(Burundi, República Democrática del Congo y Ruanda). En este estudio (Hermans et al., 2017) se analizan las redes sociales entre actores involucrados en iniciativas de investigación y desarrollo agrícola. Como resultado, se obtuvieron tres tipos de relaciones, que fueron: colaboración, intercambio de conocimiento e influencia. El trabajo resalta el aporte que hace y puede hacer el enfoque de redes sociales junto con otras técnicas para identificar las fortalezas y limitantes que tienen los sistemas analizados.

6.4.2. Redes de información

Este tipo de redes también son conocidas como redes de conocimiento. Para explicar este tipo de redes (Newman, 2003), el ejemplo característico son las redes de citación entre artículos científicos o académicos. En este tipo de trabajos los artículos citan trabajos anteriores publicados por otros autores sobre temas específicos. De esta forma, cuando un artículo, digamos A, cita a otro

artículo, digamos B, se forma un vínculo dirigido desde A hacia B (A → B, se lee que A cita a B) y así sucesivamente. De hecho, A no sólo cita a B y puede ser probable que B no sea citado sólo por A. Por tanto, a través del análisis de citación de artículos en un área o temática especifica, es que se podría analizar la estructura de una red de citación.

En este sentido, se reconoce que este tipo de redes son de información o conocimiento porque la estructura de la red refleja la estructura de la información contenida en los vértices o nodos, en este caso los artículos científicos (Newman, 2003). Además, al explorar las redes de citación, es posible describir de manera más amplia la naturaleza de la información contenida en dichas redes (Price, 1965) y, por tanto, del conocimiento generado alrededor de las temáticas analizadas. De esta forma también ha sido posible analizar lo que se conoce como "colegios invisibles" (Crane, 1972); es decir, la comunicación formal e informal que se genera a través de los patrones de citación de publicaciones científicas (Teixeira, 2011).

El análisis de lo anterior se vuelve más interesante porque en este tipo de redes de citación se tiene la característica de que se forman redes acíclicas; es decir, si A → B es muy difícil, o casi imposible, que B → A. Esta característica se debe a que un artículo que se esté escribiendo sólo puede citar a un artículo ya escrito y, además, no puede citar un artículo aún no escrito (quizás en proceso sí). Lo anterior, a su vez, lleva a considerar que algunas medidas derivadas del análisis de redes no pueden o no deberían ser aplicadas a la ligera; por ejemplo, por la característica mencionada de redes acíclicas, la densidad de estas redes tiende a ser muy baja.

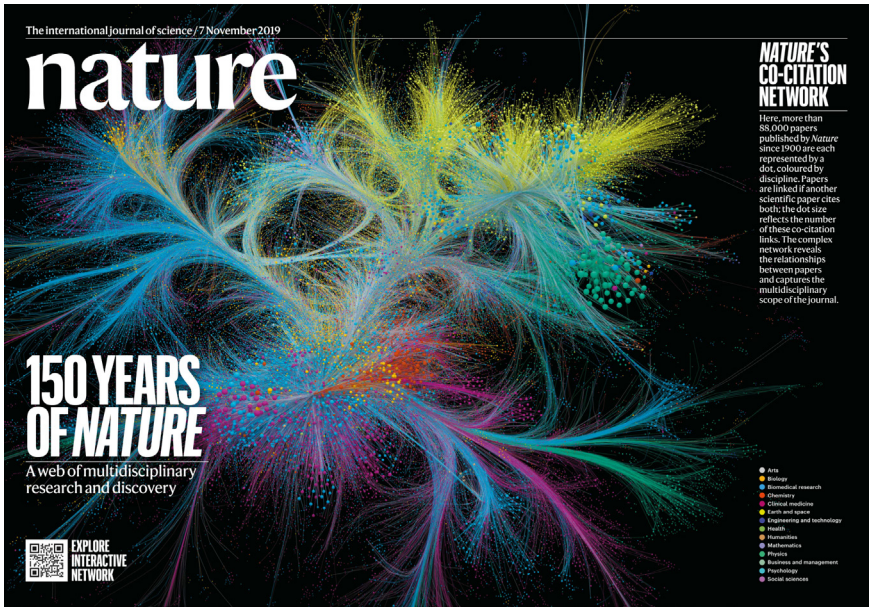


Figura 5. Red de co-citación del 150 aniversario de Nature

Fuente: Gates et al. (2019).

En las redes de información, otro clásico ejemplo para su explicación (Newman, 2003) son las redes de internet (las no físicas, en comparación con una red de cableado de internet). En estas redes, es común considerar que una página de internet representa un nodo en la red, la cual se vincula a otra página de internet a través de los links (*hyperlinks*) que contiene y así sucesivamente. Estas redes de internet también se consideran de información debido a que la red se forma por la información contenida en las páginas de la web. Estas redes tienen la característica, a diferencia de las redes de citación, de que se pueden formar redes cíclicas; es decir, si A tiene un link hacia B (A → B) es posible que B pueda tener también un link hacia A (B → A). Uno de los ejemplos emblemáticos en este tema es el análisis de páginas web realzado por Albert et al. (1999).

El estudio tanto de las redes de citación como las de internet (no físicas) ha impulsado enormemente el desarrollo de indicadores, modelos y rutinas de análisis en sus respectivas áreas de conocimiento, pero también del enfoque de redes. Principalmente porque, en este tipo de redes de información, se trata con miles y millones de nodos con miles y millones de vínculos entre ellos,

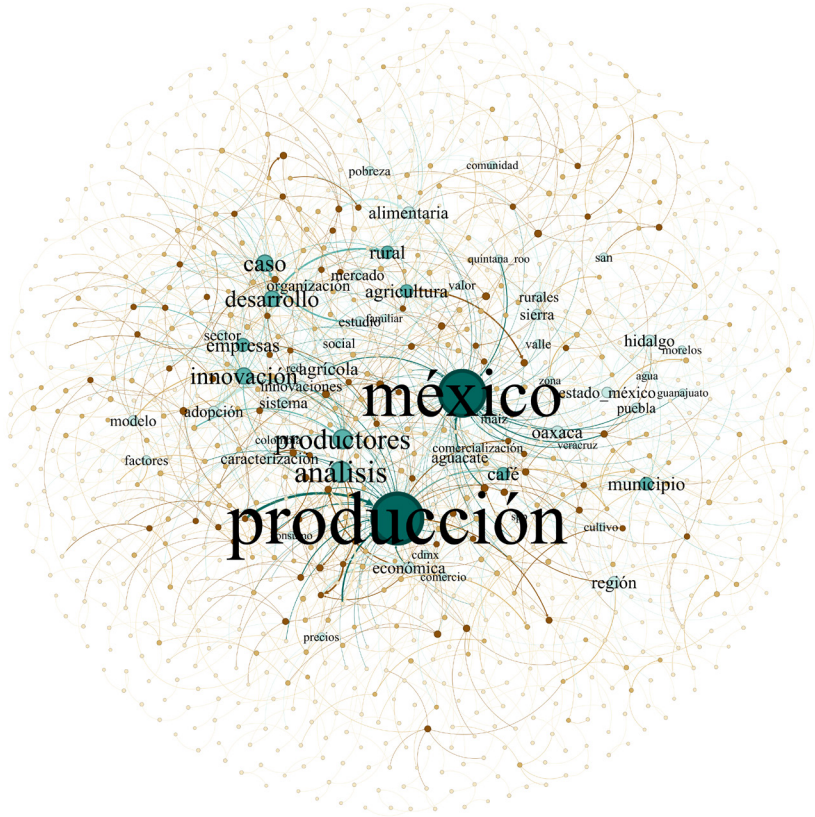


Figura 6. Red de bi-gramas sobre el mapeo del conocimiento que se comunica en eventos académicos

Fuente: Aguilar-Gallegos y Romero-García (2023).

que a su vez necesitan de mucho trabajo humano y capacidad computacional para ser desarrollado. Por ejemplo, para celebrar los 150 años de publicación de Nature (ver https://www.nature.com/immersive/d42859-019-00121-0/index.html para mayor detalle), Gates et al. (2019) analizaron una red de co-citación de más de 88 mil artículos donde dos nodos están vinculados si un tercero citaba a ambos obteniendo la red que se muestra en la Figura 5.

Es importante comentar que este tipo de redes de información también podría ser analizada desde la perspectiva de redes sociales, pero desde un enfoque que pusiera más énfasis en los autores de los artículos o en los autores de blogs o páginas web. De esta forma, la red estaría formada por individuos. De hecho, se tienen múltiples ejemplos de este tipo de análisis a través de redes conocidas como bipartitas o redes modo-dos. En estas últimas, se toma la relación de dos conjuntos de elementos (por ejemplo, artículos – autores) y se procesan los datos para obtener la coparticipación de autores dentro de los artículos; con ello, para analizar lo que se conoce como redes de colaboración científica. Por ejemplo, Núñez-Ríos et al. (2020) proponen un diseño sistémico para la auto suficiencia alimentaria y para ello parten de un análisis de redes bipartitas de 194 artículos científicos.

Por último, existen otros ejemplos de redes de información en otras áreas del conocimiento, entre ellas las redes de preferencias que además están basadas en redes bipartitas. En este tipo de redes se analiza la preferencia de los individuos por distintos objetos u otro tipo de elementos, por ejemplo, películas, libros, etcétera. También existen otro tipo de redes de información que hacen énfasis en redes semánticas o de análisis de texto, por ejemplo, recientemente Aguilar-Gallegos y Romero-García (2023) mapearon la red de conocimiento que se comunica en eventos académicos usando los títulos de las ponencias orales que en esos eventos se han realizado. Para ello, formaron una red de bi-gramas en donde las palabras se conectaban considerando la consecución de éstas dentro de los títulos mencionados (Figura 6). A través de este análisis los autores encontraron temáticas muy abordadas en los eventos, así como brechas de conocimiento que podrían ser tratados en futuras investigaciones.

6.4.3. Redes tecnológicas

Este tipo de redes tienen la característica de que son comúnmente diseñadas, creadas y desarrolladas por la mano del hombre; es decir, se considera que son redes físicas (Newman, 2003). Estas redes tecnológicas son usadas para transportar productos o mercancías u otro tipo de recursos como la electricidad o incluso información (sobre todo digital). Por tanto, son redes que se caracterizan por distribuir algún tipo de recurso, producto o incluso personas. De esta forma, entre los ejemplos de redes tecnológicas se tienen rutas de aerolíneas, carreteras, vías férreas, tráfico peatonal, rutas de entrega de paquetería, la conexión física del internet o el cableado de sistemas electrónicos, etcétera.

Otra característica de las redes tecnológicas es que están formadas por un gran número de nodos altamente conectados, pero sobre todo que su dinámica relacional es muy dinámica (Boccaletti et al., 2006). Imagine la complejidad de las rutas y del tráfico que tienen las aerolíneas; o

también la dinámica de las rutas de entrega que tienen los servicios de paquetería, desde los puntos de origen o envío hasta los puntos de destino o remitentes, pasando incluso por distintos puntos intermedios, como son los almacenes; o incluso, la dinámica que tiene el tráfico peatonal en una ciudad, en donde un individuo puede tener múltiples puntos de destino, dependiendo de su rutina o incluso el día de la semana, entre otros.

