

Una introducción a la Ciencia de los Sistemas Complejos y sus Aplicaciones

Traductor: Concha Fernández Ramírez. Psiquiatra. Madrid (España)

Translator: Concha Fernández Ramírez. Psychiatrist. Madrid (Spain)

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Los supuestos estándar que subyacen a muchos marcos conceptuales y cuantitativos no son válidos para muchos sistemas físicos, biológicos y sociales complejos. La ciencia de sistemas complejos aclara cuándo y por qué fallan tales supuestos y proporciona marcos alternativos para comprender las propiedades de los sistemas complejos. Esta revisión presenta algunos de los principios básicos de la ciencia de sistemas complejos, incluidos los perfiles de complejidad, la compensación entre eficiencia y adaptabilidad, la necesidad de hacer coincidir la complejidad de los sistemas con la de sus entornos, el análisis a múltiples escalas y los procesos evolutivos. Nuestro enfoque está en las propiedades generales de los sistemas en oposición al modelado de dinámicas específicas; más que de proporcionar una revisión exhaustiva, describimos pedagógicamente un enfoque conceptual y analítico para comprender e interactuar con los sistemas complejos de nuestro mundo. Con excepción de algunas notas a pie de página, este artículo asume solo una formación matemática y científica de escuela secundaria, por lo que puede ser accesible a académicos en todos los campos, tomadores de decisiones en la industria, el gobierno y la filantropía, y cualquier persona interesada en los sistemas y sociedad.

I. INTRODUCCIÓN

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) ¿Cómo podemos abordar científicamente el estudio de los sistemas complejos - físicos, biológicos y sociales? Los estudios empíricos, aunque útiles, son en sí mismos insuficientes, ya que todos los experimentos requieren un marco teórico en el que puedan ser interpretados. Aunque existen muchos de estos marcos para comprender componentes o aspectos particulares de los sistemas, las suposiciones estándar que subyacen a la mayoría de los estudios cuantitativos a menudo no son válidas para los sistemas como un todo, lo que resulta en una caracterización errónea de las causas y consecuencias del comportamiento a gran escala.

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Este artículo proporciona una introducción a la ciencia de los sistemas complejos, demostrando algunas de sus aplicaciones y su capacidad para ayudarnos a tomar decisiones más efectivas en el sistema complejo que es nuestro mundo. Se centra en las propiedades generales de los sistemas complejos, más que en el modelado de dinámicas específicas como en los subcampos (quizás más conocidos) de sistemas dinámicos, modelado basado en agentes, ciencia de redes y teoría del caos. La Sección II presenta conceptos clave, que incluyen los perfiles de complejidad, el equilibrio entre eficiencia y adaptabilidad, y la necesidad de hacer coincidir la complejidad de los sistemas con la de sus entornos. La Sección III considera el análisis de los sistemas complejos,

atendiendo a la pregunta a menudo descuidada de cuándo los supuestos estándar se aplican y, lo que es más importante, no se aplican. La Sección IV discute los principios para intervenir efectivamente en sistemas complejos dado que sus descripciones completas a menudo están más allá de los límites de la comprensión humana. La sección V concluye.

II PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA CIENCIA DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS

A. ¿Por qué la ciencia de sistemas complejos?

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) La ciencia de sistemas complejos considera sistemas con muchos componentes. Estos sistemas pueden ser físicos, biológicos o sociales. Dada esta diversidad de sistemas, puede parecer extraño estudiarlos todos bajo un mismo marco. Pero aunque la mayoría de las disciplinas científicas tienden a centrarse en los mismos componentes, la ciencia de sistemas complejos se centra en cómo los componentes dentro de un sistema están relacionados entre sí [2]. Por ejemplo, mientras que la mayoría de las disciplinas académicas agruparían los sistemas en la fig. 1 por columna, la ciencia de sistemas complejos los agrupa por fila. Dado que los principios de la ciencia de sistemas complejos son ampliamente aplicables, no debería sorprendernos que algunos hayan sido descubiertos independientemente en dominios particulares. El propósito de la ciencia de sistemas complejos es proporcionar un marco científico unificador, que permita la generalización (y, por lo tanto, agudizar) de ideas y el descubrimiento de nuevas aplicaciones y conexiones.

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Una descripción completa de todos los detalles, incluso de sistemas relativamente simples, es imposible; por lo tanto, los análisis de sondeo deben buscar las propiedades de los sistemas que no dependen de todos los detalles. El hecho de que tales propiedades existan se debe a la universalidad, un fenómeno que se discutirá en la sección III. Una idea subyacente que permite el descubrimiento de tales propiedades proviene de una lección de física estadística, a saber, que intentar caracterizar el comportamiento de un estado particular de un sistema (por ejemplo, un gas) puede ser completamente intratable, caracterizar el conjunto de todos los posibles estados puede no solo no ser manejable, pero también podemos proporcionar un modelo de la información relevante (por ejemplo, presión, temperatura, densidad, compresibilidad, etc.). En otras palabras, considerar el espacio de posibles comportamientos proporciona una lente analítica poderosa que se puede aplicar no solo a los sistemas físicos sino también a los biológicos y sociales. Y así como la entropía de un sistema, una medida de su número de estados posibles, juega un papel fundamental en la física, la complejidad de un sistema, una generalización de la entropía, juega un papel fundamental en la ciencia de sistemas complejos.

Examples of Behaviors

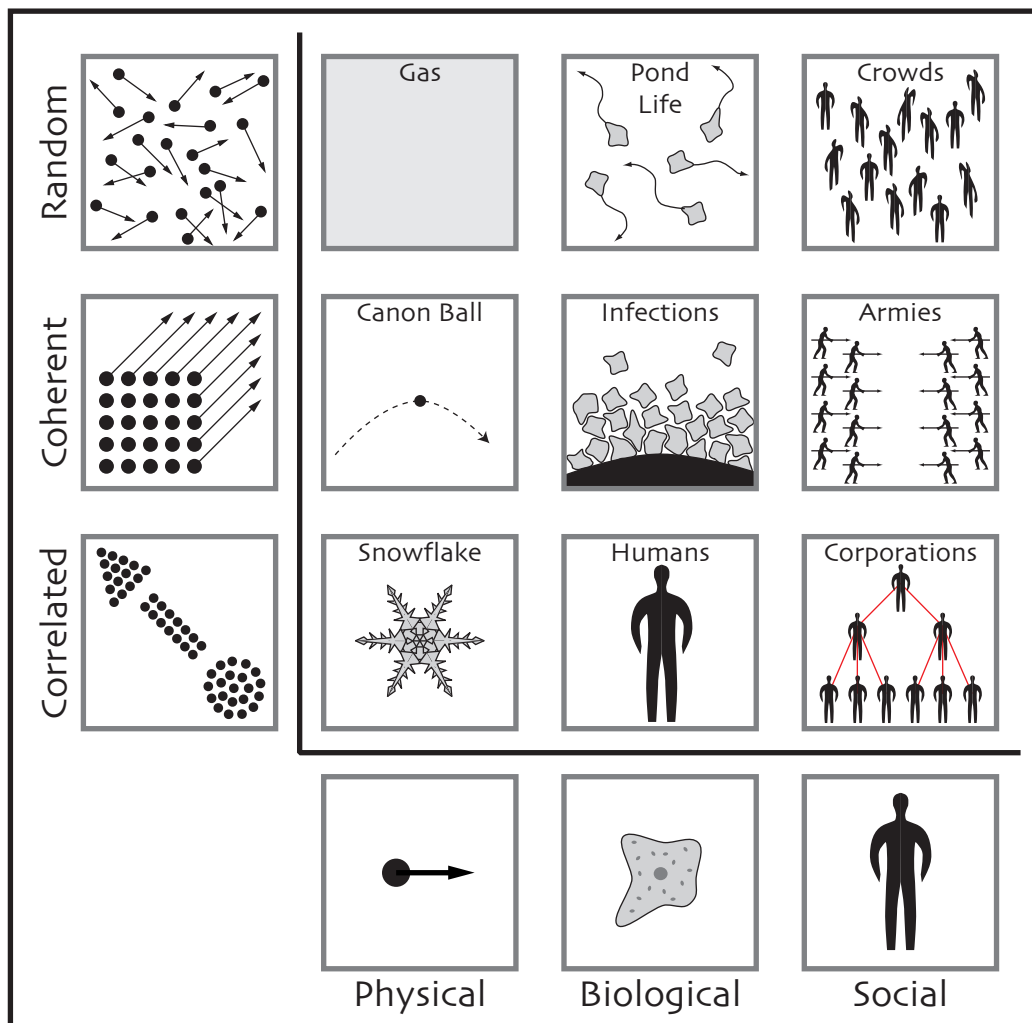


FIG. 1. A partir de [1]. Cada columna contiene tres ejemplos de sistemas que constan de los mismos componentes (de izquierda a derecha: moléculas, células, personas) pero con diferentes relaciones entre ellos. Cada fila contiene sistemas en los que la relación entre los componentes es la misma. Para sistemas aleatorios, el comportamiento de cada componente es independiente del comportamiento de todos los demás componentes. Para sistemas coherentes, todos los componentes exhiben el mismo comportamiento; por ejemplo, el comportamiento (ubicación, orientación y velocidad) de una parte de la bala de cañón determina completamente el comportamiento de las otras partes. Los sistemas correlacionados se encuentran entre estos dos extremos, de modo que los comportamientos de los componentes del sistema dependen unos de otros, pero no tan fuertemente como para que cada componente actúe de la misma manera; por ejemplo, la forma de una parte de un copo de nieve está correlacionada pero no determina completamente la forma de las otras partes. (Implícito en estas descripciones está la necesidad de especificar el conjunto de comportamientos bajo consideración, como se discutió en la sección II B)(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019).

B. ¿Qué es la complejidad?

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) En pocas palabras, la complejidad de un comportamiento es igual a la longitud de su descripción. La longitud de una descripción del comportamiento particular de un sistema depende del número de posibles comportamientos que el sistema podría exhibir. Por ejemplo, una bombilla que tiene dos estados posibles - encendido o apagado - se puede describir con un solo bit: 0 o 1. Dos bits pueden describir cuatro comportamientos diferentes (00, 01, 10 o 11), tres bits pueden describir ocho comportamientos, etc. Matemáticamente, podemos escribir $C = \log_2 N$, donde C es complejidad y N es el número de comportamientos posibles, 1 pero para nuestros propósitos aquí, es suficiente afirmar que cuanto mayor sea el número de comportamientos posibles, mayor será la complejidad.

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Es importante tener en cuenta que uno debe definir cuidadosamente el espacio de comportamientos posibles. Por ejemplo, si estamos interesados en una bombilla que ya está en un enchufe, la bombilla tiene dos posibles comportamientos, como se indicó anteriormente, pero sí en cambio estamos interesados en la complejidad de construir una bombilla, el espacio de posibles comportamientos podría incluir todos de las formas en que se pueden organizar sus partes. Como otro ejemplo, considere programar una computadora para responder correctamente una pregunta de opción múltiple con cuatro opciones. A primera vista, esta tarea es muy simple: dado que hay cuatro comportamientos posibles, solo se requieren dos bits. No obstante, tenemos la sensación de que programar una computadora para que califique perfectamente en un test de opción múltiple sería bastante difícil. Sin embargo, esta aparente paradoja se resuelve cuando reconocemos que tal tarea es difícil solo porque no sabemos a priori qué preguntas se incluirán en el test y, por lo tanto, la verdadera tarea es poder responder correctamente cualquier pregunta de opción múltiple. Esta tarea es bastante compleja, dada el gran número de formas posibles en que el programa podría responder a una serie de preguntas de elección múltiple arbitrarias.

