

# COMPLEJIDAD, REDES Y SALUD PÚBLICA. UNA REVISIÓN<sup>1</sup>

## COMPLEXITY, NETWORKS AND PUBLIC HEALTH. REVIEW

## COMPLEXIDADE, REDES E SAÚDE PÚBLICA. REVISÃO

<sup>2</sup> Luis Alejandro Gómez Barrera

### Resumen

El presente artículo de revisión presenta una síntesis de los fundamentos teóricos de la relación entre complejidad y salud pública, desde las ciencias contemporáneas, haciendo énfasis en los conceptos y la teoría de redes. Se introduce al lector en los principales marcos epistemológicos para comprender la complejidad del campo de la salud colectiva y se muestran las diferencias con los enfoques tradicionales. Todo el documento propone ejemplos y posibles escenarios de aplicación de las teorías contemporáneas para una mejor explicación y comprensión de los fenómenos de la salud pública. La presente revisión no se hizo a la manera de una revisión sistemática pero se orientó para identificar y presentar algunos de los conceptos y teorías más relevantes en la relación propuesta. En las conclusiones se identifican experiencias previas en la aplicación de conceptos de complejidad a la salud pública y se sugieren nuevas posibilidades para su desarrollo futuro.

**Palabras clave:** Complejidad, Salud Pública, Ciencia, Redes, Ciencias de la complejidad.

### Abstract

This paper review presents a synthesis of the theoretical foundations of the relationship between complexity and public health, from contemporary science, focusing on concepts and theory of networks. The reader is introduced to the main epistemological frameworks for understanding the complexity of the field of collective health and differences with traditional approaches is. All document proposes examples and scenarios of implementation of contemporary theories for a better explanation and understanding of the phenomena of

### Resumo

O presente artigo de revisão apresenta uma síntese dos fundamentos teóricos da relação entre complexidade e saúde pública a partir das ciências contemporâneas e com ênfase nos conceitos da teoria de redes. Mostram-se os principais marcos epistemológicos que explicam a complexidade do campo da saúde coletiva, mesmo como as divergências com abordagens tradicionais. Ao mesmo tempo são propostos exemplos práticos e possíveis cenários de aplicação dessas teorias contemporâneas para explicar fenômenos próprios da Saúde

Recibido el 26/10/2016 Aprobado el 01/11/2016

1. Artículo de Revisión.

2. Odontólogo. Magíster en Salud Pública. Candidato a doctor en Estudios Políticos. Profesor Asociado Universidad El Bosque. Facultad de Medicina. gomezluis@unbosque.edu.co

public health. This paper-review didn't accomplish the parameters of a systematic review, but it was made to identify and show some of the main concepts among the relationships between public health and complexity sciences. On conclusions, is possible to identify previous experiences on the application of concepts from complexity to public health and suggestions are made, over new possibilities for its future development.

**Keywords:** Complexity, Public Health, Science, Networks, Complexity science.

## INTRODUCCIÓN

El propósito de esta investigación ha sido explorar la relación existente entre las ciencias de la complejidad y los conceptos y las herramientas de un amplio campo de investigación y desarrollo como la salud pública. Los alcances de este documento no pretenden abarcar la totalidad de lo que, sobre tales relaciones se haya escrito en la literatura científica; sino más bien servir de punto de partida para consolidar lo que aparece como una interesante perspectiva teórica y epistemológica en una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en la salud de los colectivos humanos. La revisión se desarrolló de manera no sistemática, pero diseñada desde elementos orientadores: el cambio de paradigma científico, los organismos vivos como organismos complejos, la teoría de redes complejas y de emergencias, las teorías de la decisión y la cooperación y su relación con las redes y por último, modelamiento y simulaciones complejas. Se revisaron libros y artículos reconocidos en cada uno de estos campos y también publicaciones que aplican los conceptos de complejidad a problemas de la salud pública y los servicios de salud.

Las ciencias de las que se ocupa la presente investigación, son aquellas que se han creado para comprender mejor la creciente e ilimitada complejidad de los fenómenos de la naturaleza. Ellas mismas son novedosas (1) y a la vez, de alto poder explicativo, especialmente en los campos en los cuales la tradición moderna se ha quedado corta y ha generado pocos avances y muy pocas novedades en los últimos siglos. El interés de los investigadores es precisamente mostrar de qué manera, estas nuevas ciencias abren igualmente nuevas y atractivas posibilidades para identificar, explicar y comprender los hechos, los fenómenos, los acontecimientos del campo de la salud pública; con herramientas epistemológicas y metodológicas provenientes tanto de las ciencias naturales como de las ciencias sociales que se han desarrollado con gran fuerza durante los últimos 100 años.

Pública. Se bem que não se trata de uma revisão sistemática, o texto visa identificar e apresentar as teorias e conceitos mais relevantes para dar conta desta relação. Nas conclusões foram identificados alguns antecedentes na aplicação de conceitos de complexidade à Saúde Pública e são propostas novas possibilidades para futuro desenvolvimento.

**Palavras chave:** complexidade, saúde pública, ciência, redes, ciências da complexidade

### Sobre la ciencia y la ciencia contemporánea.

La ciencia contemporánea tanto como la ciencia tradicional, es un resultado de la evolución cultural y es fundamentalmente un acto creativo que trae consigo innovaciones conceptuales que contribuyen a configurar una explicación y comprensión diferente de los diversos fenómenos que constituyen la naturaleza. La aproximación teórica a un fenómeno cualquiera, hará distinta su comprensión y por tanto, la forma de intervenirlo. La propia definición de un problema de investigación está marcada por la manera como se comprende la naturaleza y por el marco teórico que se emplee para estudiarla. (2)

Las ciencias naturales han avanzado en la elaboración de nuevos marcos de referencia para comprender los fenómenos relacionados con su campo de acción. "Hay soluciones para los principales problemas de nuestro tiempo, algunas muy sencillas, pero requieren de un cambio radical en nuestra percepción, en nuestro pensamiento, en nuestros valores". (3) Cuando se estudian las acciones en salud, individuales y colectivas, se puede apreciar que el marco de referencia que las orienta continúa sustentado en el sistema de conceptos, significaciones, valores y normas mecánicos propios del paradigma científico moderno. Esta tradición, no permite la apropiación de innovaciones científicas que permitan adecuar las acciones con la complejidad de la realidad que se desea transformar. Esta característica se expresa claramente en el pensamiento causal que intenta ligar eventos del pasado con eventos del presente, construyendo explicaciones simples a fenómenos altamente complejos. (4)

La complejidad del mundo radica, en el aumento permanente de las diferencias. Actualmente se comprende que las diferencias generan inestabilidades y que estas se manejan buscando nuevas formas de organización que permitan a los organismos mantenerse vivos. Estos

presupuestos científicos contemporáneos interpelan el arraigado sentido de homogeneidad y de universalización que tradicionalmente han tenido las personas responsables de las acciones en el ámbito de la salud. El reconocimiento de las fronteras, del modo de pensar moderno que fundamenta las acciones de salud tradicionales, es el punto de partida para aventurarse en la indagación de lo complejo.

No existe en sentido estricto una ciencia o una teoría de la complejidad. Reconocer la complejidad de la naturaleza y de los fenómenos vivos así como de todos aquellos eventos o circunstancias que se derivan de la vida, ha implicado la generación de nuevas ciencias o teorías que buscan explicar tal complejidad. A este grupo de teorías es a lo que comúnmente se le llama ciencias contemporáneas.

Lo que se pretende al utilizar estas teorías o ciencias contemporáneas, es contar con nuevas representaciones mentales que han resultado al menos necesarias para identificar, caracterizar y resolver problemas complejos. Las teorías científicas contemporáneas (evolución, termodinámica del no equilibrio, sistemas complejos adaptativos, estructuras disipativas, caos, catástrofes, fractales, redes, ciencias cognitivas, memética, multiracionalidad, lógicas no clásicas, elección, decisión y juegos) aportan conceptos, dispositivos y regulaciones que son necesaria para construir un modo de pensar que sea capaz de negociar y dialogar con lo real. (5)

La evolución de la investigación científica ha demostrado que el tipo de percepción, identificación, explicación y comprensión de la realidad están condicionadas a los marcos de referencia, teóricos y prácticos, utilizados por el investigador. Lo mismo sucede con el diseño, ejecución y evaluación de las alternativas de solución de problemáticas. El sujeto que observa es parte del sistema observado y, por lo tanto, lo interfiere y distorsiona considerablemente. Los procesos de investigación en el campo de salud deberían identificar estas dependencias y distorsiones que introduce el modo de pensar del observador.

### Organismos vivos, organismos complejos

Las ciencias contemporáneas han configurado un patrón de organización común que consiste en explicar los eventos y fenómenos en términos de una realidad subyacente la cual no percibimos directamente. Los organismos vivos son complejos son dinámicos, caóticos y están ubicados en un punto indeterminado entre el orden (estabilidad) y el desorden (inestabilidad).

Son dinámicos porque sus comportamientos cambian a medida que transcurre el tiempo. Estos organismos son sensibles a las condiciones iniciales esto significa que cualquier alteración, por pequeña que sea, produce efectos que son desproporcionados. Esta no linealidad hace imposible la predicción exacta de los comportamientos más allá de determinado tiempo y por estas razones parecerían estar regidos por el azar. Sin embargo, la investigación científica contemporánea ha demostrado que los sistemas caóticos tienden a presentar regularidades, pautas o patrones colectivos, los cuales no se pueden identificar estudiando la conducta individual de sus componentes.