Adicionalmente, se ha encontrado que la estructura de las redes tecnológicas, al considerarse en muchos casos como redes físicas, está claramente gobernada hasta cierto punto por el espacio físico y la geografía (Newman, 2003); por tanto, su expansión o crecimiento, así como su dinámica, está limitada geográficamente hablando.

Por último, otra característica más de las redes tecnológicas es que éstas pueden ser la base de otro tipo de redes (Boccaletti et al., 2006); por ejemplo, sociales o de información. Es decir, otras redes pueden "montarse" sobre las redes tecnológicas, el caso más sencillo es el de la red tecnológica del internet, en donde posteriormente, a partir de distintos sitios web, se puede compartir y hacer fluir información; por tanto, se "monta" una red de información. Lo mismo podría entenderse vía los sitios de formación de redes sociales en donde las personas interactúan unas con otras a través de perfiles sociales, por tanto, se consideraría que se "monta" una red social. Por último, y en la misma línea de ideas, una red biológica (ver siguiente tipo de red) se podría entender más en su dinámica si se considerara o se "montara" en una red tecnológica; por ejemplo, para entender alguna dinámica epidemiológica.

Para tener un ejemplo más específico se recomienda ver a Miritello et al. (2013) que analizan los vínculos de comunicación entre individuos anonimizados (que representaría una red social),

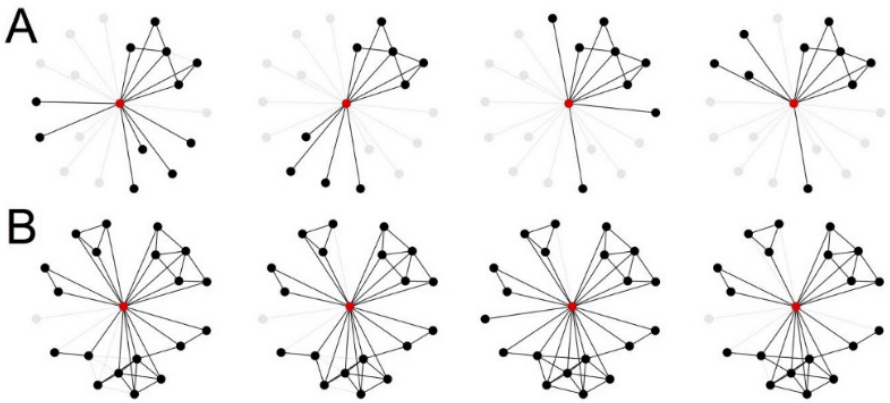


Figura 7. Variabilidad en la capacidad y actividad de comunicación vía teléfonos móviles en cuatro diferentes tiempos

Fuente: Miritello et al. (2013).

tomando como base las llamadas por teléfono móvil entre ellos (que representaría la red tecnológica), de hecho, los datos que usan provienen de un solo operador de telefonía móvil. En la Figura 7 se presenta un ejemplo incluido en el artículo referido y que muestra la capacidad y actividad de comunicación de dos individuos (A y B) en cuatro diferentes tiempos; los autores argumentan que el número de conexiones creadas tiende a ser proporcional a la capacidad de comunicación de los individuos. Otro ejemplo (Lichoti et al., 2017) analiza cómo la infraestructura de transporte de ganado porcino, así como los comerciantes y puntos de venta del mismo, podrían facilitar/mitigar la transmisión de enfermedades de esa especie animal; en la Figura 8 se presenta una de las redes que conforman el artículo y donde se muestra la red de comerciantes y lugares (pueblos) en donde compran el ganado porcino.

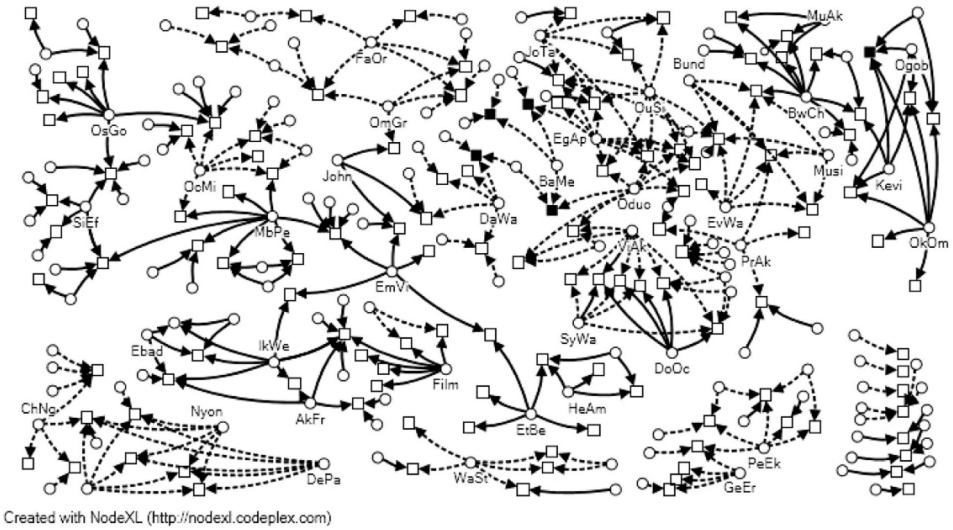


Fig. 3. Network of traders and villages where they purchased pigs, Kenya and Uganda border 2012–2013. Unidirectional arrows in Fig. 3 each represent a trader moving to a village. Nodes comprise (a) the interviewed traders (Circle nodes with code names), (b) the traders that were mentioned by the interviewed traders (Circle nodes without code names), (c) villages where the traders sourced pigs from (shown as square nodes). Traders gave several villages where they purchased pigs. The dotted edges represent Kenyan traders while the solid edges represent Ugandan traders.

Figura 8. Red de comercialización de ganado porcino

Fuente: Lichoti et al. (2017).

6.4.4. Redes biológicas

Este es el último tipo de redes en las cuales se han clasificado diversos sistemas biológicos complejos, mismos que han sido representados con la ayuda de redes. Tal y como lo indica Newman (2003), el clásico ejemplo de una red biológica es la red de rutas metabólicas, la cual es una representación de sustratos y productos metabólicos que llegan a estar unidos por vínculos dirigidos cuando existe una reacción metabólica conocida, llevada a cabo en un sustrato y dando un pro-

ducto determinado. Otros ejemplos del mundo real que se han analizado y son mencionados por el mismo autor son: interacciones entre proteínas, redes de regulación genética, redes que forman los vasos sanguíneos en el cuerpo, entre otras.

Adicionalmente, seguro que más de uno puede imaginar o recordar en los temas de biología sobre las redes tróficas en que, vistos desde el lente del análisis de redes, los nodos representan las especies y los vínculos existentes entre ellos indicarían que si A → B, A se alimenta de B y así sucesivamente. En el mismo orden de ideas, otros casos más avanzados en estos temas son las redes neuronales.

En este sentido, gracias a los aportes que el enfoque del análisis de redes ha realizado en el área de la medicina, salud y biotecnología, es que actualmente se conoce y se está expandiendo un área conocida como "*network medicine*" (Barabási et al., 2011). Recientemente, en un *review* (Yadav et al., 2020) se hace un llamado a la importancia de analizar sistemas celulares complejos desde una perspectiva de red como algo esencial para mejorar el entendimiento de los mecanismos de ciertas enfermedades, pasando de una visión centrada en los genes a una visión centrada en redes (Figura 9). Lo anterior, además, reconociendo de que ya existe evidencia de los aportes

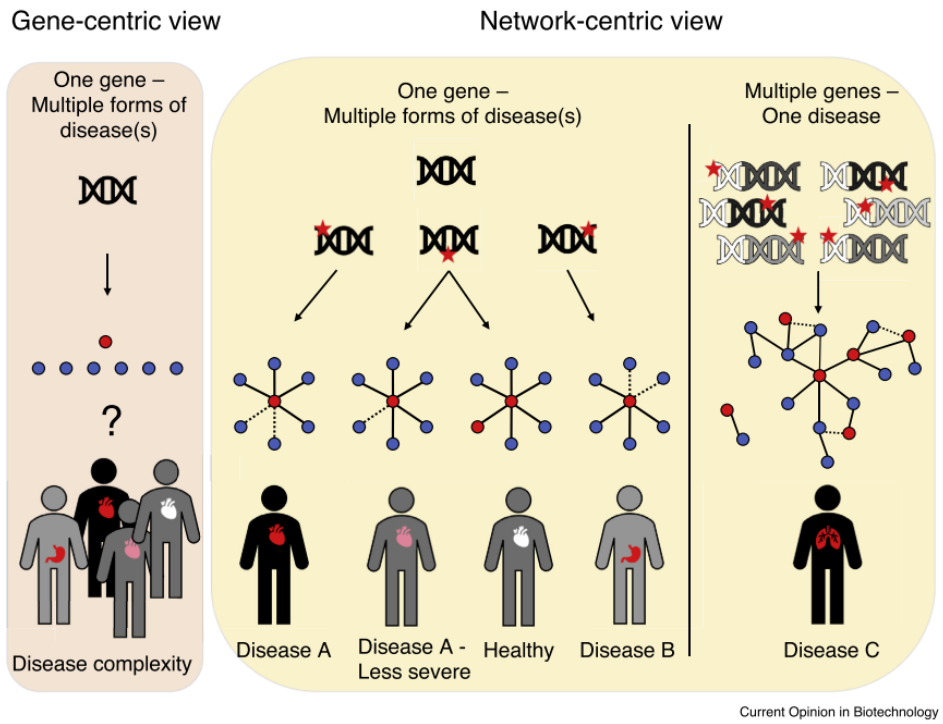


Figura 9. Comparación de un enfoque centrado en genes a uno centrado en redes para la medicina de precisión, como un ejemplo de redes biológicas

Fuente: Yadav et al. (2020).

que ha hecho el enfoque de redes a la medicina de precisión (Yadav et al., 2020) desde la identificación de genes asociados a enfermedades hasta mejorar el objetivo de algunos fármacos (Barabási et al., 2011).

Otro ejemplo de redes biológicas lo podría constituir, de forma muy interesante, lo que se acuñó como *network flavor* (la red del sabor) y retoman y extienden la hipótesis de los principios del maridaje (emparejamiento) de alimentos. En ese artículo (Ahn et al., 2011), los autores se plantean si existen patrones generales que determinan las combinaciones de ingredientes que se utilizan en la comida o si hay principios que trascienden los gustos y las recetas de los alimentos. Para ello, desarrollan una red con vínculos ponderados entre ingredientes que se ocupan en recetas culinarias. Los ingredientes, entonces, se unen si comparten un número significativo de componentes o compuestos del sabor (Figura 10); los autores argumentan que con esto se abre una nueva área de entendimiento de las prácticas culinarias. También exponen, por ejemplo, que la hipótesis del maridaje (emparejamiento) de alimentos está siendo usada para buscar (por chefs y restaurantes) nuevas combinaciones de ingredientes que generen experiencias de sabor interesantes, mencionan, entre los ejemplos, que el chocolate y el queso azul comparten al menos 73 compuestos de sabor.