1 Técnicamente, $\log_2 N$ es en realidad un límite superior para la complejidad, ya que si algunos comportamientos son más propensos que otros, la longitud promedio de la descripción puede reducirse utilizando descripciones más cortas para los comportamientos más comunes y descripciones más largas para los menos comunes (Los algoritmos de compresión sin pérdida se basan en esta lógica.)

C. ¿Qué es un sistema complejo?

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Considere un ser humano, y luego considere un gas que contiene las mismas moléculas que están en el ser humano, pero sin ningún arreglo en particular. ¿Qué sistema es más complejo? El gas posee un mayor número de posibles disposiciones de las moléculas (es decir, tiene más entropía, o trastorno/desorden), por lo que tiene una mayor complejidad. Sin embargo, cuando pensamos en un sistema complejo, pensamos en la disposición cuidadosamente ordenada de las moléculas en un ser humano, no en la

disposición máximamente desordenada de un gas. Las plantas crecen usando energía de la luz solar, disminuyendo la entropía de sus moléculas constituyentes (aunque la entropía neta del universo aún aumenta). Una ciudad consiste en una infraestructura física entrelazada con instituciones sociales, políticas y económicas y las personas cuyos comportamientos impulsan esas instituciones. Por lo tanto, puede ser tentador concluir que los sistemas complejos son aquellos con desorden reducido. Pero los sistemas con el menor desorden son aquellos en los que todos los componentes exhiben el mismo comportamiento (sistemas coherentes en la figura 1), y dicho comportamiento no es intuitivamente complejo.

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Para resolver esta paradoja, debemos considerar que la longitud de la descripción de un sistema depende del nivel de detalle utilizado para describirlo. Por lo tanto, la complejidad depende de la escala. En una escala microscópica, el gas es realmente más complejo que el humano: es más difícil describir las posiciones y velocidades de todas las moléculas del gas que hacer lo mismo para todas las moléculas del humano. Pero a la escala de la percepción humana, el rango de comportamientos de un gas puede describirse por su temperatura y presión, mientras que los comportamientos de un humano siguen siendo bastante complejos a esta escala. La entropía corresponde a la cantidad de complejidad en la escala más pequeña, pero caracterizar un sistema requiere comprender su complejidad en múltiples escalas. El perfil de complejidad de un sistema es un gráfico de la complejidad del sistema en función de la escala [2]. En los ejemplos a continuación, se considerará que la escala es una longitud; pero fundamentalmente, la escala de un comportamiento es igual al número de componentes coordinados del sistema involucrados, 2 para los cuales la longitud física es un proxy. Un gas es muy simple a la escala de la percepción humana, porque a esta escala, solo los comportamientos que involucran billones de moléculas son relevantes, y hay relativamente pocos comportamientos distinguibles de un gas que involucra tantas moléculas.

2 Modelando cada componente del sistema como una variable aleatoria X_i y dejando que $X = \{X_1, \dots, X_N\}$ denote el conjunto de componentes en el sistema, la complejidad en la escala s se puede escribir como $C(s) = \sum_{A \subset X \text{ s.t. } |A| \geq s} I(A|X - A)$ donde $I(A|B)$ denota la información mutua multivariada entre todas las variables aleatorias en el conjunto A condicionando las variables aleatorias en el conjunto B [3].

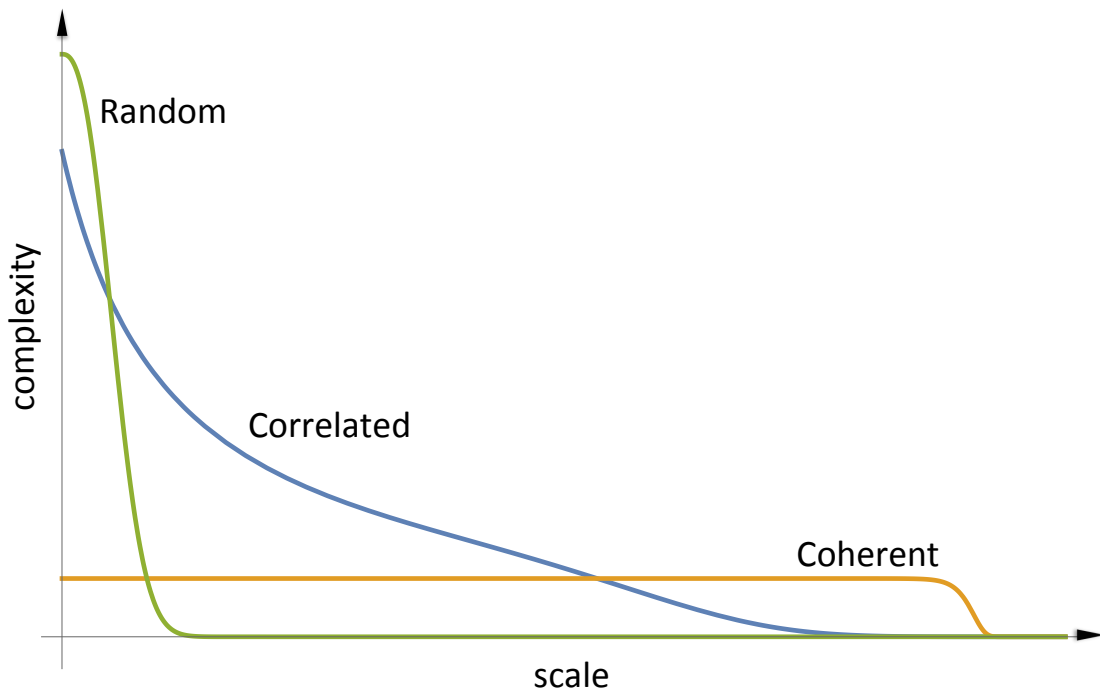


FIG. 2. Perfiles de complejidad representativos de sistemas aleatorios, correlacionados y coherentes (Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019).

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Como se muestra en la fig. 2, los sistemas aleatorios, coherentes y correlacionados (ver figura 1) tienen perfiles de complejidad cualitativamente diferentes. Los sistemas aleatorios tienen la mayor complejidad en la escala más pequeña (granularidad más fina/mayor detalle), pero la cantidad de complejidad disminuye rápidamente a medida que aumenta la escala y se promedian los comportamientos aleatorios de los componentes individuales. Un sistema coherente tiene la misma cantidad de complejidad en escalas pequeñas que en escalas más grandes porque al describir el comportamiento general del sistema (por ejemplo, la posición y la velocidad de una bola de cañón) también se describe el comportamiento de todos los componentes (por ejemplo, las posiciones y velocidades de todos los átomos). Tenga en cuenta que la complejidad tiende a aumentar (o permanecer igual) a medida que disminuye la escala, ya que mirar un sistema con más detalle (aunque aún incluye todo el sistema en la descripción) tiende a producir más información.³ Para un sistema correlacionado, varios comportamientos ocurren en varias escalas, por lo que la complejidad aumenta gradualmente a medida que uno examina el sistema con mayor y mayor detalle. Por ejemplo, desde muy lejos, un ser humano, apenas visible, tiene muy poca complejidad. Según el nivel de detalle se incrementa gradualmente, la descripción primero incluirá la posición y la velocidad general del ser humano, y luego las posiciones y velocidades de cada miembro, seguido por el movimiento de manos, dedos, expresiones faciales, así como palabras que el humano puede estar diciendo. Continuando a mayores niveles de detalle, los

órganos y luego los tejidos y patrones dentro del cerebro humano se vuelven relevantes, y eventualmente también lo hacen las células individuales. A escalas más pequeñas que la de una célula, la complejidad aumenta aún más a medida que uno ve los organelos (subestructuras celulares), seguido por grandes moléculas como las proteínas y el ADN, y finalmente moléculas más pequeñas y átomos individuales. En cada nivel, la longitud de la descripción crece más. Esta increíble estructura múlti-escala con una complejidad gradualmente creciente es la característica definitoria de los sistemas complejos.

3 Como aspecto técnico aparte, las restricciones entre tres o más componentes de un sistema (como una restricción de paridad) pueden dar como resultado una complejidad negativa a ciertas escalas [3], pero tal comportamiento está más allá del alcance de esta introducción.

D. Compromisos entre complejidad y escala

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) La intuición de que la complejidad requiere orden no es infundada: no es casualidad que la formación de sistemas complejos implique una disminución de la entropía, es decir, una disminución de la complejidad en la escala más pequeña. Para que haya complejidad a escalas más grandes, debe haber comportamientos que impliquen la coordinación de muchos componentes de escala más pequeña. Pero esta coordinación suprime la complejidad a escalas más pequeñas porque los comportamientos de los componentes a menor escala ahora están limitados por las interdependencias entre ellos. Esta tensión puede ser precisa: dado un conjunto fijo de componentes con un conjunto fijo de comportamientos individuales potenciales, el área bajo la curva de complejidad será constante, independientemente de las interdependencias (o falta de ellas) entre los componentes [3].⁴ Por lo tanto, para cualquier sistema, existe una compensación fundamental entre el número de comportamientos que puede tener un sistema y la escala de esos comportamientos.

4 Si los perfiles de complejidad se definen formalmente como se ha hecho en las notas al pie previas, entonces la regla de la suma se puede expresar como $C(s) = \sum_i H(X_i)$ donde $H(X_i)$ es la entropía incondicional de X_i , lo que hace que no dependa de ninguna de las correlaciones entre las variables aleatorias.

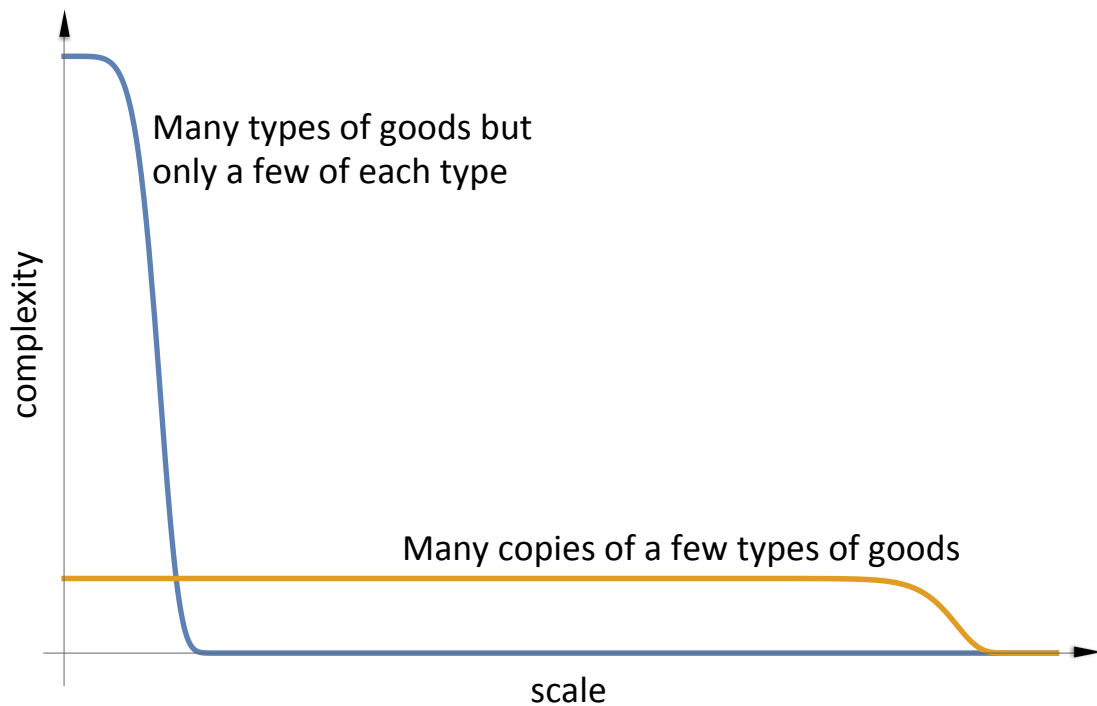


FIG. 3. El perfil de complejidad de una fábrica que puede producir una gran cantidad de copias de algunos tipos de bienes, y el perfil de complejidad de una fábrica que puede producir muchos tipos de bienes pero no en grandes cantidades (Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019).