Las investigaciones contemporáneas en seres vivos demuestran que no es posible reducir la explicación y la comprensión de los organismos vivos a modelos ordenados, lineales, mecánicos y deterministas. Esta llamada "perspectiva teórica contemporánea" (6), es el punto de partida que identifica el interés por investigar la multiplicidad de componentes, procesos y condiciones que hacen posible la configuración, evolución y adaptación de los organismos vivos. Esta postura científica difiere de la aproximación sistémica que orienta los estudios e intervenciones en el campo de la salud que tiende a percibir los hechos de la realidad y el mundo como si fueran totalidades desarmables.

La investigación científica contemporánea ha encontrado que los organismos complejos, en todos los campos y ámbitos, tienen o presentan las siguientes propiedades básicas: (7), (3)

- › Comportamientos no lineales que no pueden predecirse con facilidad,
- › Procesos de aprendizaje y adaptación,
- › Interacciones estratégicas competitivas y cooperativas,
- › Auto organización, concebida como la formación espontánea de orden,
- › Reglas de actividad local que propician la emergencia de estructuras globales y el desplazamiento hacia otros estados de fase,
- › Adaptación colectiva con fines egoístas individuales buscando la eficacia biológica y la capacidad evolutiva,
- › Coevolución hacia un estado de equilibrio,
- › Irreversibilidad,
- › Innovación,
- › Cambios abruptos o catástrofes,

- › Emergencias que surgen de las interacciones locales,
- › Dispositivos locales y globales para la selección, procesamiento y almacenaje de información que posibilitan la supervivencia,
- › Procesos de selección para interactuar adecuadamente con el entorno,
- › Orden a partir del caos,
- › Organización en red,
- › Procesos de computación,
- › Pensamiento e inteligencia.

Comprender estos atributos comunes a todos los organismos complejos y su utilización para el estudio e intervención de las diversas condiciones de salud, así como de las modalidades de vida que las hacen posibles, implicaría el diseño de alternativas de solución que son radicalmente diferentes a las tradicionalmente implementadas, la cuales se limitan a recomendar el seguimiento de unos “algoritmos de vida” que son homogéneos y universales.

### Redes complejas y emergencias

La organización de los seres vivos tiene una configuración que les permite su subsistencia. Esta forma de organización es en Redes.

La red es la expresión formal de la complejidad organizada y está constituida por múltiples nodos (entidades) y caminos (flujos de información). Los nodos de la red tienen la doble condición de ser cerrados organizacionalmente y abiertos informacionalmente. El cierre del nodo facilita la construcción de su identidad y autonomía (diferencia). La apertura informativa permite adaptarse a los cambios internos y externos. El cierre y la apertura de los nodos les permite actuar (transformar) e interactuar (transformarse) para coordinar sus diferencias estableciendo entre ellos una comunicación efectiva. En una red no existen jerarquías. Cada nodo actúa e interactúa simultáneamente y en paralelo buscando mantenerse vivo cooperativamente. Los humanos, individual y colectivamente, son un tejido de diferencias que cooperativamente evolucionan, se adaptan y se auto-organizan en torno a un patrón común que es adaptativo, flexible y dinámico. En la mirada sistémica clásica los humanos, individual y colectivamente, serían: una colección de partes funcionales, intercambiables y sustituibles (3). La teoría de redes demuestra que: el comportamiento individual no necesariamente corresponde con el colectivo. Que el todo no es la simple suma de

las partes y que la interacción entre individuos puede propiciar comportamientos asombrosos. Una red es una colección dinámica de organismos que actúan, están relacionados no linealmente y evolucionan con el tiempo. El mundo percibido como una red es pequeño, por lo tanto, los contactos con cualquier persona se pueden lograr con pocos pasos (red de mundo pequeño). Los experimentos de Stanley Millgram (9) sobre redes, mostraron que la organización de la sociedad en términos de redes (nodos y vínculos) ha logrado que la transmisión de la información sea cada vez más eficiente y que la posibilidad de conectarnos entre personas e instituciones de todo el mundo se ampliado notoriamente. Granovetter (8), por ejemplo, hace énfasis en su estudio publicado por la Universidad Johns Hopkins, en que los sistemas sociales requieren ampliar su marco de estudio a las relaciones entre grupos pequeños. Esto significa, que más allá de los lazos entre parientes o amigos cercanos, la sociedad depende de los vínculos débiles para comprender la manera en que se organizan los colectivos humanos.

Una de las principales propiedades de cualquier red es su no linealidad. A diferencia de las estructuras jerarquizadas o de los algoritmos en los cuales existe un solo sentido de la información, en una red se reconocen realimentaciones y por tanto sentidos dobles para el flujo informático. Las redes son emergencias que se producen como resultados de los patrones de organización y de los procesos en sistemas complejos adaptativos. Esta condición implica que la generación de una Red no puede hacerse mediante la imposición normativa o la exigencia plasmada en un contrato de prestación de servicios, por ejemplo, entre una entidad administradora de recursos de seguridad social y una institución de atención en salud. Esta idea es muy interesante dado que se habla con frecuencia de la coordinación en redes o de la organización de redes de servicios de salud, que debe cumplirse por mandato emitido por una autoridad central.

La necesidad de conectarse con otros, generar vínculos y compartir procesos se da en la práctica cotidiana y se resuelve entre los actores que así lo requieren. La teoría de emergencia (10) demuestra que la complejidad de los organismos los lleva a producir comportamientos emergentes. Estos comportamientos se producen cuando los agentes de una escala inferior empiezan a reproducir los existentes en otra escala superior. La evolución de reglas simples a complejas es lo que se denomina emergencia. La emergencia sería el resultado de una red de auto organización de agentes diversos que crean un orden superior sin proponérselo intencionalmente. Los principios centrales de la teoría

de emergencias serían: interacción entre vecinos; reconocimiento de patrones; retroalimentación y control indirecto.

La emergencia se genera cuando los agentes individuales piensan y actúan localmente, pero, su acción colectiva produce un comportamiento global. Como los organismos productores de emergencias son descentralizados dependen para su supervivencia de la retroalimentación de información, negativa y positiva, permanente. La complejidad de una condición de salud dada, por ejemplo las enfermedades no transmisibles, y las modalidades de vida que la hacen posible, deberían ser consideradas como propiedades emergentes de los organismos. Esta aproximación teórica permitiría explicar más profundamente su aparición y aportaría elementos relevantes para su intervención.

Las conexiones presentes en la red, la aparición de nuevos vínculos entre los nodos y los tipos de información que circulan entre estos, es fundamental para comprender su funcionamiento. Cuando el número promedio de enlaces es igual a uno, es decir, que cada nodo tiene en promedio un enlace; la red pasa de una fase inconexa a una fase conexas. Esto tiene grandes implicaciones porque a mayor número de enlaces

(superior al promedio de 1) la red conexas supera su punto crítico (o sea 1) y a este cambio se le llama transición de fase. Las implicaciones de que una red haya cambiado su fase y sus nodos se encuentren muy conectados entre sí, se relacionan con los efectos que pueden tener unos nodos sobre otros y por tanto, con las interacciones que se establezcan entre ellos. Esta transición de fase es el paso entre una situación en la cual existen redes que no se encuentran conectadas entre sí y una nueva situación en donde las pequeñas subredes inicialmente desconectadas, logran vincularse entre ellas. (11)

De manera contraria, si no existe conexión entre la mayoría de los nodos y algunos permanecen aislados, estos nodos solamente estarán implicados en conexiones que pueden denominarse locales y que no tendrán efectos sobre el resto de la red. En la figura siguiente se muestra la forma como una red muy organizada pasa a convertirse mediante la generación de atajos, en una red altamente desordenada. El gráfico ha sido utilizado tanto por Watts como por Solé, para explicar el paso y el cambio entre una red de mundo pequeño con bajo número de conexiones y una red conexas con gran número de atajos, vínculos y mucho desorden.