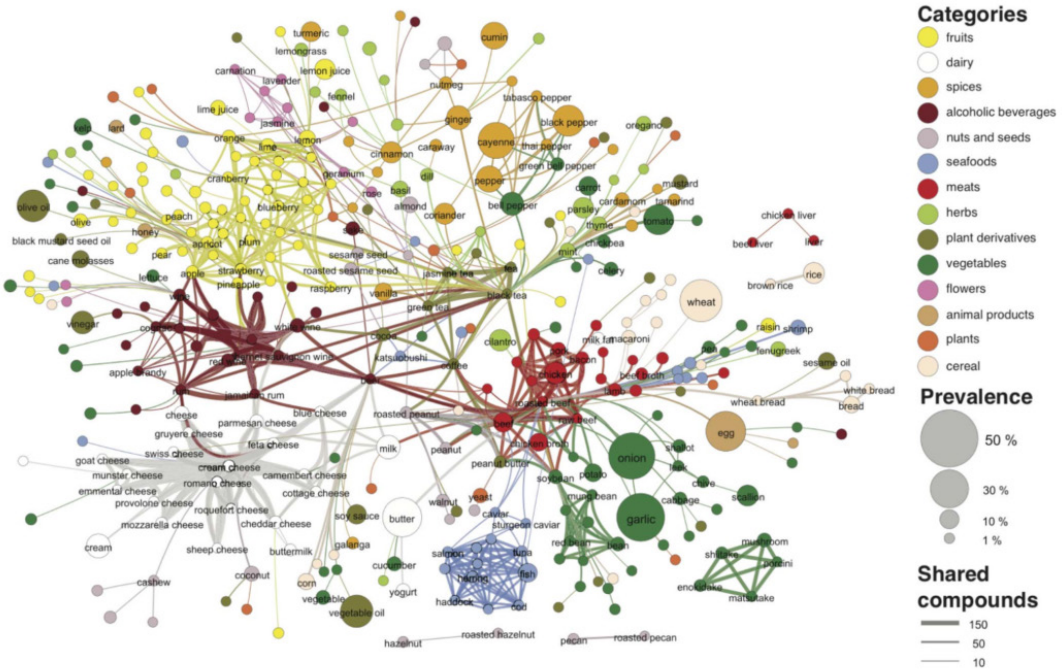


Figure 2 | The backbone of the flavor network. Each node denotes an ingredient, the node color indicates food category, and node size reflects the ingredient prevalence in recipes. Two ingredients are connected if they share a significant number of flavor compounds, link thickness representing the number of shared compounds between the two ingredients. Adjacent links are bundled to reduce the clutter. Note that the map shows only the statistically significant links, as identified by the algorithm of Refs.[28,29] for *p*-value 0.04. A drawing of the full network is too dense to be informative. We use, however, the full network in our subsequent measurements.

Figura 10. La columna vertebral de la red del sabor

Fuente: Ahn et al. (2011).

6.5. Propiedades de las redes

Los tipos de redes explicados anteriormente, así como su conexión y consideración como sistemas complejos deriva del hecho de que no es posible predecir el comportamiento del conjunto de actores a través del análisis o entendimiento individual de sus componentes. De ahí la importancia de los desarrollos y aportes que la ciencia de redes y el enfoque del análisis de redes sociales (ARS), así como otras áreas del conocimiento (e. g., teoría de grafos), han realizado a la representación, análisis, caracterización y entendimiento de las redes complejas. Justamente, relacionado con esto, es que su entendimiento se puede hacer a través de la descripción matemática de estos sistemas, vía el uso de indicadores de redes, lo cual a su vez representa uno de los grandes desafíos e intereses científicos actuales porque estos sistemas forman parte de nuestra vida diaria (Mata, 2020).

Al entender o caracterizar estos sistemas complejos, matemáticamente hablando, entonces, podríamos predecirlos, intervenirlos y, por tanto, modificarlos y controlarlos. Por ejemplo, imagine la complejidad que representó la transportación y el movimiento del humano y su relación con la expansión del COVID-19; qué hubiera pasado si este sistema se hubiera podido modelar y, por tanto, intervenir; de hecho, hubo algunos intentos de esto. Otro caso ya mencionado, es el análisis de cómo se transporta el ganado y su relación con la difusión de una enfermedad (Lichoti et al., 2017). De la misma forma, imagine analizar el sentimiento de los comentarios escritos por usuarios de redes sociales para ver cómo distintos sentimientos están asociados a comportamientos, a eventos regionales o, incluso, a las épocas del año.

Adicionalmente, tal y como se ha indicado, durante las últimas décadas distintos fenómenos y avances tecnológicos han permitido explorar las características estructurales de diferentes sistemas complejos representados con el uso de redes (Boccaletti et al., 2006), entre estos están la creciente disponibilidad de grandes bases de datos, la optimización y eficiencia de instalaciones informáticas, así como de los equipos de cómputo; además del desarrollo de herramientas y procedimientos de análisis de datos poderosos y confiables. Por ejemplo, para analizar la formación y decadencia de vínculos de comunicación, Miritello et al. (2013) estudiaron los registros detallados de llamadas (CDR: *Call Detail Records*, en inglés) de un único operador de telefonía móvil durante 19 meses, conformando una base de datos consistente en llamadas de voz de alrededor de 20 millones de usuarios con más de 700 millones de vínculos que representaban dicha comunicación. Otro caso también se puede encontrar en Aguilar-Gallegos et al. (2020), que durante 23 días al inicio de la pandemia por COVID-19 colectaron 8.98 millones de tweets que reflejaban la opinión y comunicación en torno al tema en Twitter. Posteriormente al procesamiento de datos, generaron una base de datos con 3.5 millones de nodos y casi 7.3 millones de vínculos. Al simplificar por recurrencia, y eliminando auto menciones (*loops*) en los tweets, obtuvieron 5.9 millones de vínculos ponderados.

Considerando lo anterior, y gracias a diferentes avances científicos y tecnológicos, es que actualmente varios sistemas complejos de la vida real se han podido modelar y de manera muy interesante se ha visto que estos modelos o estructuras complejas tienen propiedades o princi-

pios similares (Mata, 2020). En este punto, vuelve a cobrar mucha importancia el enfoque del ARS o en su caso la ciencia de redes porque estos sistemas se han logrado modelar como un grafo o red compuesto por vértices, nodos o actores que se conectan por vínculos, aristas o relaciones.

En este sentido, uno de los primeros y grandes aportes que se han realizado es considerar que las redes del mundo real no siguen un patrón de conexión aleatorio, nos son grafos aleatorios (Newman, 2003); por tanto, se podría decir que obedecen a algo o, en su caso, que algo influye en que tengan una u otra estructura. De esta forma, a continuación, se explican tres de las más importantes características o propiedades que han demostrado tener las redes del mundo real. Cabe hacer mención que éstas no son las únicas, pero sí que son necesarias para entender otras o para fácilmente extender nuestro conocimiento sobre otras más. Con esto en mente, las propiedades que se explicarán a continuación son: el modelo *small-world* (mundo pequeño), *scale-free networks* (redes libres de escala) y *preferential attachment* (encadenamiento o unión preferencial).

6.5.1. Modelo *small-world* (mundo pequeño)

La forma más sencilla de formular o plantear el problema del mundo pequeño, según palabras de uno de los autores seminales (Milgram, 1967) es la siguiente: empezando con (imagínese) dos personas cualquiera en el mundo, ¿cuál es la probabilidad de que ellas se conozcan una a la otra? Formulando lo mismo, pero de una forma más sofisticada, tome en cuenta que mientras que dos personas (digamos X y Z) podrían no conocerse una a la otra directamente, ellas dos podrían compartir un conocido mutuo; es decir, una persona que las conozca a ambas y que por tanto los conecte. Extendiendo esta formulación, es decir, que X y Z no se pudieran conectar por un conocido mutuo, pero que lo hicieran a través de una cadena de conocidos, a través de personas mutuas en esa cadena. Entonces, esto implicaría que X podría llegar a Z a través de esa cadena de conocidos. Esto es X podría llegar de forma indirecta a Z a través de a, b, c, d, e, por ejemplo, teniendo que X → a → b → c → d → e → Z. Dado este ejemplo, se diría que X puede llegar a Z a través de cinco pasos. Justamente, Milgram (1967) le dio respuesta a esta formulación, encontrando que dos personas cualquiera pueden alcanzarse a través de seis pasos.

Con base en esto, al estudiar redes complejas reales (sistemas reales; i.e., muchos nodos y vínculos entre ellos) se ha encontrado que la distancia promedio entre los pares de nodos es corta. Por tanto, se dice que una de las propiedades de redes complejas reales es que siguen un modelo de *small-world* (Newman, 2003); por lo cual, la mayoría de los pares de nodos en esas redes parecen estar conectadas por un camino corto que puede viajar a través de la red. Es decir, en las redes del mundo real existen atajos o vínculos que sirven de puente para conectar diferentes partes de las redes (Boccaletti et al., 2006). Así, es que parte del interés de analizar una red compleja es conocer la distancia promedio entre los nodos que la conforman para ver si ésta tiene un efecto de "mundo pequeño".

Además de que, en el mundo real, se ha visto que varias redes poseen valores pequeños de distancia promedio entre sus nodos, Watts y Strogatz (1998) extendieron este modelo y demostraron que estas redes también tienden a tener altos niveles de clusterización; es decir, la tendencia

a formar subredes altamente conectadas. Esto implica que, si un nodo *i* está conectado a un nodo *j*, y éste a su vez a un nodo *k*, existe una alta probabilidad de que *i* esté también conectado con *k* (Mata, 2020).

Por tanto, se dice que una red en el mundo real (con muchos nodos y muchos vínculos) exhibe propiedades de *small-world* o mundo pequeño si los nodos que la componen tienden a formar grupos o clústers y, además, que existen nodos que puedan vincular a estos nodos, posibilitando que cualquier par se pueda alcanzar a través de pocos pasos; es decir, que la distancia promedio entre ellos sea pequeña.

Por último, esta propiedad de las redes tiene distintas implicaciones, entre ellas, por ejemplo, en la difusión de información y conocimiento entre nodos que conforman una red, la cual, si es colocada en nodos centrales y en distintos puntos de la red, puede viajar y alcanzar a más nodos rápidamente. Otro ejemplo, es la dispersión y contagio de enfermedades, entre otros.

6.5.2. *Scale-free networks* (redes libres de escala)

Esta es una propiedad que también se ha visto que poseen muchas redes que representan sistemas complejos de la vida real. Esta propiedad es muy relevante como un principio de organización de redes. En este sentido, esta propiedad significa que si medimos los grados de centralidad que tienen los nodos de una red, esta medida sigue una distribución ley de potencia o *power-law* (Barabási, 2013). Es decir, en una red con esta propiedad esperamos que existan pocos nodos altamente conectados, y muchos nodos muy poco conectados; en este último caso, que la mayoría de los nodos tengan medidas de grado menores al promedio.

En un sentido, esta propiedad de las redes en el mundo real contribuye a demostrar que la formación de vínculos en las redes y, por tanto, su formación no es aleatoria puesto que la distribución Poisson (esperada en grafos aleatorios) dista mucho de la observada, exhibiendo en muchos casos la distribución *power-law* (*scale-free)* mencionada (Boccaletti et al., 2006).

