

## Evolución de la multicelularidad y de las sociedades humanas complejas: Los factores comunes en ambas transiciones

### *Evolution of Multicellularity and Complex Human Societies: The Common Factors Involved in Both Transitions*

Edwin Francisco Herrera-Paz<sup>\*a</sup>

<sup>a</sup>*Pontificia Universidad Católica de Honduras "Nuestra Señora Reina de la Paz"*

Recibido 2025-01-09

Aceptado 2026-05-19

Publicado 2026-05-28

#### Palabras clave

Cambio social; División del trabajo; Energía; Sistemas complejos; Transferencia de Información; ;

#### Keywords

Complex systems; Division of labor; Energy; Information transfer; Social change

corresponsal: [eherrera@unicah.edu](mailto:eherrera@unicah.edu)

**Resumen:** Las transiciones evolutivas mayores en individualidad (TEMI) representan reorganizaciones profundas en los sistemas biológicos y socioculturales, aunque los mecanismos organizativos que hacen que estas transiciones sean direccionales e irreversibles aún no se comprenden completamente. En esta revisión se propuso un marco mecanicista para las transiciones evolutivas fraternas, centrado en propiedades generales a nivel de sistema más que en mecanismos genéticos o culturales específicos del sustrato. El modelo enfatizó el crecimiento sostenido, la disponibilidad energética, la expansión informacional y la especialización funcional como factores interactuantes que impulsan a los sistemas cooperativos hacia nuevos niveles de organización. El análisis mostró que, a medida que los sistemas en crecimiento aumentan en tamaño y densidad de interacción, las demandas informativas para la coordinación, regulación y control crecen de forma no lineal. Cuando estas demandas superan la capacidad de los componentes individuales, la especialización funcional surge como una respuesta estructural necesaria. Asimismo, se identificó que, si bien la especialización mejora la eficiencia y permite un mayor crecimiento, va acompañada de simplificación funcional, pérdida de plasticidad y creciente interdependencia entre los componentes, lo que introduce irreversibilidad en el sistema. Se propuso además que las infraestructuras de comunicación y transporte se vuelven indispensables para mantener la integración a medida que se profundiza la especialización. Al integrar procesos energéticos, informativos y organizativos en un modelo mecanicista unificado, este marco explica por qué las transiciones evolutivas fraternas—como la aparición de la multicelularidad y sociedades humanas complejas—presentan una direccionalidad, irreversibilidad y ventajas competitivas consistentes bajo condiciones de competencia entre grupos.

**Abstract:** Major evolutionary transitions in individuality (METI) represent profound reorganizations in biological and sociocultural systems, yet the organizational mechanisms that render these transitions directional and irreversible remain incompletely understood. In this review, a mechanistic framework for fraternal evolutionary transitions was proposed, focusing on general system-level properties rather than substrate-specific genetic or cultural mechanisms. The model emphasized sustained growth, energy availability, information expansion, and functional specialization as interacting drivers that push cooperative systems toward new organizational levels. The analysis showed that, as growing systems increase in size and interaction density, informational demands for coordination, regulation, and control rise nonlinearly. When these demands exceed the processing capacity of individual components, functional specialization emerges as a necessary structural response. It was also identified that, while specialization enhances efficiency and enables further growth, it is accompanied by functional simplification, loss of plasticity, and increasing interdependence among components, thereby introducing irreversibility into the system. In addition, communication and transport infrastructures were proposed as indispensable for maintaining integration as specialization deepens. By integrating energetic, informational, and organizational processes into a unified mechanistic model, this framework explains why fraternal evolutionary transitions—such as the emergence of multicellularity and complex human societies—exhibit consistent directionality, irreversibility, and competitive advantages under conditions of intergroup competition.