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Por ejemplo, considere una fábrica compuesta por muchos trabajadores [1]. El número de diferentes tipos de bienes que la fábrica puede producir a una escala dada es un indicador (proxy) de la complejidad de la fábrica a esa escala, con el número de copias del mismo tipo de bien que la fábrica puede producir en un período de tiempo determinado siendo un proxy para la escala. La compensación fundamental es evidente en el hecho de que si la fábrica quiere poder producir muchas copias de un solo producto en un corto período de tiempo, tendrá que coordinar a todos sus trabajadores (tal vez hacer que trabajen en una línea de ensamblaje), reduciendo así su libertad individual para fabricar muchos tipos diferentes de bienes. La producción de la fábrica tendría entonces una baja complejidad pero a gran escala (por ejemplo, produciendo muchos modelos idénticos de Ford T: "Cualquier cliente puede tener un automóvil pintado del color que quiera siempre y cuando sea negro"). Por otro lado, si los empleados de la fábrica trabajan de manera independiente, podrán crear muchos tipos diferentes de productos, pero ninguno a escala (fig. 3). Por supuesto, una fábrica puede cambiar su configuración de trabajadores con el tiempo; el análisis anterior se aplica solo a configuraciones fijas. Además, una fábrica puede aumentar tanto la complejidad como la escala de su producción agregando maquinaria nueva o más trabajadores; la compensación entre complejidad y escala se aplica solo

cuando se consideran los diversos comportamientos colectivos de un conjunto fijo de componentes con un conjunto fijo de comportamientos individuales.⁵

5 Un punto sutil a destacar aquí es que la introducción de interacciones entre dos partes de un sistema puede, en algunos casos, aumentar el conjunto de comportamientos individuales de cada parte, aumentando así el área total bajo el perfil de complejidad. Por ejemplo, si dos personas entran en comunicación entre sí, la comunicación en sí misma (por ejemplo, el habla) puede ser un comportamiento relevante de cada persona que no estaba allí antes.

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Un corolario de la compensación entre complejidad y escala es la compensación entre adaptabilidad y eficiencia. La adaptabilidad surge cuando hay muchas acciones posibles que suceden en paralelo y que en su mayoría son independientes entre sí, es decir, cuando el sistema tiene una alta complejidad. La eficiencia, por otro lado, surge cuando muchas partes de un sistema están trabajando en conjunto, de modo que el sistema puede realizar la tarea para la que fue diseñado a la mayor escala posible. Por lo tanto, debido a su baja complejidad, un sistema muy eficiente no será necesariamente adaptable a variaciones imprevistas dentro de sí mismo o su entorno. Un sistema muy adaptable, diseñado para manejar todo tipo de shocks, necesariamente tendrá que sacrificar algunos comportamientos a gran escala. Los Soviets pensaron que también podrían tener su pastel y comérselo: originalmente creían que su economía superaría a los capitalistas porque las economías capitalistas tienen mucho desperdicio relacionado con múltiples negocios que compiten por hacer lo mismo [4, Capítulo 16]. Sería mucho más eficiente tener a todos coordinados. Pero al crear tales estructuras económicas a gran escala, se sacrificó la complejidad a menor escala, lo que resultó en un sistema no adaptativo. Por supuesto, los sistemas capitalistas mal regulados también pueden volverse maladaptativos debido, por ejemplo, a una concentración excesiva de poder del mercado, circuitos de retroalimentación dañinos o comportamientos similares a rebaños [5].

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Debido a la compensación entre complejidad y escala, cualquier mecanismo que cree complejidad a mayor escala - ya sea de mercado o de gobierno o de otro tipo - necesariamente reducirá la complejidad individual. Esto no quiere decir que la complejidad a gran escala sea siempre perjudicial; a menudo vale la pena intercambiar algunas libertades a nivel individual por una cooperación a mayor escala. ¿Cuándo entonces, la complejidad a una escala particular es deseable?

E. ¿Por qué ser complejo?

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) La Ley de Variedad Requerida proporciona una determinación de cuándo la complejidad es deseable: para ser efectivo, un sistema debe ser al menos tan complejo como los comportamientos ambientales a los que debe reaccionar de manera diferencial. Si un sistema debe ser capaz de proporcionar una respuesta diferente a cada una de las 100 posibilidades ambientales y el sistema tiene solo 10 acciones posibles, el sistema no será

efectivo. Como mínimo, el sistema necesitaría 100 acciones posibles, una para cada escenario que pudiera encontrar. (La condición anterior es necesaria pero, por supuesto, no es suficiente; un sistema con suficientes acciones aún puede no tomar las acciones correctas en las circunstancias correctas).

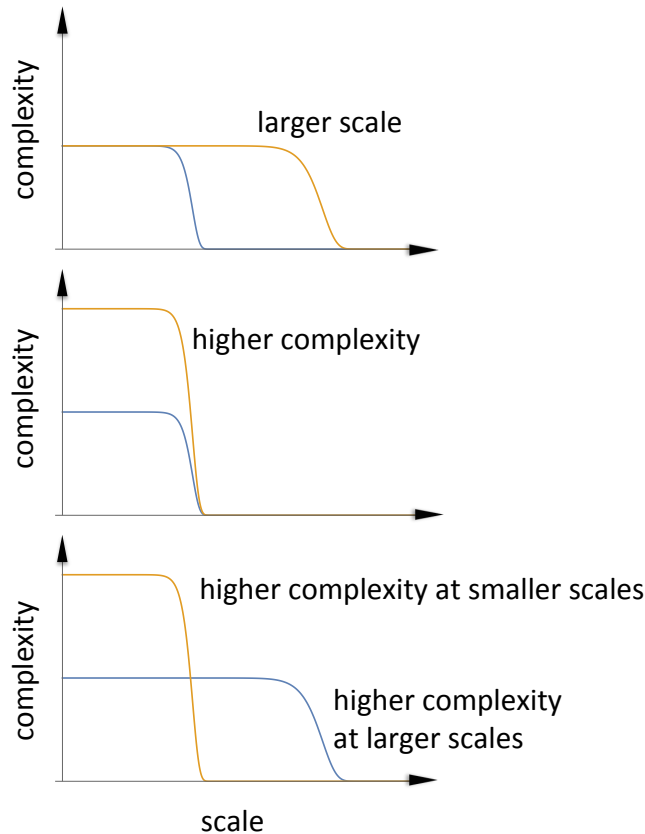


FIG. 4. Perfiles de complejidad esquemática de militares en conflicto. Arriba: si dos ejércitos están operando con el mismo número de comportamientos posibles pero a diferentes escalas, se favorece el de mayor escala. Medio: si dos ejércitos están operando a la misma escala pero con diferente número de posibles comportamientos, se favorece el de mayor complejidad. Abajo: si dos ejércitos están operando a diferentes escalas y con diferente número de posibles comportamientos, cuál es favorecido depende del terreno (ver texto). Tenga en cuenta que estos perfiles se han simplificado para resaltar los conceptos clave; los ejércitos reales operan a múltiples escalas. En términos más generales, los gráficos superiores y medios representan conflictos en los que un ejército tiene al menos tanta complejidad como el otro en todas las escalas (Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019)

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Dado que la complejidad se define solo con respecto a una escala particular, podemos refinar la Ley de Variedad Requerida: para ser efectivo, un sistema debe coincidir con la complejidad de los comportamientos ambientales a los que intenta reaccionar de manera diferencial en todas las escalas en las cuales ocurren estos comportamientos [3] Para ilustrar esta versión multiescala de la Ley de Variedad Requerida, consideramos el conflicto militar [6] (ver figura 4). Aquí, un ejército puede considerarse como el sistema, mientras que el otro es parte del entorno con el que el sistema debe interactuar.

Para dos ejércitos de igual complejidad, es decir, con el mismo número de comportamientos, pero con un ejército operando a mayor escala (por ejemplo, dos ejércitos muy controlados, pero con un ejército más grande que el otro), el ejército de mayor escala probablemente ganará. Para dos ejércitos de igual escala pero de complejidad desigual (p. ej., dos flotas de igual tamaño e igual potencia, pero una de ellas es más maniobrable que la otra), el ejército de mayor complejidad probablemente gane, ya que el ejército de alta complejidad tiene una acción para cada acción del ejército de menor complejidad pero no al revés. Cuando un ejército con alta complejidad a menor escala (por ejemplo, una fuerza guerrillera) entra en conflicto con un ejército con un comportamiento a gran escala pero de menor complejidad (por ejemplo, el ejército estadounidense en Vietnam o el ejército soviético en Afganistán), el terreno, que limita la escala del conflicto, juega un papel importante. En un campo abierto, o en aguas abiertas, se favorece al ejército que tienen más complejidad a escalas más grandes, mientras que en la selva o en las montañas, se favorece una mayor complejidad a escalas más pequeñas.

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Como otro ejemplo, la asistencia sanitaria implica tanto tareas a pequeña escala con una alta complejidad general, como en el case management, así como tareas a gran escala y menor complejidad, como la fabricación y administración de vacunas [7]. (La administración de vacunas es de menor complejidad pero de mayor escala porque se realizarán las mismas acciones para casi todos). Las organizaciones e iniciativas a gran escala de arriba hacia abajo son adecuadas para tareas a gran escala y de menor complejidad, pero tareas como el case management requieren sistemas de salud con un alto grado de complejidad a pequeña escala (es decir, local).

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) La Eurozona ofrece una ilustración potencial de un desajuste de complejidad a múltiples escalas. La política fiscal se realiza predominantemente a escala de países individuales y, por lo tanto, tiene una mayor complejidad a escala de país pero relativamente poca complejidad a escala de toda la zona euro, mientras que la política monetaria se realiza a escala de toda la zona euro y, por lo tanto, tiene cierta complejidad a escala de la Eurozona, pero carece de la capacidad de variar (es decir, carece de complejidad) a escala de países individuales. Muchos han argumentado que surgieron dificultades económicas dentro de la zona euro porque este desajuste ha impedido interacciones efectivas entre la política fiscal y monetaria [8-12].

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) En ninguno de los ejemplos anteriores se han calculado con precisión los perfiles de complejidad, ni se ha definido con precisión la escala. En cambio, se usan proxies para la escala y se hacen comparaciones estimadas de complejidad. Tal enfoque no puede producir resultados precisos (de hecho, ningún enfoque puede, dada la complejidad que requeriría una descripción completa de tales sistemas), pero no se necesita precisión adicional cuando incluso el análisis aproximado revela grandes desajustes en la complejidad.⁶ (Para remediar los desajustes diagnósticos se pueden requerir análisis más detallados).