Esta propiedad se puede ver fácilmente en redes de citación, en donde existen pocos artículos altamente citados, mientras que hay muchos artículos poco citados. Lo mismo sucede para redes de colaboración científica (ver, por ejemplo, Barabási et al., 2002), en donde existen pocos autores conectados con muchos otros autores, pero la mayoría de los demás autores tienes pocas colaboraciones. Otros ejemplos mencionados por Newman (2003) están referidos a redes de internet (*World Wide Web*), redes de energía eléctrica, interacción de proteínas, redes metabólicas, redes de llamadas telefónicas, contactos sexuales, etcétera.

Adicionalmente, se ha visto que en la dinámica de comentarios y opiniones acerca de temas concretos en medios sociales, en específico Twitter, existen pocas cuentas muy activas y altamente conectadas a otras, mientras que existen muchas cuentas poco activas y escasamente conectadas (Aguilar-Gallegos et al., 2019, 2022; Lucio-Mendiola et al., 2022). Esta misma propiedad se ha

encontrado en el análisis de texto de comunicaciones científicas, en donde hay pocas palabras altamente utilizadas y hay muchas poco usadas en los títulos (Aguilar-Gallegos & Romero-García, 2023).

6.5.3. *Preferential attachment* (encadenamiento o unión preferencial)

Este modelo fue propuesto por Barabási y Albert (1999) y básicamente prueba que las redes libres de escala (*scale-free networks*) y su consiguiente distribución *power-law* (Newman, 2003) se deriva de dos mecanismos: (1) Las redes se expanden continuamente por la adición de nuevos vértices o nodos y (2) los nuevos vértices se enlazan o unen preferencialmente a lugares (otros vértices) que ya están bien conectados (Barabási & Albert, 1999). Por tanto, este modelo es considerado como un principio de organización sobre la evolución y crecimiento de las redes (Barabási, 2013).

En este sentido, imagine una red o un sistema con cierta estructura; entonces, suponga que se añaden nuevos nodos por pasos o tiempos, en donde cada nodo añadido se va a conectar a aquellos ya presentes en la red, pero la probabilidad de conexión de cada nodo estará relacionada de forma proporcional a su nivel de conexión (grado nodal) en cada paso (tiempo). Lo anterior implica que los nuevos nodos añadidos tenderán a conectarse con otros altamente conectados y que estos últimos tendrán mayor probabilidad de conexión, y viceversa. Por lo tanto, en redes que exhiben esta propiedad, por el crecimiento mismo de la red, los nodos comenzarán a formar lo que se conoce como *hubs* y éstos se volverán más grandes con el tiempo (Barabási, 2013). Así, se puede indicar que esta propiedad de enlace preferencial tiene implicaciones interesantes en la dinámica que muestran ciertas redes del mundo real en el tiempo (Mata, 2020).

Además, como se indicó, esta propiedad es la que ayuda a explicar que redes que crecen con esta dinámica tienden a formar redes libres de escala (*scale-free networks*). Por tanto, se reconoce que esta propiedad indica que el crecimiento y el enlace preferencial juegan un papel importante en el desarrollo de redes (Barabási & Albert, 1999). Con lo anterior, es posible caracterizar sistemas complejos vía redes para saber si se comportan o siguen patrones de este tipo; es decir, si tienen o no este tipo de propiedades.

En el artículo original referido (Barabási & Albert, 1999), los autores mencionan que esta propiedad se ha visto en diferentes sistemas complejos, entre ellos redes de negocios, redes sociales que describen individuos u organizaciones, redes de transporte, etc. Otro ejemplo muy común se encuentra, en redes de citación, en donde artículos altamente citados atraen mayor número de citas por el simple hecho de que de por sí ya son muy citados. Otro clásico ejemplo se tiene en la estructura de la información o documentos que componen la Web, pues ésta se expande por la adición de nuevos documentos, páginas o sitios, donde nuevas adiciones son más tendientes a vincularse con sitios más viejos o bien conocidos que justamente son sitios altamente conectados por diferentes partes (Barabási, 2013).

6.6. Conclusiones

Este capítulo ha buscado brindar una perspectiva introductoria al tema del análisis de redes sociales (ARS) considerando su uso para el estudio de la complejidad de sistemas con estructuras complejas; lo cual, indudablemente, nos ha llevado a hacer un breve recorrido al tema de redes complejas. Esto lo hemos hecho presentando y explicando los elementos y tipos de redes; posteriormente, abordando las categorías en las cuales se han dividido las redes del mundo real al representar sistemas complejos y, al final, llegando a la exploración de tres de las propiedades más importantes de las redes complejas.

Con lo anterior en mente, también queremos destacar que en la actualidad se reconoce ampliamente que varios fenómenos sociales, tecnológicos, biológicos, entre otros, necesitan ser abordados desde una perspectiva de sistemas y de red. Esto para tener un entendimiento y un análisis más amplio de ellos. Visiones lineales o simplistas de la realidad ya han quedado rebasados por visiones sistémicas y de redes. Lo anterior debido a que estos enfoques ya cuentan con desarrollos y aportes teóricos, metodológicos y matemáticos para analizar las propiedades de las redes y, por ende, representar y entender la complejidad de sistemas del mundo real. Como hemos visto a lo largo de este documento, existe evidencia de esto al analizar y estudiar diversos ejemplos reales.

Así mismo, esto ha llevado a que el pensamiento de sistemas, junto con el enfoque del ARS y el de redes complejas, han empezado a ser esenciales en varias ramas de las ciencias. Esto se ha visto reflejado en la emergencia, crecimiento y consolidación de lo que hoy se conoce como "*network science*" o "ciencia de redes", y de ahí algunas otras áreas del conocimiento que toman como base los aportes de ésta y del ARS; por ejemplo, el "*network medicine*". Así mismo, en la actualidad, ya no es raro encontrar Universidades e Instituciones a lo largo del mundo que ofertan programas de licenciatura y posgrado o incluso especialidades basadas en el pensamiento de redes, del ARS o de ciencia de redes. Incluso, en el ámbito de la escritura y publicación de artículos científicos, existen revistas muy prestigiadas sobre el tema de redes, entre ellas *Social Networks*, *Applied Network Science*, REDES Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales, entre otras.

Por último, creemos que, aunque el tema abordado en este documento es muy promisorio, uno de los principales retos radica en el nivel de especialización y de conocimiento necesario para su aplicación en términos amplios. Donde, además, el uso de software y de otras herramientas especializadas es un requisito, por lo cual existe una curva de aprendizaje amplia y que los interesados en estos temas deben recorrer. En este sentido, esperamos que este documento sirva como introducción al tema y también como un llamado a la comunidad académica y científica (principalmente en español) para seguir ampliando nuestro conocimiento al respecto y generando evidencia empírica sobre sistemas y redes de la vida real.

Obviamente, este documento sólo es introductorio pues existen muchos temas relacionados que no han sido ni suficientemente abordados y otros que, incluso, no fueron mencionados. Entre estos, por ejemplo, dentro del modelo de enlace preferencial (*preferential attachment*) hay algunas variantes como son el *fitness model* y el *homophilic model* que toman en cuenta caracterísi-

cas de los nodos a los cuáles otros prefieren unirse precisamente por tener características deseables o destacadas. Otro tema muy interesante es la resiliencia de las redes, que puede representar ventajas y desventajas según sea el caso o el sistema que represente la red. Tampoco hemos profundizado en toda la variedad de indicadores o medidas derivadas del análisis de redes, de las redes dinámicas e incluso de redes multicapa, entre muchos temas más. Un tópico que merece la pena tener en consideración y que hay que mencionar, porque sólo se tocó muy rápido en el transcurso de este capítulo, son las redes bipartitas o redes modo-dos, que recientemente han tenido mucho uso y su alcance de análisis es amplio. De hecho, este tipo de redes se han estudiado dentro de las cuatro categorías de redes en el mundo real. También son redes muy prometedoras porque existen muchos ejemplos o situaciones de la vida real en donde las podemos ver y, además, donde la información para estudiarlas es amplia; por ejemplo, redes de autores – artículos, redes de actores – películas, redes de ingredientes – alimentos, etcétera.

Para aquellos que gusten profundizar en los temas abordados en este documento y consultar obras más especializadas es recomendable la consulta de libros como *"Network science"* (Barabási, 2016) o *"Networks, an introduction"* (Newman, 2010). De hecho, del primer libro existe una versión en español publicada recientemente. De igual forma, libros con fundamentos importantes relacionados en específico al enfoque del ARS, son: *"Social Network Analysis: methods and applications"* (Wasserman & Faust, 1994) o *"Exploratory Social Network Analysis with Pajek"* (de Nooy et al., 2005). Más recientemente, un libro muy específico para el ARS y el manejo de uno de los software más usados sobre el tema: UCINET y NetDraw, sería *"Analyzing social networks"* (Borgatti et al., 2013). Por último, una obra más práctica, y que se focaliza en conceptos y uso del ARS, presentando una explicación más aplicada, sería el de "Análisis de redes sociales: Conceptos clave y cálculo de indicadores" (Aguilar-Gallegos, Martínez-González, et al., 2017).

6.7. Referencias

Aguilar-Gallegos, N., Klerkx, L., Romero-García, L. E., Martínez-González, E. G., & Aguilar-Ávila, J. (2022). Social network analysis of spreading and exchanging information on Twitter: the case of an agricultural research and education centre in Mexico. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, *28*(1), 115–136. https://doi.org/10.1080/1389224X.2021.1915829

Aguilar-Gallegos, N., Martínez-González, E. G., & Aguilar-Ávila, J. (2017). *Análisis de redes sociales: Conceptos clave y cálculo de indicadores*. Universidad Autónoma Chapingo (UACh), Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM). Serie: Metodologías y herramientas para la investigación, Volumen 5.