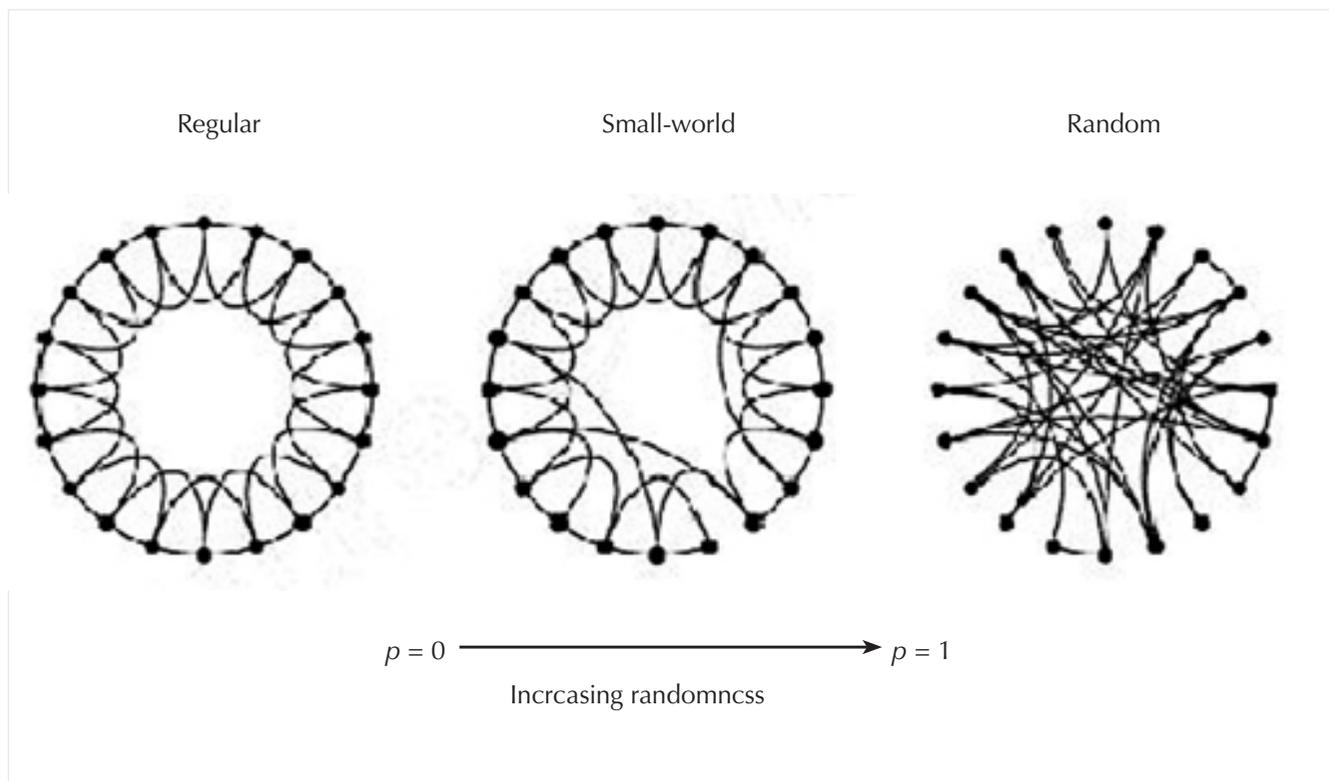


Figura 1. El cambio de una red muy ordenada a una red completamente desordenada. Watts (11). Tomada de: Watts D. P 85.

Barabási (12) dice que el principal aporte de Euler a la comprensión de las redes es reconocer que las redes o grafos tienen propiedades ocultas que limitan o multiplican su capacidad de hacer cosas. Por ello el estudio de redes tiene al menos dos dimensiones: su forma o Topología y por otro lado, la capacidad de realizar acciones o funciones. Analizar redes sociales es ante todo determinar su estructura y por consiguiente establecer los límites de posibilidad en la actuación tanto de los individuos que forman parte de ellas como de la red en su conjunto.

El estudio de las redes tiene que ver con su configuración en términos de los componentes que las conforman pero esencialmente, con la manera como el comportamiento de tales componentes individuales afecta el desempeño y las propiedades conjuntas de la red. También es importante dentro de las propiedades de las redes, que estas son consideradas actualmente objetos dinámicos que se adaptan, evolucionan y cambian en el tiempo.

Para comprender una red es fundamental entender dos asuntos primordiales: la propagación de la información y la transformación de los nodos que la conforman. Esta aproximación a las redes implica en primer término una representación real de la Estructura de la red y sus flujos informáticos, luego una caracterización de los nodos que exponga su comportamiento para permitir el flujo de la información seguida por la decisión que cada nodo toma, sobre la escogencia de los vínculos que va a utilizar para finalmente, dilucidar de qué forma los resultados del tránsito de la información van a modificar la dinámica interna de la red; cambiando los nodos y generando nuevos vínculos o destruyendo vínculos existentes. (11)

Las redes están compuestas por personas que interactúan, dentro de una comunidad o una organización. Los modelos de red se construyen para mostrar cómo estas relaciones influyen en las actitudes, creencias, y comportamientos (14). Las redes son omnipresentes y variadas; describen relaciones entre las personas y entre las personas y las cosas.

Características de la red:

Para el análisis y comportamiento de redes sociales, los gráficos o grafos se forman por dos tipos de información:

- › **los nodos** que son un punto de intersección, conexión o unión de varios elementos que confluyen, que representan a las personas o instituciones.

- › **los vínculos**, estos hacen referencia a diferentes tipos de relaciones que quieran medirse. Son flujos de ideas, recursos, datos, etc. Es decir las distintas relaciones entre los actores o nodos (15).

A su vez existen vínculos fuertes, entrelazados y conectados y vínculos débiles (ocasionales entre individuos que no se conocen uno al otro y que no tienen mucho en común). Los lazos débiles, además, se pueden ver como un enlace entre el análisis individual y el del grupo, en el sentido de que son creados por individuos, pero su presencia afecta al estatus y el rendimiento no solo de los individuos que lo poseen, sino de todo el grupo al que pertenece.

Es importante mencionar que en una red no existen jerarquías, cada nodo actúa e interactúa simultáneamente y en paralelo buscando mantenerse vivo cooperativamente. La postura científica contemporánea involucra dentro del estudio de la red, los organismos dinámicos, emergentes y no lineales.

Para Solé (16) las redes y su estudio han permitido comprender desde fenómenos elementales como el evento de encontrar a un extraño que resulta ser amigo de un compañero de colegio o la propagación de un chisme. Sin embargo al recordar el experimento de Millgram deja planteada una de las cuestiones esenciales en el estudio de las redes, la naturaleza local de la mayoría de ellas. Esto significa que las personas solo están conectadas con una pequeña parte de toda la sociedad y que, en términos generales, la mayor parte de los individuos de una comunidad son (o parecen ser) completamente extraños.

Hay algunas redes que se han estudiado en las cuales existe una organización ligada al orden. Solé llama a estas, redes regulares y pone como ejemplo los sistemas inertes moleculares e incluso la organización en cuadrícula de algunas ciudades del mundo. En este tipo de red, llegar de un punto a otro implica recorrer gran parte de los nodos o puntos intermedios y no existen "atajos" o saltos que permitan simplificar el camino.

Esta manera de conectarse que podría describirse como secuencial, dejaría a unos elementos muy distantes de otros y no permitiría el flujo de información entre ellos, sino después de haber recorrido un número muy elevado de elementos. Si por el contrario, existen los mencionados atajos y es posible que al menos algunos elementos o nodos de la red se conecten mediante saltos que superan la secuencia, el tránsito de la información será mucho más corto entre ellos y el resultado

para el conjunto de la red, es que el número de saltos reduce significativamente los pasos necesarios para ir de un lado a otro de la red. Tanto Watts como Solé describen esta nueva forma de conectarse mediante atajos que tienen inicialmente la función de conectar zonas o elementos que están distantes en la red y que rompen la secuencialidad lineal de la conexión.

Aunque el descubrimiento es originalmente de Watts, Solé lo resume y precisa que añadir un 10% de cambios del estilo mencionado (atajos), disminuiría las distancias de conexión entre zonas distantes de la red, de manera muy significativa. Estas son las Redes de Mundo Pequeño que aportan conceptos para comprender fenómenos como la violencia intrafamiliar o el embarazo en adolescentes. (17)

Además de las redes de mundo pequeño que se han mencionado, existen otros tipos de redes que deben tenerse en cuenta. En primer lugar, se ha encontrado que en muchas redes hay elementos que tienen mayor número de conexiones que otros. Estos elementos hiperconectados son muy importantes para comprender el comportamiento de esta forma particular de red. Son frecuentemente llamados Hub.<sup>1</sup>

Estos hubs explican lo que se ha descrito por Watts, Solé y Barabasi como Redes libres de Escala o que responden a leyes de potencia, en términos matemáticos. Este tipo de redes se caracteriza por tener algunos elementos de alto grado de conectividad, mientras que la mayoría de los demás elementos solo posee una o algunas pocas conexiones. Los tres investigadores han sugerido explicaciones a la aparición de los Hubs. Barabasi por ejemplo describe a estos elementos como atrayentes de conexiones cuando un nuevo elemento se incorpora a la red. La idea es que los elementos nuevos se conectarán con aquel o aquellos que estén más conectados. Esto incrementará el número de conexiones del hub al tiempo que limitará la posibilidad de los menos conectados para lograr nuevos elementos vinculados. La eficiencia de este tipo de red también resulta mayor, por cuanto estos elementos se conectarán más fácilmente con el resto de la red, mediante su vinculación con el elemento hiperconectado. Esto sin duda, hará más corto el camino entre los distintos nodos de la red que cuente con elementos altamente conectados. (11)(12)(16)

1. Debido a que la traducción literal de esta palabra es: cubo, (cuyo significado no concuerda con el contexto en el cual se está haciendo uso del término) y a que aparece en las fuentes consultadas tanto en español como en inglés; no se hará en este documento una traducción de la misma.

Otros tipos de red surgen del análisis de esta red libre de escala, no sin antes identificar que su gran fortaleza en términos de eficiencia en la conectividad, debida a la existencia de hubs, es a la vez motivo de su principal debilidad. Estas redes son altamente vulnerables, debido a que una pérdida (accidental o provocada) de sus elementos más conectados, afectará todos los procesos que la red desarrolle. Su vulnerabilidad radica en la elevada dependencia de estas redes, de sus nodos más conectados.

Solé menciona una red más equilibrada en la cual cada nodo tenga un número similar de conexiones: Red Distribuida. Una combinación de ambos tipos de red sería la que llamó Red Descentralizada, en la cual no existe una forma extrema de red libre de escala en la que un solo nodo hiperconectado sea tan visible que se vuelva vulnerable y la funcionalidad de la red se ponga en riesgo en caso de pérdida de este elemento; pero tampoco es una red distribuida tan dispersa que pierda eficiencia y haga mucho más largo el trayecto entre los nodos de la misma. La idea intermedia resultaría en una red con algunos nodos más conectados que otros, los cuales aumentan la eficiencia en los flujos de información, pero en la que no existe dependencia total de uno de sus elementos, como nodo central.