⁶ Así como este análisis del espacio de posibles comportamientos puede usarse incluso ante la incertidumbre con respecto a los mecanismos y resultados precisos de un sistema, los físicos pueden usar la propiedad de la entropía (a veces considerando cómo las cantidades

relacionadas con la entropía cambian a través de la escala) para clasificar las transiciones de fase incluso cuando no pueden, a partir de los primeros principios, determinar cantidades precisas, como la cantidad de calor generado por una transición de fase o la temperatura a la que ocurre (tales cantidades deben determinarse empíricamente).

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) La complejidad (a cualquier escala) no es intrínsecamente buena ni mala. En cambio, surgen problemas a partir de desajustes entre la complejidad de una tarea a realizar y el sistema que realiza esa tarea. (Es importante tener en cuenta que el sistema en un escenario puede ser la tarea/el entorno en otro; por ejemplo, la misma complejidad que ayuda a un sistema a interactuar con su entorno puede evitar su gestión efectiva mediante otros sistemas). Por cierto, aparecen las emociones humanas para reflejar este principio: estamos aburridos cuando nuestro entorno es demasiado simple y abrumados cuando es demasiado complejo [13].

F. Sistemas subdivididos

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Incluso si la complejidad del sistema coincide con la de su entorno en las escalas apropiadas, todavía existe la posibilidad de un desajuste de complejidad. Considere dos pares de amigos - cuatro personas en total - cada uno de los cuales puede gastar 100 libras - y considere dos sofás de 200 libras que necesitan ser movidos. Además, suponga que cada persona puede coordinarse con su amiga pero no con ninguna de las otras dos personas. En general, el sistema de personas tiene suficiente complejidad en las escalas apropiadas para mover ambos sofás, ya que cada par de amigos puede levantar uno de los sofás de 200 libras. Sin embargo, si una persona de cada par de amigos fuera asignada a cada sofá, no podrían levantar los sofás porque las dos personas que levantarían cada sofá no pertenecerían al mismo par de amigos y, por lo tanto, no podrían coordinar sus acciones. El problema aquí es que, aunque las parejas de amigos poseen suficiente complejidad general en las escalas correctas para levantar los sofás, la subdivisión dentro del sistema de amigos no coincide con la subdivisión natural dentro del sistema de sofás. El desajuste en la complejidad se puede ver si enfocamos nuestra atención sobre un solo sofá: mientras que el sofá requiere una acción coordinada en la escala de 200 libras, las dos personas que lo levantan son capaces solo de dos acciones independientes, cada una en la escala de 100 libras.

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) La forma en que se organizan los departamentos académicos proporciona un ejemplo más realista del potencial del desajuste de subdivisión. La academia tiene múltiples niveles de subdivisión (departamentos, subcampos, etc.) para organizar el conocimiento y coordinar personas, lo que resulta en un alto grado general de complejidad en múltiples escalas, donde la escala podría referirse al número de personas coordinadas o la cantidad de conocimiento coordinado, dependiendo de qué aspecto del sistema académico esté bajo consideración. Del mismo modo, existen múltiples niveles de subdivisión natural en el conjunto de problemas que la academia puede abordar potencialmente, y cada subdivisión de problemas requiere tipos particulares de

conocimiento y esfuerzo coordinados para poder resolverse. La complejidad de la academia a través de múltiples escalas le permite trabajar efectivamente en muchos de estos problemas. Sin embargo, pueden existir problemas que la academia, a pesar de tener suficiente complejidad general multi-escala, no puede resolver porque las subdivisiones dentro del problema no coinciden con las subdivisiones dentro de la academia. El aumento de centros e iniciativas interdisciplinarios en las últimas décadas sugiere la percepción de tal desajuste; sin embargo, la estructura del sistema académico como un todo (incluida la forma en que se capacita a los estudiantes, el proceso de publicación, etc.) aún puede obstaculizar el progreso en problemas que no caen perfectamente dentro de una disciplina o subdisciplina [14-19].

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Los ejemplos anteriores proporcionan una ilustración del principio de que para que un sistema reaccione de manera diferencial a un determinado conjunto de comportamientos de su entorno, no solo el sistema en su conjunto debe tener al menos tanta complejidad en todas las escalas como este conjunto de comportamientos del entorno (como se describe en la sección II E), sino también cada subconjunto del sistema debe tener al menos tanta complejidad en todas las escalas como los comportamientos ambientales correspondientes a ese subconjunto. Una buena regla general para aplicar este principio es que las decisiones relativas a partes o aspectos independientes de un sistema deberían poder hacerse de manera independiente, mientras que las decisiones relativas a partes dependientes del sistema deberían ser hechas de manera dependiente. De ello se deduce que las organizaciones que toman tales decisiones deberían subdividirse en consecuencia, de modo que sus subdivisiones coincidan con las divisiones naturales en los sistemas con los que interactúan.⁷

⁷ Las subdivisiones presentes en el cerebro humano y el análisis de subdivisiones en las redes neurales en general [2, Capítulos 2.4-2.5] demuestran cómo los sistemas que se subdividen para que coincidan con las subdivisiones naturales en sus entornos superan a aquellos con más conectividad interna.

G. Jerarquías

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Una forma común de organizar los sistemas es a través de jerarquías de control. En una jerarquía idealizada, no hay conexiones laterales: cualquier decisión que involucre múltiples componentes de la jerarquía debe pasar a través de un nodo común bajo cuya jurisdicción se encuentran todos estos componentes (directa o indirectamente). El perfil de complejidad de dicha jerarquía depende de la rigidez de la estructura de control (fig. 5). En un extremo, cada decisión, sin importar cuán grande o pequeña sea, se toma en la parte superior de la jerarquía. Esta jerarquía tiene la misma cantidad de complejidad a través de todas sus escalas: es decir, la complejidad de cualquier decisión se toma en la parte superior. En el otro extremo, no hay comunicación dentro de la jerarquía, y cada individuo actúa de manera independiente. Esta jerarquía tiene muy poca complejidad más allá del nivel individual. Entre estos dos extremos está la jerarquía típica, en la que se toman diferentes decisiones a diferentes niveles.

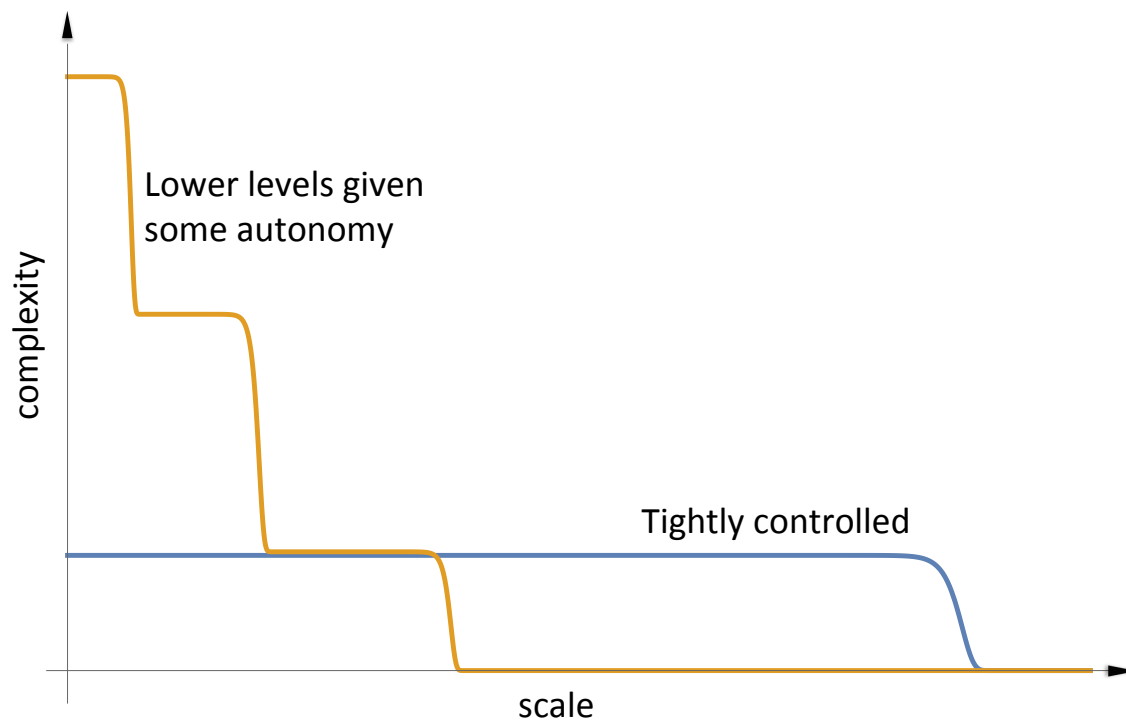


FIG. 5. Perfiles de complejidad de dos jerarquías, cada una con el mismo número de personas. Aquí, la escala es el número de horas hombre coordinadas. En una jerarquía, todas las decisiones, independientemente de la escala, son tomadas por una sola persona, mientras que en la otra, decisiones diferentes se toman en varios niveles de la jerarquía (Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019)

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Ningún tipo de jerarquía es inherentemente mejor que cualquier otro. Para un entorno particular, la mejor jerarquía es aquella cuyo perfil de complejidad coincide con las tareas que está intentando realizar. Una jerarquía estrechamente controlada o muy desequilibrada hacia arriba no es adecuada para entornos en los que hay mucha variación en los sistemas con los que los niveles inferiores de la jerarquía deben interactuar; tampoco es una jerarquía muy poco controlada muy adecuada para entornos que requieren una acción coordinada a gran escala. Por ejemplo, centralizar demasiado poder dentro del sistema de gobierno de los EE. UU. a nivel federal (como opuesto del local o estatal) no permitiría una complejidad a menor escala suficiente para emparejar la variación entre localidades; un sistema demasiado descentralizado no permitiría una complejidad a mayor escala suficiente para abordar problemas que requieren respuestas coordinadas a nivel nacional.⁸ La asignación de decisiones a niveles más altos en las jerarquías permite una mayor eficiencia y escala, pero tales decisiones resultan en una menor adaptabilidad porque cuando son incorrectas, afectan más al sistema y - dado que los cambios a mayor escala tienden a requerir escalas de tiempo más largas para su promulgación - son más difíciles de revertir.

8 También podemos considerar no solo el perfil de complejidad general de la gobernanza, sino qué tan bien las subdivisiones en el gobierno coinciden con las de su entorno (sección II F). Las áreas metropolitanas son, de alguna manera, más similares entre sí de lo que lo son las áreas rurales de sus respectivos estados. Entonces, aunque dividir a los Estados Unidos en 50 estados proporciona una complejidad gubernamental sustancial de menor escala, esta complejidad no necesariamente coincide con las divisiones naturales urbano-rurales. En la medida en que existe tal desajuste, puede haber problemas actualmente manejados a nivel estatal que se manejarían mejor a nivel local, permitiendo así diferentes políticas en áreas urbanas y rurales (y del mismo modo, tal vez algunos de los poderes que algunos argumentar deberían ser transferidos del nivel federal al estatal, de hecho deberían ser transferidos al nivel local).