Aguilar-Gallegos, N., Martínez-González, E. G., Aguilar-Ávila, J., Santoyo-Cortés, H., Muñoz-Rodríguez, M., & García-Sánchez, E. I. (2016). Análisis de redes sociales para catalizar la innovación agrícola: de los vínculos directos a la integración y radialidad. *Estudios Gerenciales*, *32*(140), 197–207. https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.06.006

Aguilar-Gallegos, N., Muñoz-Rodríguez, M., Santoyo-Cortés, H., Aguilar-Ávila, J., & Klerkx, L. (2015). Information networks that generate economic value: A study on clusters of adopters of new or improved technologies and practices among oil palm growers in Mexico. *Agricultural Systems*, *135*, 122–132. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.01.003

Aguilar-Gallegos, N., Olvera-Martínez, J. A., Martínez-González, E. G., Aguilar-Ávila, J., Muñoz-Rodríguez, M., & Santoyo-Cortés, H. (2017). La intervención en red para catalizar la innovación agrícola. *REDES. Revista Hispana Para El Análisis de Redes Sociales*, *28*(1), 9–31. https://doi.org/10.5565/rev/redes.653

Aguilar-Gallegos, N., & Romero-García, L. E. (2023). Mapeando la comunicación del conocimiento agrícola, una aplicación del análisis de redes sociales. *REDES. Revista Hispana Para El Análisis de Redes Sociales*, *34*(2), 201–222. https://doi.org/10.5565/rev/redes.995

Aguilar-Gallegos, N., Romero-García, L. E., Martínez-González, E. G., García Sánchez, E. I., & Aguilar-Ávila, J. (2020). Dataset on dynamics of Coronavirus on Twitter. *Data in Brief*, *30*, 105684. https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105684

Aguilar-Gallegos, N., Valdés-López, A., Muñoz-Rodríguez, M., Martínez-González, E. G., Santoyo-Cortés, H., & Aguilar-Ávila, J. (2019). Análisis de redes en Twitter para la inserción en comunidades: el caso de un producto agroindustrial. *Interciencia*, *44*(2), 75–81. https://www.interciencia.net/volumen-44-2019/volumen-44-numero-02/

Ahn, Y.-Y., Ahnert, S. E., Bagrow, J. P., & Barabási, A.-L. (2011). Flavor network and the principles of food pairing. *Scientific Reports*, *1*(1), 196. https://doi.org/10.1038/srep00196

Albert, R., Jeong, H., & Barabási, A.-L. (1999). Diameter of the World-Wide Web. *Nature*, *401*(6749), 130–131. https://doi.org/10.1038/43601

Barabási, A.-L. (2013). Network science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *371*(1987), 20120375. https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0375

Barabási, A.-L. (2016). *Network science*. Cambridge University Press.

Barabási, A.-L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, *286*(5439), 509–512. https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509

Barabási, A.-L., Gulbahce, N., & Loscalzo, J. (2011). Network medicine: a network-based approach to human disease. *Nature Reviews Genetics*, *12*(1), 56–68. https://doi.org/10.1038/nrg2918

Barabási, A.-L., Jeong, H., Néda, Z., Ravasz, E., Schubert, A., & Vicsek, T. (2002). Evolution of the social network of scientific collaborations. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *311*(3–4), 590–614. https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00736-7

Bertalanffy, L. von. (1968). *General System Theory: foundations, development, applications*. George Braziller.

Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, *424*(4–5), 175–308. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009

Bodin, Ö., & Crona, B. I. (2008). Management of natural resources at the community level: Exploring the role of social capital and leadership in a rural fishing community. *World Development*, *36*(12), 2763–2779. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2007.12.002

Borgatti, S. P., Everett, M. G., & Johnson, J. C. (2013). *Analyzing social networks*. SAGE Publications Limited.

Borgatti, S. P., Mehra, A., Brass, D. J., & Labianca, G. (2009). Network analysis in the social sciences. *Science*, *323*(5916), 892–895. https://doi.org/10.1126/science.1165821

Crane, D. (1972). *Invisible colleges; diffusion of knowledge in scientific communities*. University of Chicago Press.

de Nooy, W., Mrvar, A., & Batagelj, V. (2005). *Exploratory Social Network Analysis with Pajek*. Cambridge University Press. www.cambridge.org/9780521841733

Gates, A. J., Ke, Q., Varol, O., & Barabási, A. L. (2019). Nature's reach: narrow work has broad impact. *Nature*, *575*(7781), 32–34. https://doi.org/10.1038/d41586-019-03308-7

Gigch, J. P. van. (1978). *Applied General Systems Theory* (2nd ed.). Harper and Row Publishers.

Granovetter, M. S. (1973). The strength of weak ties. *American Journal of Sociology*, *78*(6), 1360–1380. https://doi.org/10.1086/225469

Hanneman, R. A., & Riddle, M. (2011). Concepts and measures for basic network analysis. In J. Scott & P. J. Carrington (Eds.), *The SAGE Handbook of Social Network Analysis* (pp. 340–369). SAGE Publications Ltd.

Hermans, F., Sartas, M., van Schagen, B., van Asten, P., & Schut, M. (2017). Social network analysis of multi-stakeholder platforms in agricultural research for development: Opportunities and constraints for innovation and scaling. *PLoS ONE*, *12*(2), e0169634. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169634

Hoang, L. A., Castella, J.-C., & Novosad, P. (2006). Social networks and information access: Implications for agricultural extension in a rice farming community in northern Vietnam. *Agriculture and Human Values*, *23*(4), 513–527. https://doi.org/10.1007/s10460-006-9013-5

Isaac, M. E., & Matous, P. (2017). Social network ties predict land use diversity and land use change: a case study in Ghana. *Regional Environmental Change*, *17*(6), 1823–1833. https://doi.org/10.1007/s10113-017-1151-3

Lichoti, J. K., Davies, J., Maru, Y., Kitala, P. M., Githigia, S. M., Okoth, E., Bukachi, S. A., Okuthe, S., & Bishop, R. P. (2017). Pig traders' networks on the Kenya-Uganda border highlight potential for mitigation of African swine fever virus transmission and improved ASF disease risk management. *Preventive Veterinary Medicine*, *140*, 87–96. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.03.005

Lucio-Mendiola, A. Y., Martínez-González, E. G., Aguilar-Gallegos, N., Aguilar-Ávila, J., & Altamirano-Cárdenas, J. R. (2022). Presencia de productos orgánicos en Twitter desde la perspectiva del análisis de redes sociales. *REDES. Revista Hispana Para El Análisis de Redes Sociales*, *33*(1), 43–60. https://doi.org/10.5565/rev/redes.933

Marsden, P. V. (1990). Network data and measurement. *Annual Review of Sociology*, *16*(1), 435–463. https://doi.org/10.1146/annurev.so.16.080190.002251

Marsden, P. V. (2011). Survey methods for network data. In J. Scott & P. J. Carrington (Eds.), *The SAGE Handbook of Social Network Analysis* (pp. 370–388). London, UK: SAGE.

Mata, A. S. da. (2020). Complex networks: a Mini-review. *Brazilian Journal of Physics*, *50*(5), 658–672. https://doi.org/10.1007/s13538-020-00772-9

Milgram, S. (1967). The small world problem. *Psychology Today*, *1*(1), 61–67.

Miritello, G., Lara, R., Cebrian, M., & Moro, E. (2013). Limited communication capacity unveils strategies for human interaction. *Scientific Reports*, *3*, 1–7. https://doi.org/10.1038/srep01950

Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, *45*(2), 167–256. https://doi.org/10.1137/S003614450342480

Newman, M. E. J. (2010). *Networks. An introduction*. Oxford University Press.

Núñez-Ríos, J. E., Aguilar-Gallegos, N., Sánchez-García, J. Y., & Cardoso-Castro, P. P. (2020). Systemic design for food self-sufficiency in urban areas. *Sustainability*, *12*(18), 7558. https://doi.org/10.3390/su12187558

Prell, C., Reed, M., Racin, L., & Hubacek, K. (2010). Competing structure, competing views: The role of formal and informal social structures in shaping stakeholder perceptions. *Ecology and Society*, *15*(4). http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art34/

Price, D. J. D. S. (1965). Networks of scientific papers. *Science*, *149*(3683), 510–515. https://doi.org/10.1126/science.149.3683.510

Simon, W. J., Krupnik, T. J., Aguilar-Gallegos, N., Halbherr, L., & Groot, J. C. J. (2021). Putting social networks to practical use: Improving last-mile dissemination systems for climate and market information services in developing countries. *Climate Services*, *23*, 100248. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100248

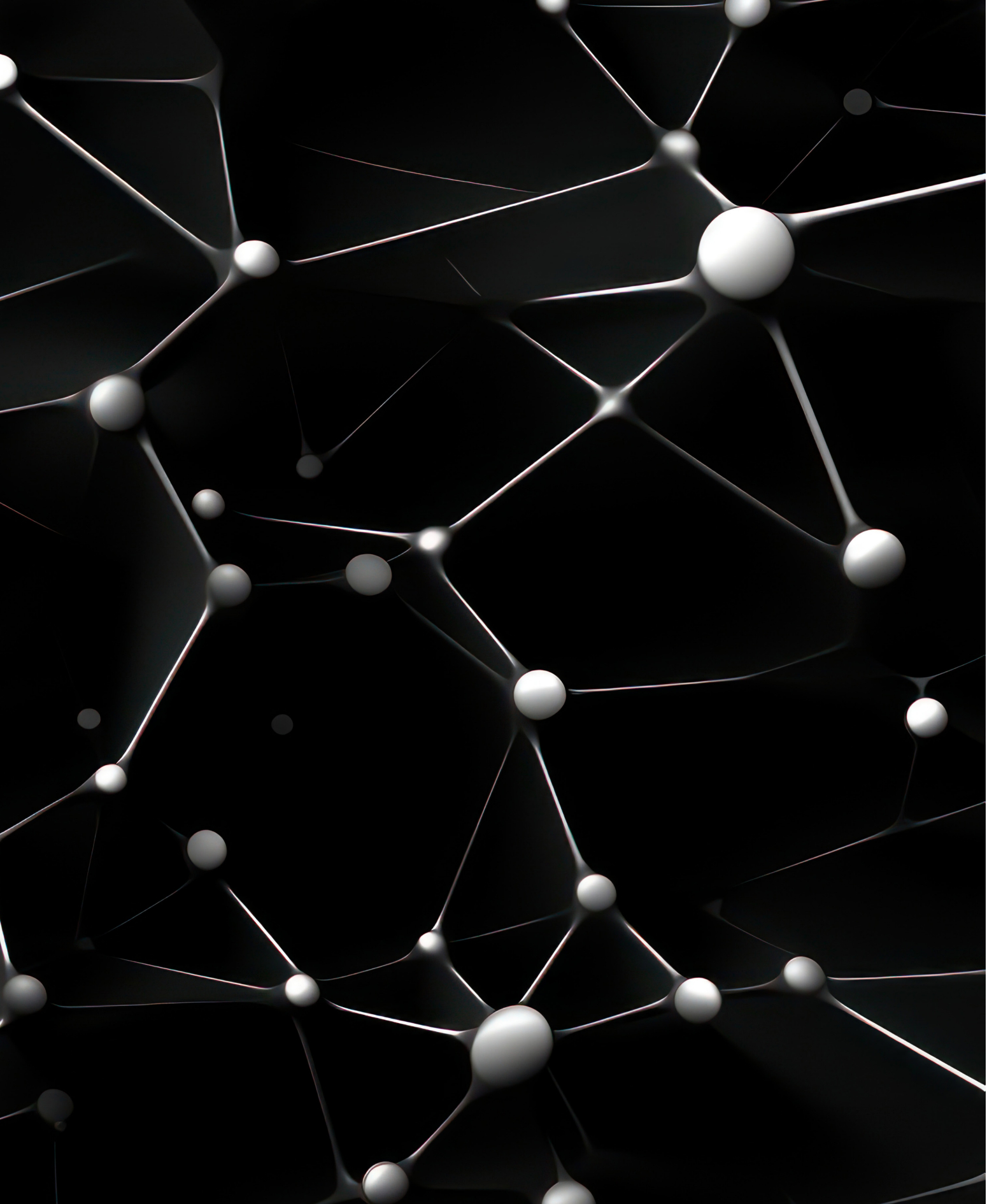
Strogatz, S. H. (2001). Exploring complex networks. *Nature*, *410*(6825), 268–276. https://doi.org/10.1038/35065725

Teixeira, A. A. C. (2011). Mapping the (in)visible college(s) in the field of entrepreneurship. *Scientometrics*, *89*, 1–36. https://doi.org/10.1007/s11192-011-0445-3

Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social Network Analysis: methods and applications*. Cambridge University Press.

Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of "small-world" networks. *Nature*, *393*(6684), 440–442. http://dx.doi.org/10.1038/30918

Yadav, A., Vidal, M., & Luck, K. (2020). Precision medicine — networks to the rescue. *Current Opinion in Biotechnology*, *63*, 177–189. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.02.005



7. Complementariedad de Herramientas Bajo el Enfoque Sistémico

Juan Enrique Núñez-Ríos[1, 2 *]

7.1. Resumen

El enfoque sistémico es un marco de investigación que permite abordar problemas complejos e identificar patrones recurrentes para proponer cambios o cursos de acción perdurables. Así, el pensamiento sistémico puede entenderse como el conjunto de habilidades analíticas para mejorar la capacidad de identificar y comprender sistemas, tratar de predecir sus comportamientos para modificarlos y obtener los efectos deseados. La aplicación, del enfoque en cuestión, puede darse mediante la combinación entre distintas metodologías como la metodología de Sistemas Suaves, la Dinámica de Sistemas o el Análisis de Redes Sociales. En este capítulo se describen, brevemente, las siete etapas de la metodología de sistemas suaves y se recomiendan herramientas para cumplir con el objetivo de cada una.

Palabras clave: MSS, complementariedad, pensamiento sistémico, organización, estructuración de problemas.

[1] Universidad Panamericana. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Álvaro del Portillo 49, Zapopan, Jalisco, 45010, México.

[2] Networks and Systems Thinking Research Group – NeST.

[*] Autor de correspondencia: jnunezr@up.edu.mx

7.2. Introducción

En un contexto altamente interconectado, en donde es cada vez más difícil anticiparse a los problemas y las consecuencias e impactos de éstos en los múltiples sectores de la sociedad. Existen distintas formas para aproximarse a determinado problema buscando entender el contexto en el que dicho problema está ubicado, su estructura y cómo las relaciones en su estructura y con su entorno pueden generar dificultades que rebasen la capacidad de respuesta de las organizaciones (Gharajedaghi, 2011). Al respecto, el enfoque sistémico constituye una alternativa que promueve la comprensión de problemas interconectados y orienta la acción hacia el diseño e implementación de cambios efectivos.

De acuerdo con Jackson (2009), entre los aspectos que dificultan la adopción e implementación del enfoque sistémico, tanto en el ámbito académico como en el sector empresarial o grupos de la sociedad civil, se encuentra la asociación errónea del concepto pues se suele relacionar con: a) movimientos alternativos que promueven el holismo como estilo de vida, b) perspectiva meramente cualitativa que complica, innecesariamente, cualquier situación bajo estudio, c) se suele pensar que es exclusivo de la biología, computación o la investigación de operaciones. Otro factor que obstaculiza su utilización es la tendencia a simplificar situaciones o entender los problemas bajo una perspectiva reduccionista. Sobre esto De Florio et al. (2013) ofrecen una clasificación sencilla para comprender situaciones problemáticas. Uno puede enfrentar un problema unitario o uno plural. El primero, es relativamente sencillo y el efecto observado es el resultado de uno o pocos factores y su solución requiere atender aspectos puntuales; por ejemplo, equipo de refrigeración averiado, quejas de clientes por mala calidad de alimentos. El segundo, es aquel en el que no es sencillo determinar las causas raíz que genera el efecto observado por lo que requiere un esquema que permita estudiar relaciones, identificar patrones para actuar en consecuencia y diseñar cursos de acción para implementar cambios eficaces y sostenibles (Zhao, 2014); por ejemplo, la capacidad de adaptación y permanencia de una organización, la capacidad de respuesta y calidad en la atención de un hospital.

Con base en lo anterior, el enfoque sistémico es una opción para navegar por problemas plurales o poco estructurados pero, su implementación requiere combinar, de forma ingeniosa, metodologías y herramientas específicas que permitan a los tomadores de decisión integrar lo cuantitativo y lo cualitativo. Entre estas herramientas se pueden destacar la metodología de Sistemas Suaves (MSS) (Checkland, 2000), el Modelo de Sistema Viable (MSV) (Beer, 1984), la Dinámica de Sistemas (DS) (Sterman, 2000) y el Análisis de Redes Sociales (ARS) (Brandes et al., 2013). Estas herramientas no sólo facilitan la comprensión profunda de los problemas (sistemas), sino que también brindan una base sólida para transformar un problema poco estructurado en uno estructurado y tomar decisiones informadas y estratégicas.

En este contexto, este capítulo se centra en describir las siete etapas esenciales de la MSS y ofrece recomendaciones breves sobre herramientas que pueden apoyar a lograr el objetivo de cada fase. Así, se busca brindar al lector una manera de utilizar la MSS y, al mismo tiempo, animarlo a utilizar sus conocimientos guiado por esta metodología.

7.3. Tipos de contexto problema

Normalmente, el término organización se asocia con empresa y la actividad económica, pero puede entenderse como un sistema en el que se relacionan componentes sociales, técnicos, económicos, de información, así como el diseño estructural para cumplir objetivos (De Florio et al., 2013). La relación entre estos factores se da en un entorno que ejerce múltiples presiones y genera, a su vez, numerosos problemas que conducen a los sistemas de actividad humana a presiones y, por tanto, evaluar constantemente el contexto para diseñar e implementar cursos de acción enfocados en adaptarse para continuar operando.

Adaptarse al entorno presenta la necesidad de comprender el ambiente en el que se opera, así como conceptos, prácticas, valores y procesos en distintos niveles para identificar y seleccionar únicamente relaciones o factores que inciden significativamente en el sistema y enfocar adecuadamente esfuerzos y recursos (Flood, 2010). Al respecto, el enfoque sistémico ofrece alternativas que permiten navegar en contextos turbulentos. Para esto, el Sistema de Metodologías de Sistemas (SOSM, por sus siglas en inglés) es útil para conocer las características del entorno y relacionarlo con el tipo un problema para, posteriormente, seleccionar una o un conjunto de metodologías que permitan diseñar una alternativa de mejora (Jackson, 2003). Siguiendo esta idea, en el Cuadro 1 se presenta brevemente la clasificación de los problemas considerando el tipo de sistema y los participantes involucrados. Adicionalmente, se mencionan las metodologías para construir una solución.

Cuadro 1. Matriz contexto problema

		Participantes		
		Unitario	**Plural**	**Coercitivo**
Sistemas	Simple	Simple-unitario (SU). Es posible abordar estos problemas mediante:	Simple – plural (SP).	Simple-coercitivo (SC).
	Complejos	Complejo-Unitario (CU).	Complejo-plural (CP).	Complejo-coercitivo (CC).

Fuente: Adaptada de Jackson (2003).

De acuerdo con Martinez-Lozada y Espinosa (2022) el tipo de problemas en los que las personas juegan un rol importante pueden tratarse usando Metodología de Sistemas Suaves. Previo a describir la MSS, en el Cuadro 2 se describen algunos ejemplos de los tipos de problema:

Cuadro 2. Ejemplos de problemas y herramienta sugerida

Ejemplo	Tipo de problema	Tipo de interacción entre subsistemas	El proceso/ sistema cambia durante el tiempo	Relación entre subsistemas y contexto	Relación entre participantes	Herramienta sugerida
Encargado de producción de conservas identificó ausencia de indicador para medir recolección de fruta. Hay variaciones en la producción y desperdicios.	SU	Formado por pocos subsistemas, interacción baja, identificable y medible.	No	Simple - existe un número limitado de factores que inciden en el problema	Comparten propósito y valores organizacionales, intereses y objetivos.	• Investigación de operaciones. • Análisis de sistemas. • Metodologías de sistemas duros.
Unión de cooperativas, busca incidir en políticas públicas para el desarrollo de agricultura sostenible. Formar estructura de red ha sido un problema. Distintos actores consideran que su diseño es el apropiado.	CU	Numerosos subsistemas, relaciones poco definidas.	Sí	Múltiples factores humanos, tecnológicos.	Comparten propósito y valores organizacionales, intereses y objetivos.	• Dinámica de sistemas. • Cibernética organizacional. • Control de procesos.
Un productor cafetalero busca incrementar la producción de su finca. Esto presenta nuevas tareas e incrementa la carga laboral para los trabajadores. Los trabajadores proponen alternativas de negocio para no incrementar el tiempo de jornada. Esto requiere generar consenso.	SP	Formado por pocos subsistemas, relaciones claramente definidas.	No	Poca influencia de su contexto.	Aunque existe discrepancias entre productor y empleados, los involucrados comparten el objetivo de mejora. Esto requiere caracterizar el problema.	• Diseño idealizado. • Diseño de estructuras de trabajo. • Metodología de sistemas suaves.
Productores pequeños y medianos comercializando sus productos mediante otra empresa. Los problemas de entregas generan insatisfacción con clientes, baja en las ventas y problemas para pagar a productores.	CP	Múltiples subsistemas	Si	Las relaciones cambian a medida que las partes son afectadas.	Diversas perspectivas sobre el problema, aunque hay coincidencia en intereses.	• Diseño idealizado. • Metodología de sistemas suaves.
Competencia entre cadenas hoteleras transnacionales y organizaciones locales de hospedaje. El sistema legal y político propician disparidad de precios y beneficios para las organizaciones.	SC	Relativamente pocos subsistemas.	No	Relaciones claramente definidas.	Diferencia entre perspectivas sobre el problema. Posibilidad de consenso poco probable. Las decisiones suelen tomarse con base en las relaciones de poder.	• Heurística de sistemas. • Sistemas críticos o emancipatorios. • Resolución de problemas inventivos.
Competencia entre cadenas hoteleras transnacionales y organizaciones locales de hospedaje. El sistema legal y político propician disparidad de precios y beneficios para las organizaciones. Adicionalmente, el problema de inseguridad amenaza la permanencia de micro, pequeños y medianos empresarios del sector turístico.	CC	Número elevado de sistemas.	Sí	Relaciones poco definidas,	Relación entre actores poco clara o definida. Poca probabilidad de consenso entre actores debido a la diferencia de visión sobre el problema.	• Sugiere la aplicación de distintas herramientas.

Fuente: Elaboración propia con base en Jackson (2003, 2009).

7.4. Metodología de Sistemas Suaves

La Metodología de Sistemas Suaves es una alternativa para aplicar el enfoque sistémico y permite abordar situaciones complejas y no estructuradas para proponer mejoras a los sistemas de actividad humana. De acuerdo con Checkland (2000), la MSS sistematiza el diseño de soluciones y el aprendizaje continuo enfocándose en la mejora y adaptación. La MSS propicia el consenso entre los participantes de determinada situación y guiar el proceso de diseño de mejoras así como el aprendizaje continuo.

La MSS está formada por siete fases que pueden agruparse en dos grandes segmentos: a) indagar el mundo real (etapas 1, 2, 5, 6 y 7) y b) actividades relacionadas con el pensamiento de sistemas (etapas 3 y 4). A continuación, en el Cuadro 3 se describe brevemente cada fase de la MSS.