En la práctica lo que Solé advierte es precisamente que la Internet por ejemplo, es una red libre de escala que es altamente dependiente de los elementos centrales hiperconectados. Además de este ejemplo que resulta casi obvio, se explica otra red de importancia esencial en la vida actual de cualquier sociedad: la red eléctrica. A pesar de que el autor aclara que no es la red de suministro de energía eléctrica una red libre de escala, si expresa su vulnerabilidad a la falla en alguna estación central o periférica y la afectación de muchos elementos que estén conectados a ellas.

Existe una relación entre redes y epidemias. Sin duda uno de los temas que ha acaparado más atención en los últimos 30 años ha sido la aparición y propagación del Virus de la Inmunodeficiencia Humana (VIH). Desde los primeros reportes a finales de los años 70 y principios de los 80, cuando no existían registros de casos o antecedentes similares; el VIH y el SIDA han sido motivo de estudio permanente no solo en el campo de la salud, sino para estudiosos de la sociedad, desde distintas áreas académicas.

Dado que un virus biológico tanto como un virus informático, se vale de la organización en red de la sociedad; esto es, de los vínculos existentes entre los

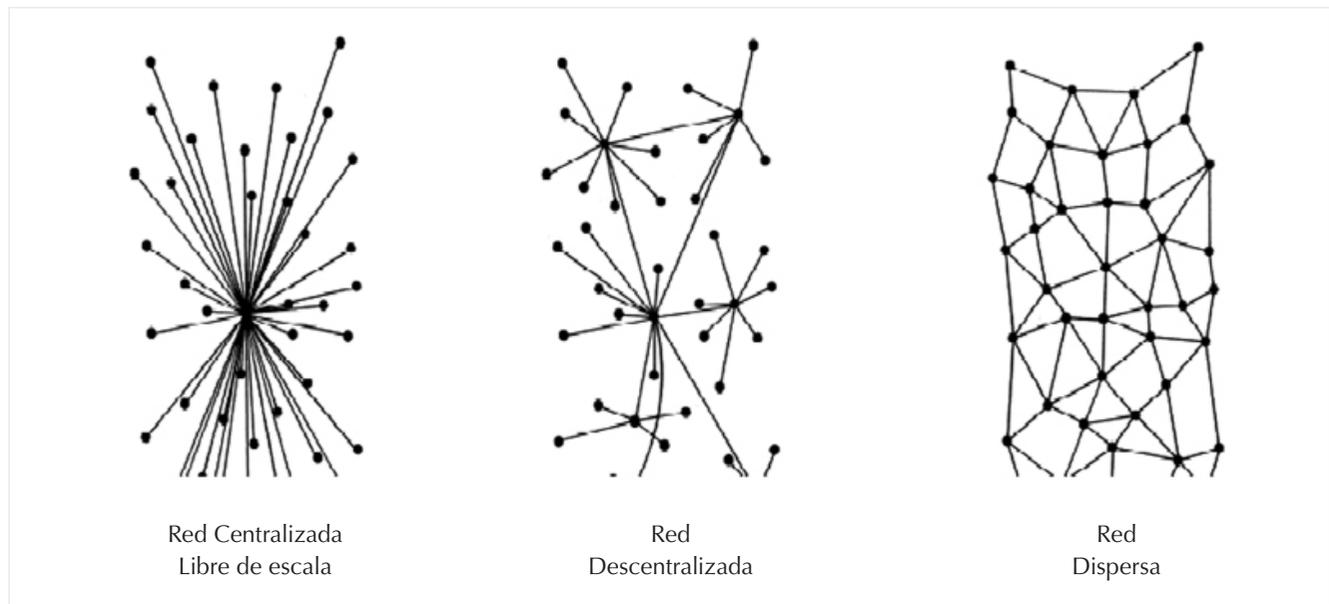


Figura 2. Distintas topologías de red. (18). Tomada de: <http://lasindias.net/indianopedia/topologías de redes>

elementos que se encuentran conectados ya sea personalmente, como miembros de una familia, de una empresa o simplemente como usuarios de un espacio público como un medio de transporte; o en el caso de los virus informáticos que en la Internet circulan haciendo una búsqueda diseminada desde un nodo hacia sus vecinos, encontrando a todos los demás que con los se encuentra conectados; la organización en red permite a todo tipo de información circular entre nodos aprovechando las conexiones existentes entre ellos. Es sin duda una de las características relevantes de las estructuras interconectadas, que ha sido estudiada por las implicaciones destructivas que puede tener de las propias redes.

En el caso de un virus tan reconocido y estudiado como el VIH, se puede hablar de alta eficiencia por el tiempo que permanece activo en las personas que infecta, lo cual le da una condición importante en términos de capacidad infecciosa. Si a esto le sumamos que en etapas iniciales de la enfermedad, no existen signos ni síntomas en las personas que lo portan y que también en los primeros meses luego de haber adquirido el virus, las pruebas inmunológicas no son capaces de detectarlo; nos encontramos con un problema que sin duda ha alertado a todas las autoridades sanitarias del planeta, que intentan cada día encontrar mecanismos para contener la infección y también para desarrollar una cura definitiva.

Pero hay ejemplos de eficiencia viral mucho más poderosos. Una de las tantas formas virales que genera

un resfriado común, es mucho más eficiente que el Virus de la Inmunodeficiencia Humana. Su transmisibilidad es bastante más sencilla, no se requiere sino un contacto esporádico o tener cercanía con la persona infectada en un espacio pequeño y preferiblemente cerrado, para que el virus se transmita sin mayores dificultades. Es evidente que no nos encontramos frente a un patógeno letal y que su efecto en términos médicos es mucho menos grave para la salud de una persona, de lo que puede ser el VIH. Sin embargo, esta baja letalidad también le permite al virus respiratorio, circular con mayor facilidad entre miles de personas en una ciudad cualquiera sin que exista la necesidad de un contacto íntimo o de una transfusión sanguínea.

Por parte de los virus informáticos, su comportamiento resulta similar en muchos aspectos. Aunque se sabe de su existencia hace varias décadas, la transmisibilidad de estos códigos maliciosos para los equipos de cómputo, estaba circunscrita al intercambio de información entre equipos mediante dispositivos portátiles, como los discos donde se guardaba información. Esto reducía significativamente la circulación del virus por cuanto el intercambio de datos entre personas y equipos no tenía el carácter global que le confirió la Internet.

Debido a que el objeto de estudio de la presente revisión está relacionado con la salud colectiva, es muy importante hablar de lo que significa una epidemia y su relación con la estructura en red de la sociedad. La palabra Epidemia proviene de las palabras griegas

*epi* y *demikos*. La primera significa sobre y la segunda población. Su significado es una enfermedad que ataca a un elevado número de personas en una comunidad, de manera simultánea. Una epidemia puede considerarse entonces como un aumento del número de casos de una enfermedad en un tiempo determinado. Esta definición resulta pertinente por cuanto se habla en la actualidad, de una epidemia de enfermedades no transmisibles. Por mucho tiempo se asoció la palabra epidemia con las enfermedades transmisibles y se pensaba que la epidemia estaba determinada por la capacidad de contagio entre personas de una enfermedad determinada. A pesar de esta idea, es posible y es acertado decir que en muchos países del mundo, las enfermedades no transmisibles (no contagiosas) tienen hoy en día, un comportamiento epidémico, debido a que afectan a grandes cantidades de personas en una población dada. ¿Será entonces pertinente analizar la organización en red de la sociedad para analizar las enfermedades no transmisibles?

Volviendo al análisis sobre la transmisión de virus en una red, Watts afirma que las enfermedades transmisibles que se convierten en epidemia requieren una condición para lograrlo. Deben tener una tasa de reproducción mayor que 1.<sup>2</sup> Esta idea es muy similar a la ya descrita de la transición de fase, que explica como una red se transforma de estar débilmente conectada a estar altamente conectada. La idea es en esencia idéntica: cuando hay nodos que no están conectados sino localmente con algunos de sus vecinos, no existe una red de alta conectividad. Existen redes de mundo pequeño. Pero cuando estas redes pequeñas se conectan por encima de un número de vínculos determinado, que también es 1, nos encontramos frente a una red conexas, en palabras del autor.

Este cambio en la proporción de conexiones o de infecciones generadas por los nodos, es significativo en la comprensión de las redes como estructura para transmitir información. Cuando hablamos de información, nos referimos en los términos de los ejemplos utilizados, a virus informáticos, virus biológicos o a datos que circulan entre los nodos conectados de una red. Si una sociedad exhibe un patrón de organización de redes de mundo pequeño, no vinculadas entre sí (en las cuales no se ha generado la transición de fase), la transmisión de una epidemia viral o de un virus de computadora es tan difícil como la circula-

ción de información que puede ser importante para la comunidad.

Sin embargo, la realidad ha demostrado todo lo contrario. La epidemia de infección por VIH y el SIDA, han demostrado que esta enfermedad pasó de estar concentrada en unos grupos definidos de la población, a alcanzar a personas de toda la organización social y en algunos países de África, a infectar a un número significativamente alto de personas. La razón para este salto y este cambio de fase de una red de mundo pequeño hacia una red altamente conectada, se encuentra en la facilidad creciente de interacción entre personas de distintas razas, creencias y procedencias en todo el mundo, que sin duda propicia el intercambio de mucho más que una tarjeta de negocios. La globalización ha tenido también este efecto.