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Es importante distinguir entre la complejidad de una jerarquía y la complejidad de las decisiones que las personas dentro de la jerarquía son capaces de tomar. Por ejemplo, uno podría diseñar una jerarquía estrictamente controlada que podría tomar una gran cantidad de acciones a gran escala (es decir, alta complejidad en su escala más alta), pero, dado que las habilidades de toma de decisiones de incluso los humanos más capaces son de complejidad finita, los individuos en la parte superior pueden carecer de la complejidad para elegir correctamente entre estas acciones. Esto nos lleva a una limitación importante de las jerarquías: la complejidad de las decisiones relativas a los comportamientos a mayor escala de una jerarquía - los comportamientos que involucran a toda la organización - está limitada por la complejidad del grupo de personas en la parte superior [1]. Por lo tanto, una jerarquía necesariamente fallará cuando la complejidad de hacer coincidir sus comportamientos a mayor escala con los del sistema que está tratando de regular⁹ es mayor que la complejidad de la toma de decisiones que puede lograr cualquier individuo o comité. El fracaso de las economías dirigidas proporciona un claro ejemplo: la asignación de recursos y mano de obra es un problema demasiado complejo para que cualquier persona o grupo de personas lo entienda. Los mercados asignan recursos a través de un sistema más conectado en red: las decisiones sobre cómo asignar recursos se toman sin que ningún individuo las tome, al igual que las decisiones se toman en el cerebro humano sin que ninguna neurona las tome. (Si estas asignaciones de mercado son deseables o no, depende en parte de la forma en que el mercado esté estructurado y regulado).

9 Tenga en cuenta que la complejidad de la tarea de decidir qué comportamientos de un sistema deberían corresponder a qué comportamientos de su entorno es generalmente mucho mayor que la complejidad del sistema o del entorno solo: por ejemplo, si tanto el sistema como el entorno tienen 10 posibles comportamientos, el sistema tiene suficiente complejidad para emparejarse al entorno, pero decidir adecuadamente qué comportamientos del sistema deberían corresponder a qué condiciones ambientales requiere elegir correctamente una opción de un espacio de 3.628.800 (10 factoriales) posibilidades. El espacio de posibles comportamientos del sistema y su entorno puede ser mucho menor que el espacio de posibles decisiones sobre el manejo de las acciones del sistema en su entorno.

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) comienzan considerando las jerarquías idealizadas con solo conexiones verticales, pero las conexiones laterales proporcionan otro mecanismo para permitir comportamientos a mayor escala. Por ejemplo, las ciudades pueden interactuar entre sí (más que interactuar solo con sus gobiernos estatales y nacionales) para copiar buenas políticas y aprender de los errores de los demás. A través de este tipo de procesos evolutivos (descritos más adelante en la sección IV), se pueden tomar decisiones a gran escala (a gran escala porque las políticas pueden ser copiadas por varias ciudades) que son más complejas que las cualquier componente individual puede hacer. Tales conexiones laterales pueden existir dentro de un marco jerárquico en el que la parte superior de la jerarquía (en este ejemplo, el gobierno nacional) mantiene un control significativo, o pueden existir fuera de una estructura jerárquica, como en el cerebro humano. Además, estas conexiones laterales pueden variar en fuerza; las conexiones demasiado fuertes conducen a un comportamiento de rebaño con una variación insuficiente a menor escala, como el pensamiento grupal [20–22] (ningún sistema está exento de la compensación descrita en la sección II D), mientras que las conexiones demasiado débiles resultan en un comportamiento mayormente independiente con poca coordinación.

III. ANALIZANDO SISTEMAS COMPLEJOS

En la sección anterior (Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) han examinado algunas de las propiedades generales de los sistemas con muchos componentes. Pero, ¿cómo estudiamos sistemas particulares? ¿Cómo analizamos los datos procedentes de sistemas complejos y cómo elegimos qué datos analizar?

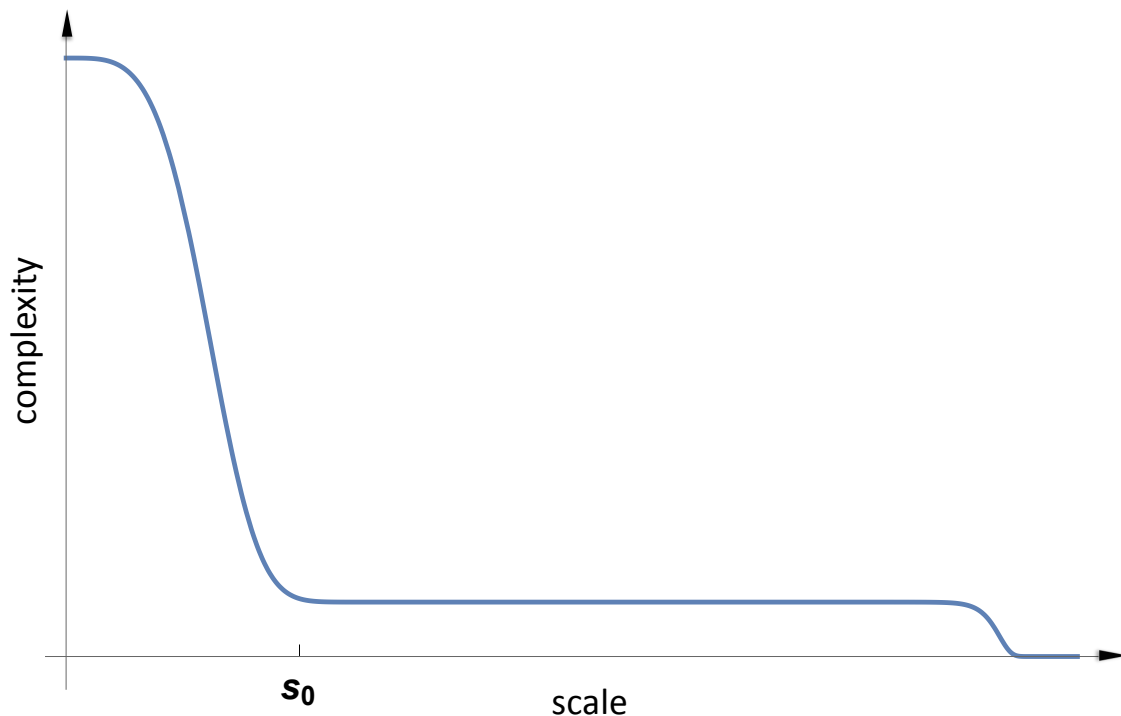


FIG. 6. Un perfil de complejidad de un sistema con una separación de escalas. Una separación de escalas implica que los comportamientos que ocurren por debajo de cierta escala (s_0 en la figura anterior) son, en escalas más grandes, en su mayoría independientes entre sí y que, por lo tanto, en estas escalas más grandes, solo los efectos promedio de estos comportamientos son relevantes (Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019).

A. ¿Cómo entendemos cualquier sistema?

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) En cierto sentido, es sorprendente que podamos entender algo cualquier sistema macroscópico, ya que incluso un sistema mecánico muy simple tiene billones de billones de moléculas. Somos capaces de entender tales sistemas porque poseen una separación de escalas [23], lo que significa que el comportamiento macroscópico en el que estamos interesados ocurre a una escala mucho mayor que el comportamiento de las moléculas individuales, y no ocurre mucho comportamiento entre estos dos escalas (ver fig. 6). Esta separación nos permite tratar el comportamiento macroscópico y microscópico por separado: para los sistemas mecánicos, tratamos el comportamiento macroscópico explícitamente con la mecánica newtoniana, y el comportamiento microscópico se considera en conjunto utilizando la termodinámica.

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) En términos más generales, el enfoque descrito anteriormente es un ejemplo de la teoría de campo medio [24], en la que los comportamientos promedio de los componentes de un sistema se modelan explícitamente y las desviaciones de los componentes individuales de este promedio se tratan como fluctuaciones aleatorias estadísticamente independientes.

Este enfoque funciona muy bien para sistemas como computadoras, automóviles, aviones y edificios, en los que los movimientos de las moléculas individuales son, aparte de algunas fluctuaciones en su mayoría no correlacionadas, bien descritas mediante el movimiento de la pieza de material a la que pertenecen. Tal enfoque también se emplea, a menudo, en análisis de sistemas biológicos, sociales y económicos; estos supuestos funcionan bien en muchos casos, pero como veremos, no siempre son apropiados para sistemas complejos. Es importante, por lo tanto, determinar en qué condiciones se cumple la teoría del campo medio.

B. Cuando la teoría del campo medio se rompe

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Los sistemas con los que se aplica la teoría del campo medio exhiben comportamientos a gran escala que son el promedio de los comportamientos de sus componentes. Deben poseer una separación de escalas, que surge cuando las fluctuaciones estadísticas de sus componentes son suficientemente independientes entre sí por encima de cierta escala. La teoría del campo medio puede mantenerse incluso en presencia de interacciones fuertes, siempre que el efecto de esas interacciones fuertes pueda ser capturado mediante el comportamiento promedio del sistema, es decir, siempre que cada componente del sistema pueda modelarse como si estuviera interactuando con el promedio del sistema (es decir, con el campo medio). Por ejemplo, el movimiento a gran escala de los sólidos está bien descrito mediante la teoría del campo medio, a pesar de que las moléculas en un sólido interactúan entre sí con bastante fuerza, porque el efecto principal de estas interacciones es mantener cada molécula a una cierta distancia y orientación desde la ubicación promedio (centro de masa) del sólido. Del mismo modo, bajo algunas (pero ciertamente no todas) condiciones, los mercados económicos pueden describirse efectivamente modelando a cada actor del mercado como interactuando con las fuerzas agregadas de la oferta y la demanda en lugar de con otros actores individuales del mercado.

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Sin embargo, cuando hay correlaciones suficientemente fuertes entre los componentes del sistema, es decir, cuando las interacciones entre un componente del sistema y un conjunto específico de otros componentes (en oposición a su interacción general con el resto del sistema) no se puede descuidar, la teoría del campo medio se romperá.¹⁰ Estos sistemas, en cambio, exhibirán comportamientos a gran escala que surgen no solo a partir de las propiedades de los componentes individuales sino también de las relaciones entre los componentes. Por ejemplo, si bien el comportamiento de un músculo puede entenderse aproximadamente a partir del comportamiento de una célula muscular individual, el comportamiento del cerebro humano es fundamentalmente diferente del de las neuronas individuales, porque los comportamientos cognitivos están determinados en gran medida por las variaciones en las sinapsis entre las neuronas. Del mismo modo, los comportamientos ecológicos complejos de un bosque no pueden determinarse mediante los comportamientos de sus organismos constituyentes de forma aislada.

10 Incidentalmente, el fracaso de la teoría del campo medio para describir ciertas transiciones de fase físicas llevó a los físicos a desarrollar un nuevo enfoque multiescala (el grupo de renormalización), una base de gran parte de la ciencia de sistemas complejos.

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Debido a que sus ocurrencias aleatorias a pequeña escala no son estadísticamente independientes, los sistemas complejos a menudo exhiben fluctuaciones a gran escala no previstas por la teoría del campo medio, como incendios forestales, contenido viral en medios de comunicación y crashes en los mercados económicos. A veces, estas fluctuaciones a gran escala son adaptativas: permiten que un sistema responda colectivamente a inputs pequeños [25]. Por ejemplo, los humanos responden fuertemente a perturbaciones menores en la densidad del aire, como al sonido de sus propios nombres. Sin embargo, estas fluctuaciones a gran escala a veces plantean riesgos sistémicos.