## 1 Introducción

Las transiciones evolutivas mayores en individualidad (TEMI) consisten en la evolución de poblaciones de elementos de vida libre, hacia conglomerados compactos en los que los elementos se vuelven interdependientes. Estos nuevos elementos se convierten en un individuo de nivel superior. Se pueden distinguir dos tipos de TEMI: la igualitaria y la fraterna. En la TEMI igualitaria dos componentes claramente diferenciados se convierten en una unidad indivisible, como en la simbiosis humano-microbioma, o el surgimiento de la célula eucariota por eventos endosimbióticos entre procariotas. Por otro lado, una TEMI fraterna implica la evolución de poblaciones de elementos del mismo tipo que se diferencian y forman un organismo de nivel superior. Los ejemplos canónicos son la transición hacia la multicelularidad, el surgimiento de superorganismos de insectos eusociales, y la evolución sociocultural en poblaciones humanas (Maynard Smith & Szathmáry, 1995).

Las TEMI suelen describirse como hitos de creciente complejidad, pero las presiones organizacionales que hacen que estas transiciones sean direccionales e irreversibles aún no se han explorado suficientemente. Representan reorganizaciones profundas en los sistemas biológicos y socioculturales, marcadas por la aparición de nuevos niveles de individualidad, integración funcional e irreversibilidad a largo plazo. Desde su formulación original, estas transiciones se han interpretado principalmente a través de marcos que enfatizan la cooperación, la mediación de conflictos y los cambios en las unidades de selección (Maynard Smith & Szathmáry, 1995). Si bien estas perspectivas describen exitosamente los resultados de las transiciones mayores, ofrecen una visión más limitada de las presiones organizacionales y mecanicistas que inician y estructuran el proceso de transición en sí.

Los trabajos recientes de Carmel y colaboradores han contribuido a esta discusión identificando cuatro elementos fundamentales que caracterizan las TEMI. Primero, el crecimiento poblacional se refiere al aumento sostenido del número de unidades individuales dentro de un sistema, una condición básica que amplifica las interacciones y crea las bases para una organización de nivel superior. Segundo, la inseparabilidad captura el grado en que las unidades se integran funcionalmente, de modo que su separación conlleva la pérdida de viabilidad o función, señalando la emergencia de una entidad cohesiva de nivel superior. Tercero, la especialización laboral implica la diferenciación de tareas entre las unidades, permitiendo que distintos componentes adopten roles especializados que condicionan la división del trabajo y mejoran la eficiencia. Finalmente, la especialización reproductiva supone la aparición de roles reproductivos dedicados, estabilizando aún más la estructura organizacional y reforzando la irreversibilidad (Carmel, 2020; Carmel & Shavit, 2023). Este marco se ha extendido a sistemas socioculturales, incluyendo propuestas que sugieren que las poblaciones humanas pueden exhibir formas tempranas o parciales de organización superorganísmica (Herrera-Paz, 2015, 2025).

Sobre la base de estos trabajos, la presente revisión adopta un enfoque mecanicista de la evolución a la complejidad, centrado en propiedades organizacionales gene-

rales y observables, en lugar de mecanismos genéticos o culturales específicos de cada nivel de complejidad. El análisis se enfoca específicamente en las TEMI fraternas, con énfasis en dos ejemplos paradigmáticos: el surgimiento y evolución de la multicelularidad, y la transformación de poblaciones humanas rudimentarias en sociedades avanzadas complejas. En estas transiciones, el proceso comienza con unidades inicialmente equivalentes de “cooperadores generalistas”—como células individuales o humanos primitivos—y progresa a medida que la especialización surge de dinámicas internas dentro del grupo. Mediante esta especialización generada internamente, el sistema evoluciona hacia un nivel superior de organización, generando nuevas formas de funcionalidad y de integración colectiva de “cooperadores especializados”.