En términos de la teoría de redes complejas, la búsqueda diseminada que un virus hace por los nodos de una red, explica por qué el patrón de diseminación cambia constantemente y alcanza a grupos que se consideraban inmunes a su presencia o al menos, suficientemente aislados. En palabras de Watts y Strogatz (13):

“que exista un camino corto a través de una red de contactos entre un infectivo y un susceptible tiene importancia si cada uno sabe que ese camino está ahí, o incluso si pueden llegar a encontrarlo, en caso de quererlo. A menos que de algún modo se llegue a detener la enfermedad, ésta encontrará el camino, porque se dedica a explorar ciegamente la red buscando todos los caminos sin excepción”.

Solé plantea algunas ideas complementarias a este asunto. Por ejemplo identifica la propagación de las enfermedades como un escenario de todo o nada, en el cual el punto crítico de la transición de fase solo es alcanzado por algunas infecciones. Las que no lo logran, es decir, las que no se transmiten de manera eficiente, desaparecerán porque el micro organismo patógeno que las origina, tiende en ese caso, a desaparecer. Esto también se explica por lo que hacen las vacunas. Si existe una cantidad de personas suficientemente grande como para impedir o bloquear la transmisión de una enfermedad determinada; el umbral crítico o la transición de fase se retardará mucho y en algunos casos nunca se alcanzará. Pero no solo las vacunas son importantes cuando se busca limitar la diseminación de una infección. Es frecuente encontrar acciones preventivas de índole informativa, dirigidas a poblaciones consideradas de riesgo de contraer y además, de aumentar la propagación de un patógeno infeccioso. Estas poblaciones se comportan como los

2. El concepto de tasa de reproducción se explica como el promedio de nuevos infectados que son generados por cada individuo infectado. (Watts, página 174).(11)

elementos hiperconectados que ya se mencionaron, se comportan como *hubs* que al estar más ampliamente vinculados con elementos de una red determinada, sirven como atajos para que el virus o la entidad patógena se conecte con esos grupos de mundo pequeño, que están menos vinculados con el resto de la red. En términos de prevención de enfermedades transmisibles, los programas preventivos enfocados en grupos de riesgo como las trabajadoras sexuales, son muestra de la aplicación del concepto de *hub* para evitar o al menos, reducir el número de personas que se contagian de una enfermedad de transmisión sexual.

En un intento por entender las propiedades estructurales de las redes de mundo pequeño que afectan la propagación de epidemias y la intervención, Zengwang y colaboradores encontraron que las epidemias que ocurren en las redes de mundo pequeño tienen más probabilidad de llegar a una gran epidemia en un corto período y que las intervenciones en las redes de mundo pequeño tienen un impacto significativo sobre la propagación de la epidemia (19) debido a que las enfermedades infecciosas se propagan más fácilmente en las redes de mundo pequeño que la red en general (13)

Sin embargo pueden existir atajos que pueden ser claves para el crecimiento explosivo de la enfermedad es decir un salto de red de mundo pequeño al exterior encontrándose con otras redes. Las epidemias de una red de mundo pequeño tienen que sobrevivir primero a una fase de crecimiento lento durante la cual son muy vulnerables. Cuanto menos es la densidad de atajos en la red, mas es duradera la fase de crecimiento lento. Por lo anterior una estrategia de prevención de las epidemias concebidas en función de la red, no solo trataría de reducir las tasas de infección en un sentido general, sino que se centraría también de manera particular en cuáles son las fuentes probables de atajos. Los brotes de enfermedades infecciosas en las comunidades se pueden controlar mediante la detección temprana y las medidas de prevención eficaces (20).

En salud, el análisis de redes ha tomado un papel importante para entender el comportamiento humano y sus interacciones en la aparición de epidemias. En un estudio se utilizó la topología de red del mundo pequeño generalizada para representar los contactos ocurridos dentro y entre familias, teniendo como resultados, que el incremento del número de familias conectadas modificó el tamaño de las enfermedades infecciosas en una proporción de casi 400%. Por lo que la estructura de la población influye en la propagación rápida de las enfermedades infecciosas y puede alcanzar efectos epidémicos (21).

La organización de los seres vivos en redes también ha sido estudiada desde la ecología. Solé recuerda la forma como los ecosistemas se organizan en estructuras en red, que a su vez tienen relación con otros ecosistemas también organizados en red. A esta forma particular, la llama organización fractal. Dentro de esta forma de relaciones, existen unos organismos con gran número de conexiones y otros con un pequeño número de ellas. Esto muestra una característica de los ecosistemas, que es la especialización de funciones. Los organismos altamente conectados son denominados “generalistas” y tienen la capacidad de explotar muchos recursos de la amplia cantidad de vínculos que poseen dentro de su ecosistema y de los que con este se encuentran también conectados. Los organismos menos conectados hacen parte de las redes que los generalistas aprovechan de manera más eficiente. La organización como fractales de los ecosistemas implica que existen relaciones que se repiten en distintos niveles de un mismo sistema general.

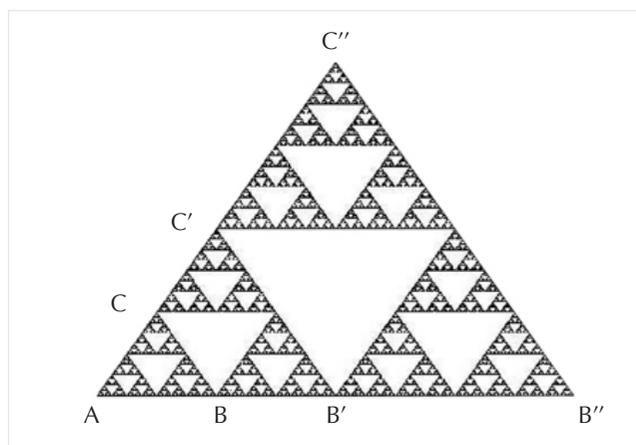


Figura 3: Fractales: el triángulo de Sierpinski. (22). Tomado de: <http://lanostalgiayelrecuerdo.blogspot.com/2011/09/la-belleza-de-los-fractales.html> (22)

La idea de organización fractal de los ecosistemas implica además reconocer que cada individuo vivo, tiene una relación con otros individuos que pueden convivir dentro de él. Los seres humanos por ejemplo, albergamos miles de bacterias patógenas y no patógenas que conviven y como resultado de su interacción, se explica la aparición y también la cura de diversas enfermedades humanas.

La diversidad biológica es una respuesta a las amenazas que aparecen sobre la red. Los cambios, las mutaciones y las adaptaciones de diversa índole le confieren a una organización en red, la capacidad

de defenderse de agresiones y también de aprender de las experiencias pasadas. En el campo informático, una de las maneras que tienen las redes tipo Internet de protegerse de los ataques de *hackers* o de virus de computadora, es precisamente ampliar la diversidad de sus sistemas, de manera que su vulnerabilidad no sea tan grande, por tener características idénticas en muchos elementos de la red.

Albert, Jehong y Barabási, (23) profundizan sobre el análisis de la vulnerabilidad de los distintos tipos de red. Su investigación muestra que las redes sin escala en las cuales los nodos altamente conectados son muy pocos, tienen menor riesgo de colapsar por un ataque o por un fallo enteramente aleatorio. Debido a que los nodos de alta conectividad son escasos, lo más probable es que una afectación aleatoria, no los golpee directamente. En cambio, si lo que aparece es realmente un ataque planeado, no aleatorio sobre una red sin escala como Internet, seguramente estará dirigido a nodos altamente conectados y por ello, la vulnerabilidad de tal red si será mucho mayor y su capacidad de respuesta o de reponerse a esta agresión, también se disminuirá de manera significativa.

Además de ello, identificaron estas características de manera homogénea entre las redes libres de escala. En estas redes, existe una solidez que les confiere una buena base de tolerancia de errores que está presente en muchos sistemas complejos, que van desde las células de un organismo viviente, hasta sistemas de comunicación distribuidos. De igual manera, Barabási y su equipo afirman que esta robustez es la responsable de que, a pesar de que existen frecuentemente algunos cortes en la red mundial y que a pesar de la falta de disponibilidad temporal de muchas páginas web, nuestra capacidad para navegar y localizar información sobre la web no se ve seriamente afectada.

## Decisiones, cooperación y redes

Un asunto que ha sido abordado desde la teoría de redes, es el que tiene que ver con los procesos de toma de decisiones tanto a nivel individual como a nivel colectivo. Las distintas formas mediante las cuales las personas deciden en su vida cotidiana, sobre una gama de opciones creciente, ha sido estudiada desde diversas áreas del conocimiento. Se puede decir que uno de estos campos de estudio es sin duda, la economía. Watts recuerda en el capítulo 7 de su libro, (11) que para Adam Smith los seres humanos son tanto egoístas como racionales y que en consecuencia, los agentes en tanto racionales siempre actúan tratando de optimizar sus intereses egoístas. Para Smith, el resultado colectivo es tan bueno como cualquier otro posible.

Pero esta idea de ser humano racional no es nueva y realmente aparece y crece desde el renacimiento, cuando se interpretó al hombre como un ser racional por naturaleza, dotado de manera innata de la capacidad de utilizar información para tomar decisiones que le beneficiaran al logro o consecución de sus intereses y objetivos primarios. Luego el liberalismo económico haría eco de esta idea y la aplicará en su desarrollo teórico y práctico.