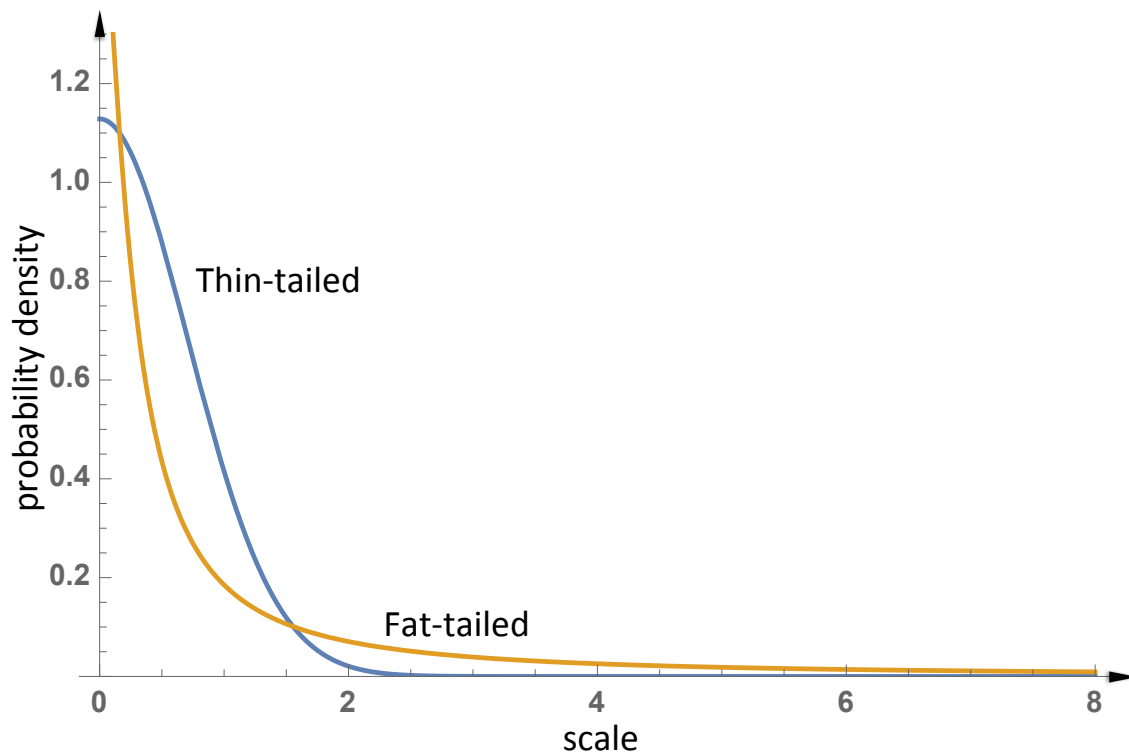


FIG. 7. Una distribución normal (cola delgada - thin-tailed) y una distribución con un desmoronamiento de la ley de potencia (cola gruesa - fat-tailed). La distribución de cola gruesa puede parecer más estable, debido a la menor probabilidad de fluctuaciones a pequeña escala y al hecho de que las muestras a partir de la distribución pueden no contener eventos extremos. Sin embargo, tarde o temprano, una distribución de cola gruesa producirá un evento extremo, mientras que uno podría esperar miles de vidas del universo antes de que una distribución normal produzca un evento extremo similar. Tenga en cuenta que los ejes de este gráfico están truncados; la distribución ilustrada de cola gruesa puede, con una probabilidad pequeña pero no despreciable (0.04%), producir eventos con una escala de un millón o más (Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019).

C. Distribuciones de cola gruesa y riesgo sistémico

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Cuando los componentes de un sistema son independientes entre sí por encima de cierta escala, entonces a escalas mucho más grandes, la magnitud de las fluctuaciones del sistema sigue una distribución normal (curva de campana), 11 para la que la media y la desviación estándar están bien definidas y para la que muchas desviaciones estándar por encima de la media son astronómicamente improbables. Sin embargo, las interdependencias pueden conducir a una distribución de fluctuaciones en la que la probabilidad de un evento extremo, aunque todavía es pequeña, no lo es astronómicamente. Dichas distribuciones se caracterizan por ser de cola gruesa (ver fig. 7. Por ejemplo, si bien la altura humana sigue una distribución de cola delgada, sin registro de nadie más del doble de alto que el promedio humano, la riqueza humana - debido a las complejas interacciones económicas entre los individuos - sigue una distribución de cola gruesa, con múltiples individuos que se desvían del promedio por factores de más de un millón [26].

11 Esto se desprende del teorema del límite central.

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Un peligro de las interdependencias es que a corto plazo, pueden hacer que los sistemas parezcan más estables al reducir el alcance de las fluctuaciones a pequeña escala. Como experimento mental, imagine 100 escaleras, cada una con una probabilidad de caída de 1/10. Si las escaleras son independientes entre sí, la probabilidad de que todas caigan es astronómicamente baja (literalmente: hay una probabilidad aproximadamente 1020 veces mayor de seleccionar aleatoriamente un átomo particular de todos los átomos en el universo conocido). Si vinculamos todas las escaleras juntas, las haremos más seguras, en el sentido de que la probabilidad de que caiga una escalera individual será mucho menor, pero también habremos creado una posibilidad no despreciable de que todas las escaleras puedan caerse juntas. Otros ejemplos incluyen la interconexión de nuestros sistemas financieros que da como resultado la posibilidad de caídas del mercado global y la interconexión de las rutas de viaje que aumentan la probabilidad de pandemias [27] como la gripe española. En términos más generales, cuando las distribuciones de probabilidad subyacentes tienen colas gruesas, los métodos estadísticos estándar a menudo se rompen, lo que conduce a subestimaciones potencialmente graves de las probabilidades de eventos extremos [28].12

12 Por ejemplo, la media y la varianza de una distribución de cola gruesa pueden no existir, e incluso si lo hacen, es posible que no se puedan estimar de manera confiable a partir de una muestra finita debido a la probabilidad de un solo punto de datos o la falta sustancial de los mismos sesgando la estimación.

D. Comprensión de los sistemas complejos

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Debido a que generalmente es más fácil recopilar datos sobre los componentes de un sistema que recopilar datos sobre las interacciones entre los componentes, los estudios empíricos a menudo no logran capturar la información relevante para los sistemas complejos, dado que los comportamientos complejos a gran escala dependen críticamente de tales interacciones. Además, como se discutió en la sección III C, el análisis de datos puede subestimar severamente la probabilidad de eventos extremos (riesgo de cola - tail risk). Finalmente, los análisis empíricos a menudo asumen la linealidad, es decir, suponen que el impacto total de un conjunto de factores es igual a la suma de los impactos de cada factor individual, una suposición que a menudo se rompe con los sistemas complejos.

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) ¿Cómo podemos entender los sistemas para los que no se aplican estos enfoques estándar? Nuestra comprensión de todos los sistemas con muchos componentes depende de la universalidad [29], es decir, la existencia de comportamientos a gran escala que no dependen de los detalles microscópicos. Los enfoques estándar se basan en el supuesto de una independencia suficiente entre los componentes, lo que permite determinar comportamientos a gran escala sin tener en cuenta los detalles del sistema a través de la teoría del campo medio.¹³ Pero la teoría del campo medio es solo un ejemplo de universalidad.

¹³ Formalmente, las fluctuaciones estadísticas de los componentes deben, por encima de cierta escala, ser lo suficientemente independientes como para satisfacer los supuestos del teorema del límite central. El teorema del límite central es la manifestación de la universalidad que explica la ubicuidad de las distribuciones normales.

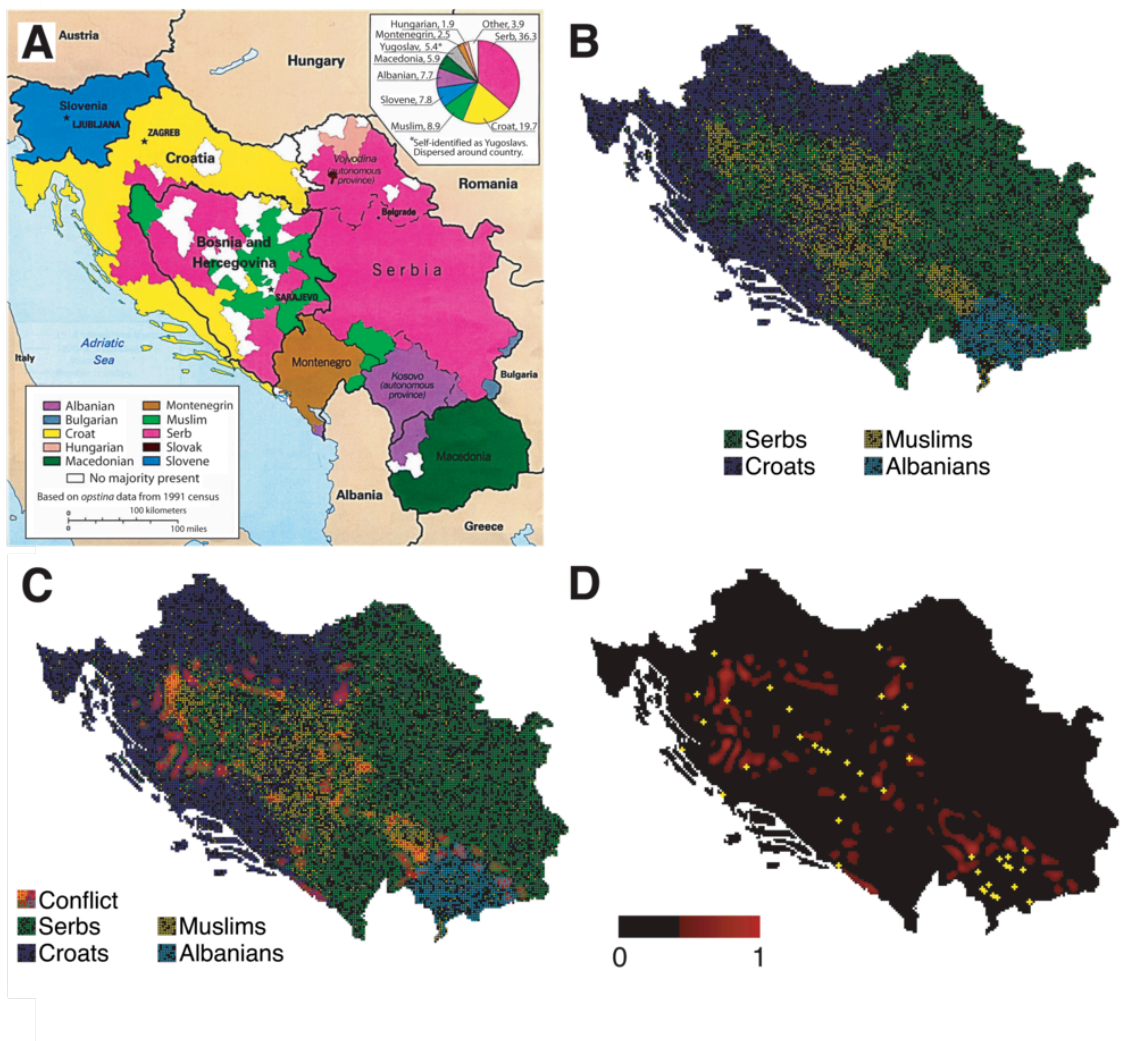


FIG. 8. Una figura del artículo de Lim et al. sobre violencia étnica [30]. Los sitios donde su modelo predice un potencial de violencia étnica se muestran en rojo en los paneles C y D, con informes confirmados de violencia étnica representados por los puntos amarillos en el panel D (Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019)

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) El sonido es otro ejemplo: todos los materiales, independientemente de su composición, permiten la propagación de ondas sonoras. El sonido se comporta de manera similar en todos los materiales porque a las escalas de longitud relevantes para las ondas sonoras, que son mucho más grandes que los tamaños de átomos y moléculas individuales, el efecto de los parámetros microscópicos es simplemente establecer la velocidad del sonido.¹⁴ Las ondas no pueden entenderse como una propiedad del comportamiento promedio —en este caso, la densidad promedio— de un material, ya que son precisamente las correlaciones sistemáticas en las desviaciones de ese promedio las que dan lugar al sonido. Tampoco se entiende mejor el sonido al centrarse en los detalles a pequeña escala del movimiento atómico: los científicos entendieron el sonido incluso antes de saber qué son los átomos. La clave para comprender las ondas sonoras es reconocer que tienen una estructura multiescala - con

fluctuaciones de mayor escala correspondientes a las frecuencias más bajas y fluctuaciones de menor escala correspondientes a frecuencias más altas - y modelarlas en consecuencia.