En tales sistemas, el crecimiento sostenido produce un incremento no lineal en la densidad de interacciones, lo que conduce a una rápida expansión de los requisitos informativos necesarios para la regulación, coordinación y control (Wagner, 2014a; Bourrat, Takacs, Doucier, et al., 2024). Cuando estas exigencias informativas superan la capacidad de manejo de los componentes individuales, el sistema se enfrenta a un cuello de botella estructural fundamental. La especialización funcional surge como una respuesta necesaria a ese cuello de botella, redistribuyendo las demandas informativas y energéticas entre los componentes del sistema. Aunque la especialización incrementa la eficiencia, necesariamente va acompañada de una simplificación funcional y pérdida de plasticidad de los componentes, lo que estabiliza los roles especializados e introduce irreversibilidad en el proceso. A medida que se profundiza la interdependencia entre componentes, el surgimiento de infraestructuras efectivas de comunicación y transporte se vuelven indispensables para mantener la coordinación y la integración, permitiendo así el crecimiento continuo (West, Brown, & Enquist, 1997; Banavar, Maritan, & Rinaldo, 1999).

Dentro de este marco, la energía desempeña un papel central y dual. El acceso a mejores fuentes energéticas permite la expansión inicial del sistema, mientras que la especialización reduce el costo energético por unidad, generando ganancias netas de eficiencia. Estos procesos energéticos, informativos y organizacionales interactúan mediante bucles de retroalimentación positiva, permitiendo que los sistemas se amplíen más allá de los límites previos, acelerando la transición una vez que ha comenzado. El modelo describe así una trayectoria característica en la que una población de unidades cooperativas generalistas (Nowak, 2006), se transforma progresivamente en un organismo de nivel superior compuesto por elementos altamente especializados e interdependientes. Al fundamentar las TEMI en restricciones organizacionales generales, en lugar de en suposiciones teleológicas o mecanismos específicos de cada nivel de complejidad, este marco proporciona una explicación unificada para la direccionalidad, irreversibilidad y ventajas competitivas observadas en las TEMI fraternas tanto en sistemas biológicos como socioculturales. Esto puede ser especialmente cierto bajo condiciones de fuerte competencia entre grupos (Turchin, 2016). El cuadro 1 compara algunos de los parámetros estudiados en esta

revisión entre un organismo multicelular primitivo, filogenéticamente cercano a la transición a la multicelularidad, y uno moderno y complejo, mientras el cuadro 2 compara una sociedad humana primitiva de cazadores recolectores con una megápolis actual.

**Tabla 1** Comparación de cinco parámetros entre un organismo biológico filogenéticamente primitivo y uno complejo.

Parámetro <sup>a</sup>	Organismo multicelular primitivo ( <i>Trichoplax adhaerens</i> )	Organismo multicelular complejo (ballena azul)
1. Tamaño en número de células	$10^3$ – $10^4$	$10^{14}$ – $10^{17}$
2. Número de diferentes tipos celulares	6	> 400
3. Gasto metabólico (Kcal/día)	$10^{-4}$	$10^6$ – $10^7$
4. Tamaño del genoma (Gigabases)	0.098	2.4
5. Rango de comunicación (metros)	Paracrina ( $10^{-3}$ )	Endocrina y sináptica ( $10^1$ m)

Fuente de los datos: <https://bionumbers.hms.harvard.edu>

**Tabla 2** Comparación de cinco parámetros entre una comunidad humana primitiva y una megápolis moderna.

Parámetro <sup>a</sup>	Comunidad humana primitiva de cazadores recolectores	Moderna megápolis
1. Tamaño en número de habitantes	$10^1$ – $10^2$	$10^6$ – $10^7$
2. Número de ocupaciones	$10^1$	$10^3$ – $10^4$
3. Consumo energético diario (KWh)	$10^2$	$10^9$
4. Tamaño de la información socio-cultural	Terabytes	Exabytes
5. Rango de comunicación	Voz humana, emisarios a pie	Electromagnética (radio, internet)

Fuente: <https://bionumbers.hms.harvard.edu>

## 2 Métodos

El presente trabajo corresponde a una revisión teórica de la literatura relevante sobre transiciones evolutivas mayores en individualidad (TEMI), con énfasis en estudios de biología evolutiva, teoría de sistemas complejos y evolución sociocultural. A partir de esta revisión, se identificaron

variables organizacionales comunes, tales como crecimiento poblacional, disponibilidad energética, expansión informacional, especialización funcional y evolución de infraestructuras de comunicación y transporte. Estas variables se integraron en un marco mecanicista conceptual orientado a explicar las dinámicas subyacentes a las transiciones fraternas.