Cuadro 3. Descripción de las fases de la Metodología de Sistemas Suaves (MSS)

Etapa	Objetivo de la etapa	Idea principal
1. Situación problema (no estructurado)	Comprender la situación problemática.	En esta fase se busca identificar y definir la situación del problema. Requiere que las partes interesadas se comprometan para recabar información sobre sus perspectivas, preocupaciones y expectativas. Se hace hincapié en explorar la diversidad de puntos de vista y comprender los distintos elementos del problema.
2. Situación problema (expresada)	Generar una descripción incluyendo factores y relaciones significativas del problema.	Una vez que se ha recopilado la información, lo siguiente es generar una comprensión global y compartida del problema. Esto requiere consenso y utilizar un lenguaje común. Las representaciones gráficas son útiles en esta etapa.
3. Definir los sistemas relevantes	Identificar los sistemas (procesos, tareas, actores) que son relevantes para la situación problema.	Esta fase implica definir el propósito, los límites y la propiedad de estos sistemas. Ayuda a clarificar lo que hay que tener en cuenta para abordar el problema.
4. Modelos conceptuales de los sistemas relevantes	Generar modelos conceptuales de los sistemas relevantes.	Representar mediante modelos las relaciones entre los componentes clave de los sistemas identificados. Estos modelos deben permitir comprender la estructura y la dinámica de los sistemas implicados. Es decir, los participantes deben enfocarse en desarrollar entendimiento compartido de cómo funcionan las cosas.
5. Comparar los modelos con la realidad (comparar 4 y 2)	Comparar los modelos conceptuales con situaciones reales (directas del problema)	Los modelos conceptuales se evalúan en función de las experiencias y observaciones de los interesados. Esta fase permite identificar las incoherencias entre los modelos conceptuales y las complejidades del mundo real. El propósito es, mediante varias iteraciones, perfeccionar y mejorar los modelos conceptuales.
6. Definición de cambios deseables y factibles	Proponer cambios para mejorar la situación.	Con base en la comparación entre 4 y 2 se deben sugerir cambios o mejoras para lidiar con el problema identificado. Los participantes con capacidad de decisión deberán considerar que los cambios deberán ser factibles pero compartidos por la mayoría de los participantes para mejorar el desempeño o la funcionalidad de los sistemas involucrados.
7. Acción para resolver el problema o mejorar la situación	Implementar cambios y monitorear resultados.	Implementar los cambios o mejoras propuestos. Es fundamental monitorear resultados y los efectos que tienen los cambios, recabar opiniones y aplicar medidas de ajuste necesarias. Es necesario considerar que, de ser necesario, se repetirán las fases de la metodología.

Fuente: Elaborada con base en Checkland (2000).

De acuerdo con Vik et al. (2022), la MSS tiene un ámbito amplio de aplicación, pues en muchas situaciones el ser humano y sus intenciones inciden en el problema. Checkland (2000) considera que su alta capacidad de aplicación se debe a dos principios clave de la metodología. La primera, es que genera un proceso de aprendizaje enfocado en la mejora continua. La segunda, es que mediante cuestionamientos críticos al propio sistema, permite organizar y estructurar el cambio.

Cuadro 4. Objetivo y herramientas sugerida en cada fase de la Metodología de Sistemas Suaves

Etapa	Objetivo de la etapa	Herramienta sugerida
1. Situación problema (no estructurado).	Comprender la situación problemática.	• Diagnóstico de funciones mediante MSV. • Diagramas causales. • Análisis de Redes Sociales. • Value Stream Mapping. • Herramienta 635 (seis personas que proponen tres ideas cada cinco minutos). • Árbol causal. • Diagramas causa efecto. • Gráficos de corridas. • Esquema 5W2H.
2. Situación problema (expresada).	Generar una descripción incluyendo factores y relaciones significativas del problema.	
3. Definir los sistemas relevantes.	Identificar los sistemas (procesos, tareas, actores) que son relevantes para la situación problema.	• CATWOE (Customers, Actors, Transformation, World view, Owner, Environment). • Esquema 5W2H. • TASCOI (Transformation, Actor, Supplier, Customers, Owners, Interveners). • Diseño MSV. • SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer). • Value Stream Mapping. • Despliegue de la Función de Calidad (QFD).
4. Modelos conceptuales de los sistemas relevantes.	Generar modelos conceptuales de los sistemas relevantes.	• Diagramas mentales. • Modelos causales. • Análisis de redes sociales. • Modelos de ecuaciones estructurales. • Dinámica de sistemas. • SIPOC. • Definición mediante OGSM (Objetivo, Metas, Estrategias y Medidas). • Análisis de capacidad de procesos. • Modelos de regresión. • Diseño de experimentos. • Optimización.
5. Comparación entre 4 y 2.	Comparar los modelos conceptuales con situaciones reales (directas del problema).	
6. Definición de cambios deseables y factibles.	Proponer cambios para mejorar la situación.	• Dinámica de sistemas. • Estructura MSV. • Matriz selección de proyectos. • Diseño de plan de acción/control. • Matriz X. • Despliegue de la Función de Calidad (QFD). • Diseño de experimentos. • Optimización
7. Acción para resolver el problema o mejorar la situación.	Implementar cambios y monitorear resultados.	

Fuente: Elaboración propia con base en Checkland (2000).

Las aplicaciones de la MSS suelen situarse en el dominio de las ciencias sociales, donde se han reportado en distintas organizaciones, tamaños y sectores. No obstante, la metodología también se ha aplicado en otras áreas como las ciencias de la computación (Devi et al., 2023; Isa et al., 2023; Martin & O'Meara, 2020; Msendema et al., 2023), ingeniería (Morey et al., 2023; Ruchita & Shankar, 2022), toma de decisiones (Paucar-Caceres et al., 2022; Williams, 2022), sector salud (Kettlewell et al., 2021; Liyanage et al., 2016; Martin & O'Meara, 2020; Shahzad et al., 2021) por mencionar algunos. La MSS es considerada un proceso de investigación maduro que se ha depurado por más de treinta años (Checkland, 2000) y cada vez se reportan menos cambios a su diseño (Mingers, 2000). Sin embargo, algunos factores que dificultan su adopción y aplicación son traducciones imprecisas, así como el desconocimiento respecto a qué herramientas analíticas pueden emplearse para el despliegue práctico de cada una de las fases de la MSS (Núñez-Ríos, Sánchez-García, y Ramirez-Nafarrate, 2022). Al respecto, en el Cuadro 4 se sugieren algunas herramientas que pueden apoyar a aplicar de la MSS. Cabe mencionar que estas sugerencias se basan en el principio de complementariedad metodológica sugerido por Mingers (2000) y Vik et al. (2022).

7.4.1. Ejemplos de aplicación

En esta sección se presentan dos casos en los que la MSS se utilizó integrando otras herramientas en el contexto de problemas en pequeñas y medianas empresas. Para esto, en cada caso se mostrará un cuadro para facilitar la lectura.

En su artículo, *Prioritizing factors for effective strategy implementation in small and medium-size organizations*, López-Torres et al. (2023) abordaron la brecha entre el diseño de estrategias por parte de la dirección y su implementación. En este caso, el problema radicaba en la diferencia de perspectivas sobre qué factores deben atender los gerentes de PyMEs con el objetivo de organizar mejor sus recursos e incrementar el éxito en la implementación de cualquier estrategia, así como en la dificultad para generar consenso. En el Cuadro 5 se describe de manera concisa el uso de la MSS (puede consultar el artículo referido para más detalle):

La segunda aplicación se reportó en el artículo *A Systems Science Approach to Organizational Integrity. Case: Services Small and Medium Enterprises* (Núñez-Ríos, Sánchez-García, López-Hernández, et al., 2022). De acuerdo con este trabajo, la integridad organizacional combina tanto factores organizacionales como del comportamiento de los empleados, la discrepancia entre estos genera algunas situaciones como alta rotación de personal, clima organizacional negativo y variación alta en el desempeño del personal.

Cuadro 5. Primer ejemplo de aplicación

Participantes: 94 directores de PyMEs (distintos sectores)		
Etapa	**Herramienta empleada**	**Uso sugerido**
1 y 2	Taller participativo.	▪ Pregunta utilizada: ¿Qué factores considera cruciales para facilitar la aplicación eficaz de estrategias? ▪ La pregunta se realizó seis veces hasta encontrar acuerdo entre la mayoría de los participantes.
3	Paquete igraph (Csárdi & Nepusz, 2006) para el cálculo de covarianza entre redes.	▪ Una vez obtenidos los factores relevantes, se elaboraron grafos representando relaciones entre participantes que compartían opinión sobre determinado factor. ▪ Se evaluó covarianza de grafos para saber si los grafos resultantes tenían relación entre sí. ▪ Se describieron los factores importantes.
4	-Proceso analítico jerárquico. -Evaluación pareada de alternativas y criterios.	▪ Diseñar diagrama jerárquico con, al menos, tres niveles (objetivo, alternativas y criterios) para representar modelo conceptual.
5	Diálogo con participantes.	▪ Revisar índice de consistencia del modelo analítico jerárquico. ▪ Revisar modelo conceptual con participantes para recoger opiniones.
En este caso, para cumplir con el objetivo, fue suficiente reportar hasta la etapa cinco. Sin embargo, se complementan las siguientes fases:		
6	SIPOC y OGSM	▪ Revisión de elementos del SIPOC en todos los niveles utilizando OGSM para planear acciones y cambios factibles. No se debe olvidar que los cambios deben ser compartidos por la mayoría de los participantes.
7	Matriz X	▪ Ubicar iniciativas de corto plazo, pero con alta incidencia. ▪ Definir métricas críticas para monitorear mejoras. ▪ Definir iniciativas a largo plazo. ▪ Considerar los principios de identidad organizacional en el proceso de cambio.

Fuente: Elaboración propia con base en Checkland (2000).

Debido a la discrepancia entre la visión de los participantes sobre el problema y cómo abordarlo para brindar soluciones, se utilizó la MSS para generar consenso entre los participantes e identificar qué relaciones dentro de una PyME deben ser generadas o reforzadas a fin de promover la integridad organizacional en todos los niveles de una organización. En el Cuadro 6 se describen las herramientas utilizadas en cada fase de la MSS:

Se considera pertinente clarificar que, en ambos casos, la MSS se utilizó en grupos grandes (> 30 actores) con el propósito de construir un tipo de generalización que beneficiará a la mayoría de los participantes. Sin embargo, el complemento de la MSS con otras herramientas puede realizarse bajo el mismo esquema en otros contextos y grupos pequeños.