14 Para la electrodinámica cuántica (la teoría de cómo interactúan la luz y los electrones), todavía no conocemos los detalles microscópicos. Sin embargo, todavía podemos hacer predicciones con una precisión de diez decimales porque, como se puede mostrar con la teoría de renormalización del grupo, el único efecto de estos detalles microscópicos en las escalas en las que podemos hacer mediciones es establecer la masa y carga de electrones - cantidades que, como la velocidad del sonido en cualquier material en particular, se puede medir (pero no predecir).

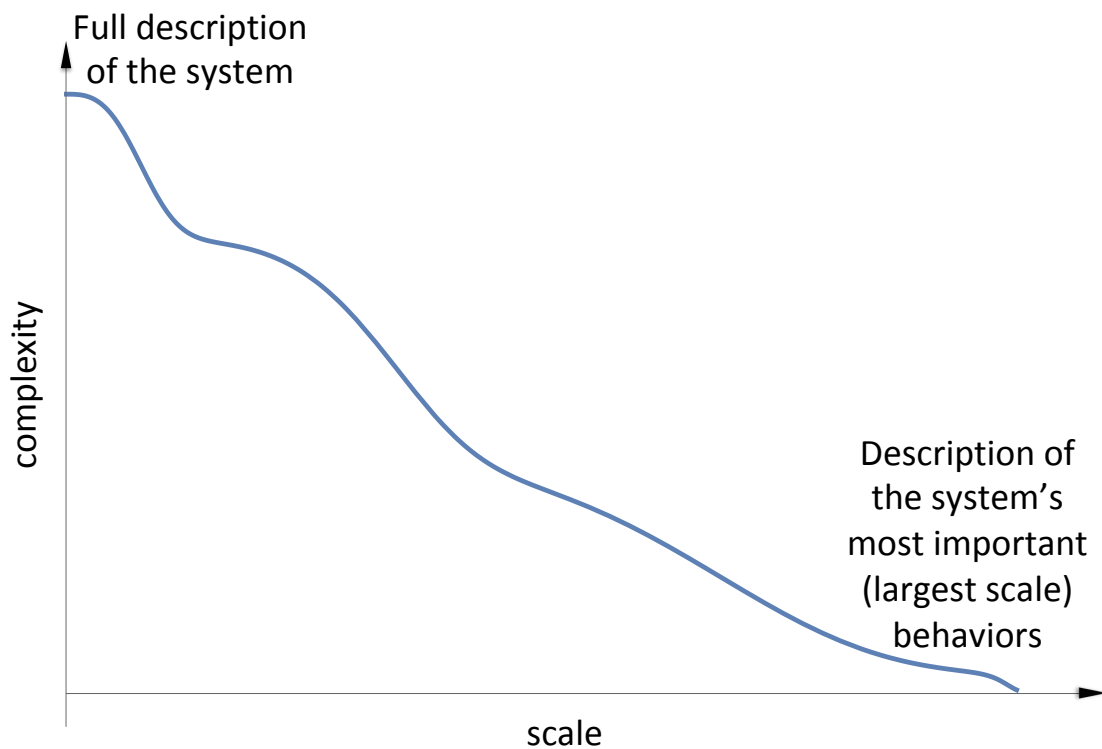


FIG. 9. Un perfil de complejidad representativo de un sistema complejo [23]. (Aquí, la información es sinónimo de complejidad, ya que la complejidad es una medida de la cantidad de información necesaria para transmitir el comportamiento de un sistema a una escala particular). Comprender todos los detalles (es decir, todos los comportamientos a pequeña escala) es imposible e innecesario; la información más importante está contenida en los comportamientos a gran escala. Sin embargo, para sistemas para los que no se aplica la teoría del campo medio, caracterizar estos comportamientos puede ser difícil (Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019).

(Siegenfeld, A., & Bar-Yam, 2019) Lim y col. aplican este enfoque al estudio de la violencia étnica [30]. Construyeron un modelo predictivo para analizar dónde la violencia étnica tiene el potencial de ocurrir y aplicaron su modelo a la India y a lo

que era Yugoslavia. La violencia étnica tiene muchas causas, pero más que centrarse en mecanismos específicos, culturalmente dependientes o en las propiedades promedio de regiones, como las estadísticas demográficas o económicas, los autores consideraron los patrones multiescala de cómo estaban distribuidos geográficamente los grupos étnicos (fig. 8). Encontraron que la violencia étnica no ocurría cuando los grupos étnicos estaban bien mezclados o bien separados, sino que solo ocurrían cuando los grupos étnicos se separaban en parcelas geográficas, 15 con la mayor probabilidad de que la violencia ocurriera en parcelas geográficas de un tamaño particular.¹⁶ Aunque no incluidos explícitamente en el análisis, los detalles específicos de una región son relevantes en la medida en que son bien causa bien un efecto (8º ambos) del tamaño de la parcela.¹⁷

15 Esta separación cae en la misma clase de universalidad que la separación de petróleo y agua.

16 Este análisis implica que la violencia étnica puede prevenirse mediante el uso de límites políticos bien ubicados, como en Suiza [31].

17 Por ejemplo, la animosidad entre dos grupos étnicos, aunque no explícitamente considerada, puede ser una causa así como una consecuencia de la segregación geográfica [32].

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Comprender todos los detalles de cualquier sistema complejo es imposible, como lo es para la mayoría de los sistemas con una separación de escalas; hay demasiada complejidad en la escala más pequeña. Pero a diferencia de los comportamientos de sistemas con una separación de escalas, los comportamientos importantes a gran escala de sistemas complejos no son simplemente el promedio de sus comportamientos a pequeña escala. Las interdependencias a múltiples escalas no aclaran exactamente cómo los comportamientos a pequeña escala dan lugar a los de mayor escala. Sin embargo, incluso para sistemas complejos, hay mucha menos complejidad en las escalas más grandes que en las escalas más pequeñas, por lo que siempre habrá comportamientos a gran escala que no dependen de la mayoría de los detalles del sistema (ver figura 9). En general, la clave para comprender el comportamiento a gran escala de un sistema es encontrar la descripción matemática (o conceptual) adecuada, que para sistemas complejos no es un promedio simple ni un recuento completo de todos los detalles. Ejemplos adicionales de este enfoque multiescala han sido revisados en otros lugares [23].

IV. SISTEMAS COMPLEJOS E INCERTIDUMBRE

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Aunque los principios discutidos en las secciones II y III nos ayudan a reconocer las propiedades y limitaciones fundamentales de los sistemas, nuestra comprensión de los sistemas más complejos será inevitablemente imperfecta. E independientemente de lo bien considerado que sea un plan, un sistema verdaderamente complejo presentará elementos que no se

consideraron por adelantado.¹⁸ Dada la ausencia de un conocimiento perfecto, ¿cómo se puede asegurar el éxito de los sistemas que diseñamos o de los que somos parte? Si bien el éxito de muchos sistemas se basa en la suposición de que se tomarán buenas decisiones, algunos sistemas pueden funcionar bien a pesar de la falibilidad de los tomadores de decisiones (ya sea debido a la corrupción, el sesgo subconsciente o las limitaciones fundamentales de las mentes humanas). El estudio de los sistemas complejos aborda esta observación científicamente al considerar (implícita o explícitamente) a los mismos tomadores de decisiones como parte del sistema y de una capacidad limitada de complejidad/toma de decisiones. La pregunta se convierte así: ¿cómo diseñamos sistemas que excedan la complejidad de los tomadores de decisiones dentro de ellos?

18 También se debería tener en cuenta que en un sistema funcional con un alto grado de complejidad, el impacto positivo potencial de un cambio es generalmente mucho menor que su impacto negativo potencial. Por ejemplo, es poco probable que un cambio en el cableado de una computadora mejore drásticamente el rendimiento de la computadora, pero podría causar que la computadora se bloquee. Los aviones son otro ejemplo. Este fenómeno es una consecuencia del hecho de que, por definición, un alto grado de complejidad implica que hay muchas configuraciones del sistema que no funcionarán para todas las configuraciones que si lo hará.

A. Procesos evolutivos

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Una observación clave es que, si bien la incertidumbre debilita a la mayoría de los sistemas, algunos sistemas se benefician de la incertidumbre y la variabilidad [33-36]. La característica común de estos sistemas es su incorporación (embodiment) de algún tipo de proceso evolutivo, es decir, un proceso en el que los cambios exitosos se copian (y modifican aún más) mientras que los cambios fallidos no. Los procesos evolutivos clásicos son biológicos: debido a la variabilidad introducida por mutaciones aleatorias, organismos con la complejidad y la escala de los humanos evolucionaron a partir de organismos unicelulares. Además, los humanos mismos tienen la propiedad de beneficiarse de la exposición a shocks aleatorios (siempre que los shocks no sean demasiado fuertes). El desempeño del sistema inmunitario mejora con la exposición temprana a patógenos no letales [37, 38]; los músculos y los huesos se fortalecen con los microdesgarros y las microfracturas, respectivamente; aprendemos por exposición a nueva información y resolución de problemas; y nuestras psicologías se fortalecen por la exposición a la adversidad, siempre que la adversidad no sea demasiado severa [39, 40].

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Las economías de mercado competitivas proporcionan otro ejemplo de cómo los sistemas pueden prosperar ante la incertidumbre. Debido a nuestra ignorancia de cuáles serán exitosos, muchas innovaciones y negocios potenciales deben ser creados y mejorados en paralelo, los exitosos expandiéndose y los fallidos fracasando. El éxito entre estos se puede mejorar de la misma manera - con muchos enfoques aplicados a la vez -, y así sucesivamente. (Sin embargo, sin marcos cooperativos de múltiples escalas regulados de manera efectiva - ver sección IV B - partes del sistema económico a

gran escala pueden optimizar los objetivos equivocados, estableciéndose en equilibrios sociales nocivos [41]).

(Siegenfeld, A., y Bar-Yam, 2019) Del mismo modo, los procesos internos de las grandes organizaciones pueden seguir un patrón evolutivo en el que pequeñas partes de la organización pueden fallar y, por lo tanto, mejorarse; sin tal flexibilidad, toda la organización puede fallar de inmediato ante un entorno externo cambiante. En algunos casos, el fracaso de toda la organización deja espacio para que organizaciones más efectivas tomen su lugar (suponiendo que la economía esté suficientemente descentralizada y competitiva para que la organización en cuestión no sea "demasiado grande para fracasar"). Sin embargo, el colapso del gobierno generalmente no es uno de esos casos [42], por lo que es especialmente importante que los sistemas de gobernanza posean la flexibilidad para beneficiarse internamente de la aleatoriedad y la incertidumbre. Quizás contraintuitivamente, no permitir que ocurran pequeñas fallas puede debilitar los sistemas a largo plazo al detener los procesos evolutivos y crear interdependencias que conducen a un riesgo sistémico (sección III C).