### 2.1 El crecimiento poblacional como condición impulsora de la transición

El crecimiento del sistema—definido como un aumento sostenido en el número de componentes, interacciones o volumen funcional—constituye una condición fundamental que posibilita las TEMI. Diversos trabajos teóricos y empíricos recientes apoyan cada vez más la idea de que el crecimiento no es simplemente una consecuencia posterior de la complejidad, sino un impulsor temprano que genera las presiones organizativas necesarias para las transiciones hacia individualidades de nivel superior (Bourrat et al., 2024; Doulcier, Takács, Hammerschmidt, et al., 2024). En ausencia de crecimiento sostenido, los sistemas cooperativos permanecen confinados a escalas pequeñas y no experimentan la densidad de interacciones ni las demandas reguladoras necesarias para que surjan nuevos niveles de organización. Desde esta perspectiva, el crecimiento empuja activamente a los sistemas hacia límites estructurales que requieren reorganización (Szathmáry, 2015; Carmel & Shavit, 2023).

En sistemas biológicos y sociales, el crecimiento poblacional se produce cuando la tasa de reproducción o incorporación de componentes supera de manera consistente las pérdidas debidas a mortalidad, desintegración o conflicto interno. Este balance positivo depende de mecanismos que permiten la expansión sin pérdida de cohesión funcional. La cooperación y la vida en grupo reducen la mortalidad individual, distribuyen el riesgo y amortiguan a los sistemas frente a perturbaciones ambientales, incrementando así la probabilidad de que los componentes sobrevivan el tiempo suficiente para reproducirse o integrarse completamente (Nowak, Tarnita, & Wilson, 2010; Bourrat et al., 2024).

En organismos multicelulares, la protección estructural y la homeostasis resguardan a las células de fluctuaciones externas y fallos locales, permitiendo mayores densidades y una persistencia más prolongada de los componentes en interacción (Alberts et al., 2015; Doulcier et al., 2024). En las sociedades humanas, las funciones estabilizadoras análogas son proporcionadas por la defensa colectiva, el cuidado cooperativo de crías y, más recientemente, por los sistemas de salud pública, que reducen sustancialmente la mortalidad e incrementan la densidad poblacional. Al disminuir las tasas de pérdida, estos mecanismos aceleran el crecimiento e intensifican las interacciones internas, amplificando las demandas organizativas (Turchin, 2016; McGill, Er, Penney, Egan, et al., 2021).

La competencia entre grupos no genera crecimiento de forma directa, pero actúa como un filtro selectivo poderoso que favorece a los sistemas capaces de sostener tamaños mayores o expandirse más rápido bajo condiciones de recursos limitados. En entornos competitivos, los grupos que

logran tasas de crecimiento más altas tienden a ocupar más espacio, absorber o desplazar a rivales y persistir durante más tiempo evolutivo. Desde una perspectiva de selección natural multinivel, esta dinámica favorece rasgos que mejoran la cohesión interna, la cooperación y la eficiencia colectiva en la medida en que contribuyen al crecimiento y la persistencia grupal (Nowak, 2006; Okasha, 2006; Bourrat et al., 2024).

A medida que aumenta el tamaño del sistema, el número de interacciones potenciales entre sus componentes crece de manera no lineal, generando desafíos crecientes de coordinación, control y regulación. Los estudios sobre escalamiento informacional y sistemas complejos muestran que el incremento de la conectividad amplifica rápidamente las demandas informativas necesarias para el funcionamiento coherente del sistema (Lizier, Prokopenko, & Zomaya, 2008; Wagner, 2014a). Por tanto, el crecimiento no es un proceso neutro: al aumentar la densidad y la conectividad, impulsa a los sistemas hacia umbrales estructurales que no pueden resolverse bajo un marco organizativo generalista, creando las condiciones en las que la especialización y la integración de nivel superior se vuelven inevitables.