La teoría de la Elección Racional plantea que el ser humano es un decisor. Un individuo que cuenta con capacidades ilimitadas de información y además con una capacidad de pensamiento (computacional). Además de ello, este individuo también es capaz de desarrollar un comportamiento totalmente estratégico y maximizador de utilidades a la hora de tomar una decisión.

De este “perfil” de humano racional se desprende que una elección racional tenga al menos las siguientes características:

1. El agente puede maximizar la utilidad esperada. (la mejor forma de satisfacer su deseo)
2. Las creencias del agente deben ser las mejores posibles. (mayor probabilidad de ser verdad)
3. La cantidad de información que posee el agente debe responder a un óptimo en su adquisición.

Para lograr este discernimiento ideal, cada persona debe ser capaz de jerarquizar sus opciones, es decir, de asignarles un peso o un valor ordinal en una escala clara y coherente. De esta manera, hará la mejor elección posible en un marco de maximización de sus intereses y beneficios. Esto significa que los individuos, finalmente, se guían por su interés personal.

No es posible hablar de elección racional si no se cumple además de lo anterior, que el individuo pueda libremente desarrollar su proceso mental gozando de: capacidad racional, tiempo e independencia emocional para tomar sus decisiones. Esto además se supone posible, independientemente de la dificultad de la decisión a tomar. Pero no es la única suposición que se hace en esta teoría. Además se espera que no exista ningún grado de incertidumbre para tomarla y que la decisión de una persona no pueda verse afectada por las decisiones de otras personas. De igual manera, supone que no existen externalidades que puedan afectar todo el proceso decisorio. La existencia de tales externalidades es ampliada por Watts (13) desde el concepto de Externalidades de Decisión que a su vez, divide en tres tipos: coercitivas, del mercado y de coordinación.

Es claro que la teoría de la Elección Racional, se sustenta esencialmente sobre el individualismo metodológico. Esto significa que su objeto de análisis es el individuo. Pretende explicar el comportamiento colectivo, a partir del comportamiento individual y se aparta por tanto, del reconocimiento de las externalidades mencionadas. Esta característica también marca sus potencialidades a la vez que sus limitaciones, esencialmente en el campo político donde se ha aplicado con frecuencia.

Herbert Simon, premio Nóbel de Economía, (24) se planteó la necesidad de construir un marco teórico alternativo al propuesto desde la elección racional, para explicar los procesos de decisión en un escenario de incertidumbre como el que sucede en la realidad. En el prefacio de su libro: *Naturaleza y límites de la razón humana* Simon dice que: “la naturaleza de la razón humana –sus mecanismo y consecuencias para la condición humana- ha sido mi preocupación principal durante cincuenta años aproximadamente.” En esta empresa, Simon se interesó por comprender tres asuntos fundamentales. La relación de la razón con la emoción y la intuición, la analogía entre adaptación racional y evolución y las implicaciones de la racionalidad limitada para la operación de las instituciones políticas y sociales.

El concepto que elaboró es el de la Racionalidad Limitada, que puede definirse como el proceso de decisión de un individuo considerando limitaciones cognoscitivas tanto de conocimiento como de capacidad computacional. Para llegar a esta formulación, Simon hizo un análisis sobre las limitaciones de la razón humana, señalando algunos elementos que vale la pena citar:

“existe una arbitrariedad en el proceso de razonamiento que tiene consecuencias importantes: primera, pone para siempre fuera de alcance un inexpugnable principio de inducción que nos permitiría inferir leyes generales infalibles sin riesgo de error a partir de hechos específicos...” (24)

Se llama la atención sobre el problema de inducción que está presente en la ciencia, según el cual las observaciones de eventos o fenómenos permitirán inferir normas o leyes generales. También se señala que todo aparato teórico tendrá influencia en nuestra comprensión de la realidad observada.

El autor reconoce que no existe una sola forma de racionalidad. Que existen distintas racionalidades: La racionalidad perfecta postula a un “hombre heroico que efectúa elecciones comprensivas en un universo

integrado.” El apelativo de Olímpica probablemente obedezca a que se le asigna esta racionalidad perfecta a los dioses pero definitivamente considera que no es posible en la mente de los hombres. Dice además que esta forma de racionalidad supone que este humano toma decisiones observando previamente de manera total y amplia todo lo que existe ante él. Que comprende la gama de elecciones a su disposición, independientemente del tiempo presente o futuro en el cual su decisión tenga efecto o alcances.

La segunda racionalidad, llamada imperfecta o conductual no existen decisiones infinitas en el tiempo. Se circunscribe por tanto, a resolver problemas particulares que implican en los casos de simultaneidad, que el humano haga una priorización de lo que se considera más importante en el momento. El rasgo fundamental de este modelo, que Simon nomina como Racionalidad Limitada es que el individuo actúa sobre probabilidades. Es también una racionalidad imperfecta:

“la racionalidad del tipo limitado no se perfecciona. Ni siquiera garantiza que nuestras decisiones sean consistentes. En realidad es muy fácil mostrar que las elecciones efectuadas por un organismo con estas características, a menudo dependerán del orden en que se presenten las alternativas.” (24)

En tercer lugar aparece la racionalidad intuitiva que plantea que: “gran parte del pensamiento humano y del éxito que tienen los seres humanos al obtener decisiones correctas se debe al hecho de que cuentan con buena intuición o buen juicio”

Como conclusión, Simon dice que la tercera y la segunda formas de racionalidad están totalmente vinculadas. Ubica a la racionalidad intuitiva como una parte de la racionalidad conductual y le da un valor tanto a la experiencia y a la intuición humana, como a la capacidad de decidir en escenarios de incertidumbre y riesgo.

La racionalidad perfecta es la que se espera de las personas cuando se habla de promoción de la salud y prevención de la enfermedad. Se espera un individuo con todas las capacidades descritas para que tome decisiones totalmente racionales y de esta manera evite la aparición de enfermedades. Esto no es posible en la realidad, según lo explica Simon.

La racionalidad humana, las elecciones y las decisiones también tienen campos teóricos que han seguido su desarrollo reciente. De acuerdo con las ciencias cognitivas, los humanos experimentamos procesos computacionales que actúan sobre las repre-

sentaciones mentales para producir el pensamiento y la inteligencia humana. Las representaciones mentales básicas, encontradas por las ciencias cognitivas, son: lógicas, reglas, conceptos, imágenes, analogías y conexiones. (25) Los procesos computacionales básicos, encontrados por la investigación en ciencias cognitivas, son: resolución de problemas (planificación, decisión y explicación); aprendizaje y uso del lenguaje. La combinación de representaciones mentales y procesos computacionales generan la conducta.

La doble condición de apertura (información) y cierre (operativo) que tienen los nodos y las redes orgánicas humanas les permite desarrollar procesos autónomos y en red de: racionalización, elección y decisión para actuar afortunadamente frente a las condiciones siempre cambiantes de los entornos. Los organismos humanos se pueden adaptar si sus procesos primitivos de racionalización, elección y decisión evolucionan (26). La vida de los organismos humanos depende de los dispositivos que estos utilicen para resolver problemas. Las investigaciones filosóficas, psicológicas, sociológicas, antropológicas y económicas contemporáneas nos demuestran la importancia de indagar acerca de las formas de resolver problemáticas que tienen los humanos. El estudio de los tipos de razón, elección y decisión que utilizan los humanos, individual y colectivamente, contribuiría a construir estrategias de intervención en este campo (27).

La racionalidad individual permite no obstante, pensar en comportamientos colectivos. El estudio de la cooperación ha estado en la agenda científica contemporánea durante muchos años. Nowak (28) relata que para el mismo Charles Darwin, la cooperación y el altruismo eran un asunto de interés. Científicos sociales y naturales (29) de todo el mundo, junto con matemáticos y sociólogos estudian actualmente las condiciones en las cuales la cooperación se genera en escenarios ampliamente diversos.

Pese incluso a las exigencias de un mundo individualista, en el cual la racionalidad perfecta y personal ha sido utilizada como pretexto de la maximización; la cooperación (30) resulta la alternativa más estratégica en juegos de larga duración, donde cada uno de los actores debe pensar no solo en lo que hace para y por sí mismo, sino en lo que hacen los otros. Esta necesidad de tener en cuenta las acciones de otros jugadores es lo que impulsó a H. Simon a hablar de la racionalidad limitada y a Nowak a plantear las alternativas de resolución del conocido dilema del prisionero. Las redes humanas para coevolucionar tienen que razonar, elegir y decidir en mutua dependencia teniendo en cuenta

las variabilidades biológicas, políticas, económicas, culturales y sociales que emergen durante sus interacciones. Las teorías de racionalidad, elección y decisión nos permiten lograr una explicación más profunda de las problemáticas que se presentan en estos campos y ámbitos (31)(32).

### Modelamiento y simulación compleja

Los orígenes de las ciencias de la complejidad han sido rastreados por varios autores. Alguno de ellos, (33) los ha ubicado en cercanía con la Teoría General de Sistemas de Ludwing Von Bertalanfy en los años 20 del siglo pasado. No obstante este es uno de los puntos de debate que vale la pena enunciar, por cuanto no se debe confundir la teoría sistémica con las ciencias de la complejidad, que precisamente toman distancia de los postulados sistémicos, aunque hagan uso de algunas expresiones que de allí se derivan. Particularmente, se habla con frecuencia de Sistemas Complejos Adaptativos<sup>3</sup>, lo cual puede ser causante de confusión entre los sistemas propiamente dichos y los organismos, fenómenos o eventos complejos de los cuales se ocupan las ciencias de la complejidad.