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Para prosperar en la incertidumbre y superar la complejidad de la toma de decisiones individuales, los sistemas pueden incorporar procesos evolutivos de forma que, aunque sean muy limitados al principio, mejoren naturalmente con el tiempo. El primer paso es permitir una variación suficiente en el sistema, de modo que el sistema pueda explorar el espacio de posibilidades. Dado que una gran cantidad de variación significa una gran complejidad y la complejidad se compensa con la escala, dicha variación establece claramente estas relaciones básicas. ¿Cómo nos ayuda esto a formar equipos efectivos? La respuesta es autoevidente. Los equipos efectivos se forman naturalmente cuando hay un proceso de selección evolutiva de equipos que se desempeñan bien en competición. Esta puede ser una lección útil para aquellos que intentan forzar el comportamiento del jugador de una forma u otra. Aunque no quiero decir que la enseñanza no es importante. Aun así, el papel de la competición es enseñar sobre la cooperación. También diría que la evolución nos enseña algo sobre el lugar adecuado de las recompensas para una competición efectiva. La recompensa principal es simplemente el derecho a permanecer juntos. Esto, después de todo, es de lo que trata la supervivencia, la supervivencia de un colectivo.

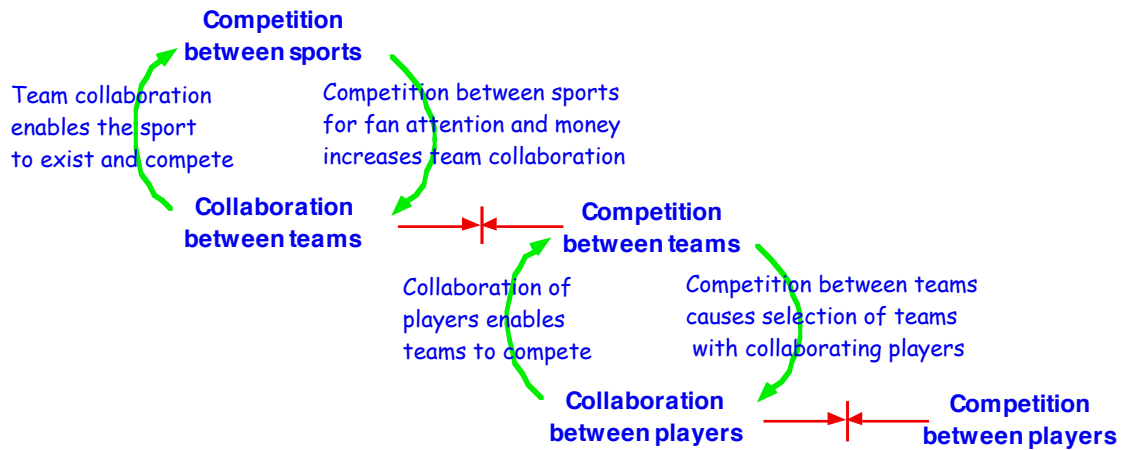


FIG. 10. Una ilustración a partir de [4, Capítulo 7] que muestra la interacción entre cooperación y competición en el contexto de equipos y ligas deportivas. Debe ocurrir a escalas más pequeñas (tanto en espacio como en tiempo). Por ejemplo, en el caso de la gobernanza, permitir que cada ciudad experimente de forma independiente permite que muchos planes se prueben en paralelo y sean iterados. La estrategia opuesta sería promulgar un plan nacional, cuyos efectos no podrán evaluarse comparativamente (Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019).

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) El segundo paso es permitir un medio de comunicación entre varias partes del sistema para que las elecciones exitosas se adopten en otros lugares y se construya sobre ellas (por ejemplo, ciudades que copian las prácticas exitosas de otras ciudades). Los planes siempre tendrán consecuencias imprevistas; la clave es permitir que las consecuencias no deseadas actúen a favor y no en contra del sistema en su conjunto. El deseo de control directo a menudo debe abandonarse para permitir que la complejidad aumente de manera autónoma con el tiempo¹⁹.

B. Procesos evolutivos multiescala

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Los procesos evolutivos exitosos generalmente no consisten en una competencia desenfrenada, sino que contienen tanto competencia como cooperación, cada una de las cuales ocurre en múltiples escalas [43]. Por ejemplo, las células cooperan dentro de organismos multicelulares para competir de manera más efectiva con otros organismos, y los organismos cooperan tanto dentro como entre especies para competir de manera más efectiva contra otras especies. La competencia a mayor escala genera, naturalmente, la cooperación a menor escala, porque para que un grupo compita de manera efectiva contra otro grupo (competencia a gran escala), debe haber cooperación dentro del grupo. La cooperación también puede generar competencia, ya que a veces la mejor manera para que el grupo logre sus objetivos compartidos es facilitar una competencia sana entre sus subgrupos. Estos subgrupos deben

fomentar la cooperación dentro de sí mismos para poder efectivamente 19 Los sistemas sólo pueden diseñar explícitamente sistemas de menor complejidad, ya que un diseño explícito es en sí mismo un comportamiento del primer sistema. Sin embargo, los sistemas que evolucionan con el tiempo pueden volverse más complejos que sus diseñadores, compiten entre sí, y ellos también pueden aumentar la efectividad de su cooperación interna introduciendo una competencia sana entre sus miembros (la figura 10 proporciona un ejemplo). Si estos miembros son ellos mismos grupos, el proceso de competencia que genera cooperación que genera más competencia puede continuar a escalas aún menores. Este proceso también puede funcionar a la inversa: para competir de manera más efectiva, los individuos pueden cooperar entre sí para formar grupos, que a su vez pueden cooperar para formar grupos aún más grandes, y así sucesivamente. Por lo tanto, una red compleja de cooperación y competencia entre grupos de varios tamaños (escalas) puede evolucionar naturalmente.

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Para que se promueva una cooperación grupal efectiva, la competencia debe estar adecuadamente estructurada. Un equipo de fútbol en el que los jugadores compiten con los miembros de su propio equipo para marcar goles no será efectivo, pero uno en el que los jugadores compitan por el título del más apto puede serlo. El marco en el que se produce la competencia debe ser estructurado de modo que se incentive a los competidores para realizar acciones que sean netamente buenas para el grupo; de lo contrario, se produce un tipo de situación de tragedia-de-los-comunes. El potencial de que la competencia salga mal resalta la importancia de tener una estructura de múltiples escalas con competencia en múltiples niveles, en lugar de que todos en el sistema compitan con todos los demás. Con la estructura multiescala, los grupos con dinámicas evolutivas no saludables se seleccionan en contra, mientras que los grupos con una combinación saludable de competencia y cooperación que beneficia a todo el grupo son seleccionados.20 Los sistemas económicos de mercado tienen éxito no porque los mercados libres produzcan resultados óptimos (los mercados del mundo real a menudo se desvían drásticamente de los supuestos de los modelos de libre mercado y abundan las externalidades) sino más bien porque, en el mejor de los casos, los sistemas de mercado debidamente regulados permiten que surjan naturalmente procesos evolutivos multiescala, lo que resulta en innovaciones y complejidad mucho más allá de lo que cualquiera podría haber imaginado, por no hablar de diseño (mucho menos diseñado).

V. RESUMEN

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Los sistemas con muchos componentes a menudo exhiben comportamientos emergentes, es decir, comportamientos que surgen de las relaciones entre los componentes y no de los componentes en sí mismos. Sin embargo, una idea temprana de la física estadística es que, a pesar de la imposibilidad de describir los detalles de billones de moléculas, las propiedades macroscópicas de las moléculas pueden entenderse bien analizando su espacio de posibles comportamientos, en lugar de su configuración y movimientos específicos 13. Aunque muchas propiedades macroscópicas pueden describirse en términos del comportamiento promedio de las moléculas, las propiedades macroscópicas de

ciertos fenómenos físicos, como las transiciones de fase, no pueden entenderse promediando los componentes del sistema; en consecuencia, los físicos se vieron obligados a desarrollar nuevos métodos multiescala. Asimismo, aunque los métodos estadísticos estándar - que infieren las propiedades promedio de los muchos componentes de un sistema - pueden modelar con éxito algunos sistemas biológicos y sociales, fallan en otros, a veces de manera espectacular.

20 Existe evidencia de que la naturaleza geográfica de la evolución - en la cual los organismos evolucionan en ambientes algo separados y la teoría del campo medio no se aplica - ha dado como resultado precisamente esta estructura de múltiples escalas y por lo tanto ha permitido la evolución del comportamiento altruista genuino (por ejemplo, no recíproco) [44, 45].

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Adoptar una perspectiva sistémica al considerar el espacio de posibles comportamientos puede generar conocimientos que no pueden obtenerse considerando solo las causas y efectos proximales de problemas o crisis particulares. La complejidad de un sistema - que depende de su número de comportamientos potenciales distintos (es decir, del espacio de posibilidades) - es un punto de partida desde el cual se pueden manejar sus propiedades a gran escala, de la misma manera que la entropía es el punto de partida de la física estadística. Debido a que el número de comportamientos distintos de un sistema depende del nivel de detalle (comportamientos que parecen iguales a una resolución más baja pueden ser distintos a una resolución más alta), la complejidad depende de la escala. Las interdependencias entre los componentes reducen la complejidad a escalas más pequeñas al restringir la libertad de los componentes individuales mientras crean complejidad a escalas más grandes al permitir comportamientos que involucran a múltiples componentes trabajando juntos. Por lo tanto, para los sistemas que constan de los mismos componentes, existe una compensación fundamental entre el número de comportamientos a escalas menores y mayores. Esta compensación entre escalas está relacionada con la compensación entre la adaptabilidad de un sistema, que depende de la variedad de respuestas diferentes que tiene ante las perturbaciones a pequeña escala, y su eficiencia, que depende de su escala operativa. No existe una escala ideal en la que un sistema debería poseer complejidad; más bien, los sistemas más efectivos son aquellos que, en cada escala, coinciden con la complejidad de sus entornos.

(Siegenfeld, A. y Bar-Yam, 2019) Al analizar datos o crear estructuras organizacionales, los métodos estándar fallan al subestimar la importancia de las interdependencias y la complejidad que surge de estas interdependencias. Hasta cierto punto, estos problemas pueden mitigarse haciendo coincidir el análisis de datos o la estructura organizacional con las divisiones naturales dentro del sistema. Dado que los sistemas complejos son aquellos en los que se producen comportamientos en múltiples escalas, las organizaciones y los análisis exitosos de sistemas complejos también deben ser de naturaleza multiescala. Sin embargo, incluso cuando se cuenta con toda la información y las herramientas adecuadas, la comprensión humana individual de la mayoría de los sistemas complejos será inevitablemente insuficiente, siendo la imprevisibilidad la mejor predicción. Para

enfrentar esta realidad, debemos diseñar sistemas que, como la evolución, se fortalezcan en lugar de debilitarse por la imprevisibilidad. Tales sistemas son flexibles con múltiples procesos que ocurren en paralelo; estos procesos pueden competir entre sí dentro de un marco cooperativo multiescalar, de modo que las prácticas efectivas se replican. Solo estos sistemas - que aumentan en complejidad con el tiempo a partir de prueba y error y la entrada de muchos - exhiben la complejidad necesaria para resolver problemas que exceden los límites de la comprensión humana.

ACKNOWLEDGMENTS

This material is based upon work supported by the National Science Foundation Graduate Research Fellowship under Grant No. 1122374 and the Hertz Foundation. We thank Uyi Stewart for discussions that led to the writing of this paper, Gwendolyn Towers for editing early drafts of the manuscript, and Robi Bhattacharjee for helpful discussions regarding the definitions of complexity and scale.

Siegenfeld, A., & Bar-Yam, Y. (2019). An Introduction to Complex Systems Science and its Applications. arXiv: Physics and Society.

arXiv:1912.05088v1 [physics.soc-ph] 11 Dec 2019 2