Cuadro 6. Segundo ejemplo de aplicación

Participantes: 140 gerentes de PyMEs turísticas.		
Etapa	**Herramienta empleada**	**Uso sugerido**
1 y 2	Pictogramas.	▪ Pregunta detonante: ¿Cuáles son los factores/relaciones conflictivas que afectan a tu organización para lograr la integridad organizacional? ▪ Cada participante realizó un dibujo para responder la pregunta planteada. ▪ Se realizaron varias iteraciones para comparar los pictogramas e identificar coincidencias hasta generar uno en el que la mayoría de los participantes estuvieron de acuerdo.
3 y 4	Mnemotecnia CATWOE.	▪ Una vez identificados los elementos relacionados con la situación problema, los participantes buscaron definir procesos, actividades y actores críticos para propiciar un cambio. ▪ En un cuadro, los participantes anotaron los elementos que ellos identifican en la mnemotecnia. ▪ Se realizaron varias iteraciones para comparar los cuadros hasta lograr un acuerdo sobre qué elementos son relevantes entre la mayoría de los participantes.
4	Modelo de Ecuaciones Estructurales mediante Mínimos cuadrados parciales	▪ La información obtenida en la etapa tres se expresó como hipótesis de trabajo. ▪ El modelo conceptual se expresó mediante un nomograma simple.
5	Modelo de Ecuaciones Estructurales - Mínimos cuadrados con paquete pls-pm en R (Sanchez, 2013)	▪ Cuestionario con base en los factores del modelo conceptual. ▪ Algoritmo para evaluar nomograma. ▪ Traducir el modelo conceptual a compuestos o variables latentes. ▪ Proponer cambios o cursos de acción con base en el grado de significancia de las relaciones entre los compuestos del modelo conceptual.
6	Modelo de Sistema Viable	▪ Indicar a los participantes el estado de las funciones y relaciones organizacionales para orientar los cambios, las indicaciones fueron: o Inexistente – diseñar e implementar función o relación. o No funcional – rediseñar, optimizar, fortalecer función o relación. o Funcional – mantener/fortalecer función o relación.

Fuente: Elaboración propia con base en Checkland (2000).

7.5. Conclusiones

Indistintamente de su sector u orientación, las organizaciones operan en un contexto complejo que impone cada vez mayores restricciones y amenaza su permanencia. Ante esto, el enfoque sistémico, representa una alternativa que puede adaptarse a diversas situaciones y campos de la investigación permitiendo a los investigadores abordar problemas poco estructurados propiciando una comprensión distinta y el diseño de acciones efectivas. No obstante, esto requiere adentrarse en el conjunto de habilidades analíticas que permitan transitar de una perspectiva reduccionista hacia una integral pues ésta permite proponer cambios y cursos de acción sostenibles.

En conclusión, mediante este capítulo se buscó ejemplificar la integración de la Metodología de Sistemas Suaves con otras herramientas analíticas y, con esto, brindar al lector algunas pautas que le permitan llevar al plano de su disciplina la utilización del enfoque sistémico para desarrollar soluciones a problemas en sistemas organizacionales y situaciones complejas. Cabe

destacar que, a diferencia de los métodos tradicionales centrados en la optimización, la aplicación del enfoque sistémico con base en la matriz de identificación de problemas da prioridad a la identificación de alternativas que sean aceptables para las distintas partes interesadas y puedan aplicarse a distintos niveles organizativos. Subraya la importancia de la gestión de recursos implicando a todos los afectados en el proceso de resolución de problemas, desde la conceptualización hasta la aplicación.

Si bien existen distintas formas de abordar una situación problema, lo que distingue a este enfoque es su versatilidad, puede acomodar tanto grandes conjuntos de datos como interacciones de grupos pequeños permitiendo la integración de herramientas analíticas cualitativas y cuantitativas. Esta flexibilidad permite tener en cuenta una amplia gama de perspectivas y experiencias en el proceso de toma de decisiones, lo que conduce a soluciones más completas y eficaces. Además, el lector puede encontrar, en la incorporación de la Metodología de Sistemas Suaves con otras herramientas analíticas, un marco para la mejora continua. Al permanecer abierto a nuevas resoluciones y percepciones, las organizaciones pueden afrontar el cambio garantizando su capacidad de adaptarse. Así, este enfoque busca reflejar la naturaleza compleja y siempre cambiante del contexto en el que se aplica.

7.6. Referencias

Beer, S. (1984). The Viable System Model: Its Provenance, Development, Methodology and Pathology. *The Journal of the Operational Research Society*, *35*(1), 7–25. https://doi.org/10.2307/2581927

Brandes, U., Robins, G., McCranie, A. & Wasserman, S. (2013). What is network science? *Network Science*, *1*(1), 1–15. https://doi.org/10.1017/nws.2013.2

Checkland, P. (2000). The Emergent Properties of SSM in Use: A Symposium by Reflective Practitioners. *Systemic Practice and Action Research*, *6*(13), 799–823.

Csárdi, G. & Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal Complex Syst*, *1695*, 1–9.

De Florio, V., Bakhouya, M., Coronato, A. & Di Marzo, G. (2013). Models and Concepts for Socio-Technical Complex Systems: Towards Fractal Social Organizations. *Systems Research and Behavioral Science*, *30*(6), 750–772. https://doi.org/10.1002/sres.2242

Devi, E. T., Wibisono, D., Mulyono, N. B. & Fitriati, R. (2023). Designing an information-sharing system to improve collaboration culture: a soft systems methodology approach in the digital service creation process. *Journal of Enterprise Information Management*, *36*(5), 1240–1269. https://doi.org/10.1108/JEIM-08-2022-0294

Flood, R. L. (2010). The Relationship of 'Systems Thinking' to Action Research. *Systemic Practice and Action Research*, *23*(4), 269–284. https://doi.org/10.1007/s11213-010-9169-1

Gharajedaghi, J. (2011). *Systems thinking, managing chaos and complexity* (3a ed.). Elservier.

Isa, W. A. R. W. M., Suhaimi, A. I. H., Noordin, N., Harun, N. A., Mohammed, S. N. A. S., Jamil, A. I., Ariffin, S. N. M. & Addenan, N. S. (2023). Hunger hero mobile application: applying soft system methodology at a local orphanage. *International Journal of Information Technology*, *15*(2), 691–696. https://doi.org/10.1007/s41870-022-01101-w

Jackson, M. (2003). *Systems Thinking: Creative Holism for Managers*. John Wiley & Sons.

Jackson, M. (2009). Fifty years of systems thinking for management. *Journal of the Operational Research Society*, *60*(1), 24–32.

Kettlewell, J., Timmons, S., Bridger, K., Kendrick, D., Kellezi, B., Holmes, J., Patel, P. & Radford, K. (2021). A study of mapping usual care and unmet need for vocational rehabilitation and psychological support following major trauma in five health districts in the UK. *Clinical Rehabilitation*, *35*(5), 750–764. https://doi.org/10.1177/0269215520971777

Liyanage, H., Luzi, D., De Lusignan, S., Pecoraro, F., McNulty, R., Tamburis, O., Krause, P., Rigby, M. & Blair, M. (2016). Accessible Modelling of Complexity in Health (AMoCH) and associated data flows: asthma as an exemplar. *Journal of Innovation in Health Informatics*, *23*(1), 476. https://doi.org/10.14236/jhi.v23i1.863

López-Torres, J. F., Sánchez-García, J. Y., Núñez-Ríos, J. E., & López-Hernández, C. (2023). Prioritizing factors for effective strategy implementation in small and medium-size organizations. *European Business Review*, *35*(5), 694–712. https://doi.org/10.1108/EBR-11-2022-0230

Martin, A. C. & O'Meara, P. (2020). Community Paramedicine through Multiple Stakeholder Lenses Using a Modified Soft Systems Methodology. *Australasian Journal of Paramedicine*, *17*, 1–11. https://doi.org/10.33151/ajp.17.793

Martinez-Lozada, A. & Espinosa, A. (2022). Corporate viability and sustainability: A case study in a Mexican corporation. *Systems Research and Behavioral Science*, *39*(1), 143–158. https://doi.org/10.1002/sres.2748

Mingers, J. (2000). An Idea Ahead of Its Time: The History and Development of Soft Systems Methodology. *Systemic Practice and Action Research*, *13*(6), 733–755.

Morey, E. J., Galvin, K., Riley, T. & Wilson, R. E. (2023). Application of soft systems methodology to frame the challenges of integrating autonomous trains within a legacy rail operating environment. *Systems Engineering*. https://doi.org/10.1002/sys.21723

Msendema, M. B., Chigona, W., Kumwenda, B., Kaasbøll, J. & Kanjo, C. (2023). Legitimization of data quality management practices in health management information systems: A soft systems methodology perspective. *THE ELECTRONIC JOURNAL OF INFORMATION SYSTEMS IN DEVELOPING COUNTRIES*. https://doi.org/10.1002/isd2.12289

Núñez-Ríos, J. E., Sánchez-García, J. Y., López-Hernández, C., Soto-Pérez, M. & Cardoso-Castro, P. P. (2022). A Systems Science Approach to Organizational Integrity. Case: Services Small and Medium Enterprises. *Cybernetics and Systems*, *53*(2), 238–255. https://doi.org/10.1080/01969722.2021.1983698

Núñez-Ríos, J. E., Sánchez-García, J. Y. & Ramirez-Nafarrate, A. (2022). Sustainable performance in tourism SMEs: a soft modeling approach. *Journal of Modelling in Management*. https://doi.org/10.1108/JM2-06-2021-0136

Paucar-Caceres, A., Cavalcanti-Bandos, M. F., Quispe-Prieto, S. C., Huerta-Tantalean, L. N. & Werner-Masters, K. (2022). Using soft systems methodology to align community projects with sustainability development in higher education stakeholders' networks in a Brazilian university. *Systems Research and Behavioral Science*, *39*(4), 750–764. https://doi.org/10.1002/sres.2818

Ruchita & Shankar, R. (2022). Electric Vehicles Charging Infrastructure Framework for Smart Transportation. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*. https://doi.org/10.13052/dgaej2156-3306.3815

Sanchez, G. (2013). PLS Path Modeling with R. *R Package Notes*, *235*. https://doi.org/citeulike-article-id:13341888

Shahzad, I., King, M. & Henshaw, M. (2021). Applying SoSE in Healthcare: the case for a soft systems methodology approach to Digital-first Primary Care. *2021 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)*, 37–42. https://doi.org/10.1109/SOSE52739.2021.9497479

Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education.

Vik, M., Finnestrand, H., & Flood, R. (2022). Systemic Problem Structuring in a Complex Hospital Environment using Viable System Diagnosis – Keeping the Blood Flowing. *Systemic Practice and Action Research*, *35*(2), 203–226. https://doi.org/10.1007/s11213-021-09569-6

Williams, R. A. (2022). Towards an agent-based model using a hybrid conceptual modelling approach: A case study of relationship conflict within large enterprise system implementations. *Journal of Simulation*, 1–13. https://doi.org/10.1080/17477778.2022.2122741

Zhao, F. (2014). A holistic and integrated approach to theorizing strategic alliances of small and medium-sized enterprises. *Business Process Management Journal*, *20*(6), 887–905. https://doi.org/10.1108/BPMJ-01-2013-0004

El pensamiento de sistemas en el sector agroalimentario: enfoques y técnicas para su aplicación.

La edición de esta obra estuvo bajo la supervisión y cuidado del Centro de Investigaciones Económicas Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y Agricultura Mundial (CIESTAAM) de la Universidad Autónoma Chapingo.

Se terminó de imprimir en el mes de junio de 2025 en la Imprenta Universitaria de la UACh, Carretera México-Texcoco Km 38.5, C. P. 56230, Texcoco, Estado de México.

Tiraje: 200 ejemplares.