Para el mismo autor, un nexo que existe entre la teoría de Sistemas y las ciencias de la complejidad, está en la Cibernética que estudia los procesos de alimentación, que ocurren en los sistemas y de esta manera identifica diversos niveles de autonomía y de estabilidad que funcionan por medio de ciclos o bucles de naturaleza positiva y negativa. Tales bucles son necesarios cuando se consideran relaciones que tienen un comportamiento complejo y comparten algunas características:

- › No linealidad
- › Ciclos de refuerzo y balance
- › Retrasos en los flujos de información
- › Interdependencia de actores

Una manera de estudiar y a la vez expresar estas relaciones que difieren de lo esperado en escenarios complejos, es la construcción de modelos de simulación. Una de las aproximaciones más empleadas a la construcción de estos modelos es la Dinámica de Sistemas que fue propuesta en 1950 por Jay Forrester

3. Muray Gell-Mann, aclara en su artículo clásico de 1995, que otro autor de referencia en el campo de la complejidad: John Holland prefiere usar el nombre "agente adaptativo" y dejar la expresión "sistema complejo adaptativo" para los sistemas compuestos de varios agentes adaptativos, como la economía o los sistemas ecológicos. (Gell-Mann, 1995)

en el MIT. El propio Forrester ha dicho que los sistemas sociales son de un tipo que él denomina: "Sistemas con ciclos múltiples de re alimentación" (34). Las primeras aplicaciones de la Dinámica de Sistemas se hicieron sobre sistemas del campo de la ingeniería, que se basaban en la Teoría General de Sistemas para su construcción y aplicación. Posteriormente se ha visto la necesidad de utilizar estas aproximaciones metodológicas para el estudio de los sistemas sociales, que exhiben comportamientos complejos, no lineales con la aparición de ciclos internos de refuerzo y balance.

Por esta ampliación del campo de estudio y aplicación de la Dinámica de Sistemas, es que recientemente se han encontrado investigaciones sobre su utilidad en el campo de la salud, en diversos aspectos como el intercambio de información en entidades hospitalarias (36), salud pública (37) y las políticas de salud (38).

Incluso los sistemas de salud, (39) que han sido planeados desde la lógica sistémica, se comportan como organizaciones complejas donde emergen características más propias de los Sistemas Complejos Adaptativos que son objeto del estudio de las ciencias de la complejidad. Estos sistemas de salud presentan características propias de los sistemas vivos, que son los que constituyen el ejemplo más consistente de un comportamiento Complejo y Adaptativo. Los sistemas de salud son:

- › No lineales,
- › Diversos en sus componentes y relaciones,
- › Adaptables y modificables según sus experiencias,
- › Co evolutivos y co-dependientes.

La salud pública ha pasado de ser considerada simplemente desde la perspectiva tradicional en la cual, la epidemiología era la principal (a veces la única) herramienta; a nutrirse de nuevos campos teóricos y nuevas aproximaciones metodológicas para su comprensión y explicación. Particularmente la epidemiología y la estadística están sustentadas en la ciencia moderna, construida desde el pensamiento mecánico con una pretensión predictiva. Desde esta tradición, la salud de las comunidades o grupos humanos, podría reducirse al estudio de los resultados de los indicadores de salud de sus integrantes y la descripción de la distribución de estos indicadores. Reduccionismo, linealidad y jerarquización (33) son las características más relevantes del pensamiento tradicional en salud pública. A su vez, la linealidad implica proporcionalidad (es decir, una relación causa- efecto o dosis-respuesta) y superposición (que implica relaciones causales y suma de causas, así como suma de efectos). Este tipo de expli-

cación supone que no haya sorpresas o resultados inesperados. Tampoco comportamientos no previsibles entre los participantes.

La linealidad se expresa en que siempre es esperable un comportamiento similar, eso es, que exista un resultado de la misma naturaleza cuando se incorpora un elemento conocido cuyo comportamiento y efectos han sido previamente observados. La jerarquización implica una fuente de control centralizado. Un mando central unificado con pocos niveles de autonomía de los demás componentes. Los flujos de energía (que en complejidad pueden considerarse información) tienen una sola dirección y van del centro de control hacia la periferia.

El mismo autor propone una definición de Sistemas Complejos Adaptativos como:

"un grupo o conjunto de agentes individuales con libertad para actuar en formas que no son totalmente predecibles y cuyas acciones está interconectadas de manera tal que la acción de un agente cambia el contexto para los demás agentes."<sup>4</sup> (33)

Los ciclos o bucles de re alimentación que se expresan en el comportamiento de los sistemas complejos adaptativos, son una expresión de la no linealidad de las relaciones que existen y emergen al interior de estos sistemas. Algunos ejemplos son relativos precisamente a los sistemas de salud: si se aumenta la provisión de los servicios de salud, también se aumenta la demanda de servicios. Esta realimentación positiva se expresa también en el costo de los servicios de salud, cuyo costo aumenta y este aumento presiona costos y gastos aún mayores (40). Como parte de los sistemas de salud, el autor también advierte la complejidad de las instituciones de salud es mayor que la que se puede encontrar en otro tipo de organizaciones, por ejemplo, de manufacturas o servicios.

Plsek y Greenhalgh (41) muestran el campo de la atención en salud como un escenario de alta complejidad donde confluyen distintos sistemas vivos. Cualquier grupo humano, incluyendo los equipos de profesionales que hacen atención en salud, son un sistema complejo. Los problemas de la salud colectiva deben separarse para su estudio, de las metáforas del reloj compuesto de partes intercambiables, porque los actores son adaptativos y esto modifica el sistema.

4. Traducción de los autores. El texto original dice: "a collection of individual agents with freedom to act in ways that are not always totally predictable, and whose actions are interconnected so that one agent's action changes the context for other agents"

Hay coevolución y aprendizaje. Son impredecibles, no lineales y presentan tensiones y paradojas que no pueden y no necesariamente deben resolverse.

Las teorías contemporáneas proveen un sustento y una oportunidad de amplia aplicación en campos como la Vigilancia en Salud Pública (42), en análisis de enfermedades transmisibles y no transmisibles y epidemias (43), en violencia interpersonal (44) e incluso en política pública (45). De igual manera, se encuentran investigaciones que aplican conceptos de dinámicas sociales, dinámicas de sistemas, caos y emergencias en las instituciones de provisión de servicios de salud. Por ejemplo, Bar-Yam (44) (46) estudia las debilidades de los sistemas de salud para administrar los recursos y resolver los problemas de la atención individual y colectiva. Identifica la necesidad de análisis múltiples que reconozcan la debilidad del control central, las limitaciones de la automatización de los procesos, la comprensión más profunda de los mecanismos de información en salud que se asocian con errores médicos y además, la urgencia de incorporar campos de comportamiento organizacional que promuevan la cooperación y no la competencia entre actores. Con un alcance diferente, la teoría de caos ha tenido aplicaciones en otros escenarios directamente relacionados con las técnicas más tradicionales de la salud pública, como la promoción de la salud y los cambios en el comportamiento humano (52). Se reconoce en este estudio, que el cambio de comportamiento es no lineal y básicamente impredecible.

Kannampallil et al, (47) identifican los sistemas de atención en salud como redes de actores donde estos actúan como nodos y sus relaciones como vínculos. La información que circula entre ellos son los registros médicos (individuales y colectivos) con propiedades adaptativas y emergentes que no responden a mandos centrales ni se comportan como algoritmos. Las redes son emergencias de la relación que dos o más nodos establecen entre ellos. Tales relaciones son llamadas vínculos, porque su naturaleza es esencialmente bidireccional, con características tales como sincronía, acoplamiento y codependencia. Las redes se crean para resolver problemas. Los sistemas vivos requieren de otros para subsistir. Una organización viva, activa, dinámica; buscará siempre mantenerse vigente. En este proceso hará lo posible por resolver sus propios problemas y para ello recurrirá a otros que le permitan lograr ese propósito. Una red no entiende de directores de orquesta o de jerarquías. Las relaciones son homogéneas, horizontales y como ya se ha dicho, codependientes. Son además contingentes, no permanecen inmutables en el tiempo sino que pueden

desaparecer una vez hayan alcanzado sus objetivos. Cuando tales objetivos cambian, la red también lo hace. Aprende y aplica sus aprendizajes. (53)

Pero aún más posibilidades deben considerarse actualmente, como efecto de las ciencias contemporáneas en diversos campos de pensamiento y acción. La salud y la sostenibilidad ambiental desde la perspectiva del caos (48), son consideradas como escenarios de interacción lejanos a la antigua idea del equilibrio.

## CONCLUSIONES

La complejidad es en esencia un programa de investigación, que incorpora nuevas formas de pensar los fenómenos biológicos, sociales y políticos. La salud pública comparte estas características y por ello, es un campo en el cual las ciencias contemporáneas tienen enormes posibilidades explicativas y de acción. Los desarrollos de estas ciencias no son abundantes en salud pública hasta el momento. La formación académica en las escuelas de salud ha estado muy ligada a la tradición positivista con fundamentos en la epidemiología y la estadística que tienen como base conceptual la linealidad de los fenómenos, la causalidad y la predictibilidad de los eventos. Estas pautas son en esencia, limitaciones para una comprensión más amplia y eficaz que permita cambiar la acción que sigue teniendo resultados limitados y en muchos casos, fracasos ante las problemáticas que busca resolver.

Conceptos arraigados en los discursos de la salud pública deben ser entonces, revisados y pensados nuevamente bajo el influjo de esta nueva perspectiva teórica. La territorialidad por ejemplo, hoy es discutible si se consideran efectos de las redes complejas y de su expresión en los mecanismos de comunicación en tiempo real que la tecnología provee a, cada vez más personas en el mundo. Una sociedad de redes será distinta a la sociedad circunscrita a un territorio (49). La deslocalización de las personas mediante el acceso a otros con los que se comparten visiones de mundo, pero que no se encuentran en su entorno físico cercano, es ahora otro de esos nuevos retos para pensar la salud. (50)

Si bien el presente artículo de revisión, propone algunas de estas ideas hasta ahora poco aplicadas en el campo de la salud pública, son muchas más las teorías que comienzan a tener relevancia en su comprensión. Azar, adaptación, fluctuaciones, autoorganización e impredecibilidad; (51) son algunas más que están forzando un cambio paradigmático hacia

comprensiones distintas de eventos y fenómenos largamente estudiados.

Por todo lo anterior, se considera que el desarrollo de investigaciones con este marco teórico, especialmente los desarrollos recientes en la conceptualización de las redes complejas y de manera conexas, las teorías de elección y decisión junto con los más recientes avances en la comunicación; aportan nuevos y mejores elementos de explicación a los temas de la salud colectiva y que serán significativas para modificar los resultados e innovar en los aspectos epistemológicos y metodológicos de la salud pública y por tanto y más importante, los resultados de sus acciones en todo el mundo.

## REFERENCIAS

1. Maldonado C. Significado e impacto social de las ciencias de la complejidad. Bogotá: Ediciones Desde Abajo., 2013
2. Deutsch D. La Estructura De La Realidad, Barcelona: Gedisa, 1997
3. Capra F. La Trama De La Vida. Barcelona: 3ª edición. Anagrama, 2009
4. Dabas E, Najmanovich D. Redes, el lenguaje de los vínculos. Buenos Aires: Paidós, 1995
5. Morín E. Introducción Al Pensamiento Complejo, Barcelona: Gedisa, 1994
6. Reeves H, et al. La Historia Más Bella Del Mundo, Barcelona: Quinteto, 2007
7. Kauffman S. Investigaciones. Barcelona, Tusquets. 2000
8. Granovetter, M, The strength of weak ties. American Journal of Sociology; vol 78, No. 6. Traducción de María Ángeles García. 1973
9. Maya I. Internet, Amigos y Bacterias: La Alargada Sombra de Stanley Millgram. Universidad De Sevilla. 2006
10. Johnson S. Emergence. London, Penguin Books. 2003
11. Watts D. Seis Grados De Separación. La Ciencia De Las Redes En La Era Del Acceso. Barcelona: Paidós, 2006
12. Barabási AL. Linked. U.S.A: Perseus Books, 2003
13. Watts, D, Strogatz, S. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature. Jun 4;393(6684):440-2. 1998
14. Valente, T. Social Networks and Health. Models, Methods, and Applications. New York. Oxford University Press. 2010
15. Clark L. Manual para el Mapeo de Redes como una Herramienta de Diagnóstico. La Paz, Bolivia. 2006
16. Solé, R. Redes Complejas. Del Genoma A Internet. Tusquets. 2009
17. Cárdenas H, Roldán L, Rodríguez G, Rodríguez A, Sandoval J, Sarmiento M, Velásquez C. Redes sociales y mujeres gestantes. Universidad El Bosque. Escuela Colombiana de Medicina. 2008
18. Topologías de redes. Disponible en: [http://lasindias.net/indianopedia/topologías de redes](http://lasindias.net/indianopedia/topologías%20de%20redes). Consulta realizada el 1 de septiembre de 2015.
19. Xu, Z, Sui, D. Effect of Small-World Networks on Epidemic Propagation and Intervention. Geogr Anal;41(3):263-282. 2009
20. Smieszek, T, y Salathé, M. A low-cost method to assess the epidemiological importance of individuals in controlling infectious disease outbreaks. BMC Medicine;11:n/a-35. 2013
21. Ruiz-Ramírez, J, Hernández-Rodríguez, GE. Stochastic model of infectious diseases transmission. Salud pública de México;51(5):390-396. 2009
22. La Belleza De Los Fractales. Disponible En: [Http://Lanostalgiayelrecuerdo.Blogspot.Com/2011/09/La-Belleza-De-Los-Fractales.Html](http://Lanostalgiayelrecuerdo.Blogspot.Com/2011/09/La-Belleza-De-Los-Fractales.Html). 2015
23. Albert R, Jehong H, Barabási L. Error And Attack Tolerance Of Complex Networks. Nature. Vol 406. July. P 378 -381. 2000
24. Simon, H. Naturaleza y Límites De La Razón Humana. Fondo De Cultura Económica. México. 1983
25. Thagard, P. La mente. Introducción a las ciencias cognitivas. Katz conocimiento. 2008.
26. Dennett, D. La peligrosa idea de Darwin. Galaxia Guttemberg. 2015
27. Schick, F. Hacer Elecciones. Barcelona. Gedisa. 2000
28. Nowak, M, Highfield, R. Supercooperadores. Las Matemáticas De La Evolución, El Altruismo

- Y El Comportamiento Humano. Ediciones B. Barcelona. 2012
29. Douglas, M. Como piensan las instituciones, Madrid, Alianza. 1996
  30. Axelrod R. The evolution of cooperation. Revised edition. Basic Books. 2006
  31. Nozick, R. La naturaleza de la racionalidad. Barcelona, Paidós. 1995
  32. Davis, M. Game theory. A nontechnical introduction. New York. 2003
  33. Jayasinghe S. Conceptualizing population health: from mechanistic thinking to complexity science. *Emerging themes in epidemiology*. 2011; 8:2.
  34. Forrester WJ. Counter intuitive behavior of social systems. Updated from original paper published in the issue of the *Technology Review* published by the Alumni Association of the Massachusetts Institute of Technology. 1995.
  35. Gell-Mann M. What is Complexity? Remarks on simplicity and complexity by the Nobel Prize-winning author of *The Quark and the Jaguar*. *Complexity*, 1995. 1: 16–19. doi: 10.1002/cplx.6130010105.
  36. Merrill, J, Deegan M, Wilson RV, Kaushal R, Fredericks K. A system dynamics evaluation model: implementation of health information exchange for public health reporting. *J Am Med Inform Assoc*. 2013; 0:1-8. January 2013. Downloaded from [bmj.com](http://bmj.com)
  37. Homer J, Hirsch G. Systems Dynamics modeling for public health: Background and opportunities. *American Journal of Public Health*. March 2006: Vol 96, No.3
  38. Sterman J. Learning from evidence in a complex world. *American Journal of Public Health*. March 2006, Vol 96, No. 3
  39. Martínez-García M and Hernández-Lemus E. Health Systems as Complex Systems. *American Journal of Operations Research*, 2013: 3, 113-126. Published Online January 2013 (<http://www.sciarp.org/journal/ajor>)
  40. Tennison B. Complexity in epidemiology and public health. En: Sweeney K and Griffiths F. *Complexity and Healthcare. An introduction*. Radcliffe Medical Press. United Kingdom. 2002.
  41. Plsek y Greenhalgh. The challenge of complexity in health care. *British Medical Journal*. 2001. 323:625.
  42. González M, Vargas Z. Caracterización de la red social para una estrategia de vigilancia en salud pública de la enfermedad respiratoria aguda, Cajicá, Colombia. Tesis de Maestría en Salud Pública. Universidad El Bosque. 2015
  43. Almeida-Filho N. Complejidad y transdisciplinariedad en el campo de la salud colectiva. *Salud Colectiva*. Buenos Aires. 2006: 2(2).
  44. Munar EF. Analizando y modelando la violencia interpersonal en la ciudad de Bogotá apoyado en información geográfica. Tesis de Maestría en Salud Pública. Bogotá. Universidad El Bosque. 2014
  45. Bar- Yam Y. Complexity theory in applied policy worldwide. In: *Modeling complex systems for public policies*. Alves B, Furtado P, Sakowski M, Tóvolli M. Brasília: IPEA, 2015.
  46. Bar- Yam Y. Improving the effectiveness of health care and public health: A multiscale complex systems analysis. *American Journal of Public Health*. March 2006: 96; 3.
  47. Kannampallil T, Schauer G, Cohen T, Patel V. Considering complexity in healthcare systems. Center for Cognitive Informatics and Decision Making, School of Biomedical Informatics, University of Texas Health Science Center, Houston, TX, USA. 2011
  48. Hudson C, Vissing Y. Sustainability at the edge of chaos: Its limits and possibilities in public health. *BioMed Research International Volume 2013*
  49. Gatrell A. Complexity theory and geographies of health: a modern and global synthesis? Institute for Health Research. Lancaster University. Lancaster LA1 4YT. 2003
  50. Lash S, *Crítica de la Información*. Amorrortu. 2005.
  51. Wagensberg J, *Ideas sobre la complejidad del mundo*, Barcelona, Tusquets, 1997.
  52. Resnicow K, Vaughan R. A chaotic view of behavior change: a quantum leap for health promotion, *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* 2006, 3:25
  53. Gómez LA. A propósito de las redes de servicios de salud. Disponible en: <http://www.palmiguia.com/tribuna/1433-a-proposito-de-las-redes-de-servicios-de-salud>. octubre de 2016.