Dos fuentes distintas pero interdependientes de soporte energético subyacen a la transición: innovaciones en la adquisición de energía y mejoras en la eficiencia energética.

## 2.2 Mejores fuentes de energía

El primer componente energético de la transición implica la capacidad de los sistemas para explotar fuentes de energía nuevas o más eficientes, incrementando así la cantidad total de energía disponible. El crecimiento sostenido requiere excedentes energéticos persistentes. Los sistemas solo pueden aumentar de tamaño cuando la energía disponible supera los requerimientos mínimos de mantenimiento y reparación (Bettencourt, Lobo, Helbing, Kühnert, & West, 2007; Clarke, 2025). En sistemas biológicos, estos excedentes pueden resultar de innovaciones metabólicas y asociaciones simbióticas, como el surgimiento de las mitocondrias por eventos endosimbióticos (Lane, 2022). En las sociedades humanas, los excedentes energéticos han surgido históricamente de la agricultura y del desarrollo tecnológico que permite la explotación de fuentes más abundantes de energía, como combustibles fósiles y la energía nuclear (DeLong & Burger, 2015).

## 2.3 Mejoras en la eficiencia energética

El aumento del tamaño del sistema puede generar economías de escala, mejorar la eficiencia colectiva y promover la innovación organizativa, lo que a su vez estabiliza aún más el crecimiento. La evidencia empírica sugiere que la eficiencia energética puede escalar de manera positiva con el tamaño, tanto en organismos biológicos como en poblaciones humanas (White & Seymour, 2005; Bettencourt, Yang, Lobo, et al., 2020).

La especialización funcional reduce los costes energéticos al eliminar redundancias, optimizar estructuras específicas para cada tarea y minimizar el mantenimiento de capacidades no utilizadas. En organismos multicelulares, las células especializadas realizan funciones concretas con

mayor eficiencia que las células generalistas, reduciendo el coste energético por función. En las sociedades humanas, el trabajo especializado permite que las tareas se realicen con mucho menos gasto de energía y tiempo que bajo un régimen generalista (Powell, 2000; Wagner, 2014b; Milo & Phillips, 2021).

A medida que la especialización y la simplificación avanzan, los componentes se vuelven cada vez más dependientes de la estructura integrada del sistema. Las unidades especializadas pierden la capacidad de adquirir energía de forma autónoma o de funcionar independientemente, reforzando la irreversibilidad de la transición. Volver a una configuración generalista requeriría un incremento prohibitivo en los costes energéticos, a menudo por encima de los límites sostenibles del sistema (Bourrat, Doucier, Rose, et al., 2022).

En el contexto de la TEMI, la información no debe entenderse únicamente como una medida abstracta de entropía o incertidumbre, sino como un conjunto organizado de estructuras que posibilitan la coordinación funcional de sistemas compuestos. A medida que los sistemas biológicos y sociales aumentan de tamaño y densidad de interacción, la cantidad de información necesaria para un funcionamiento coherente se expande inevitablemente. Esto genera presiones selectivas que favorecen nuevas soluciones organizativas (Maynard Smith & Szathmáry, 1995; Wagner, 2014a).

Para posibilitar un análisis comparativo entre los ámbitos biológico y sociocultural, la arquitectura informacional de los sistemas complejos puede descomponerse analíticamente en tres componentes interdependientes:

- los medios de almacenamiento de información,
- los códigos interpretativos y
- los contenidos informacionales *per se*.

En conjunto, estos componentes determinan la capacidad del sistema para acumular, transmitir y operacionalizar información.

## 2.4 Medios de almacenamiento de información

Los medios de almacenamiento constituyen los sustratos físicos en los que la información se codifica, preserva, copia y hereda. La existencia de mecanismos de almacenamiento relativamente estables es una condición necesaria para la evolución acumulativa ya que, sin persistencia a lo largo del tiempo, la selección no puede actuar sobre variantes informacionales (Szathmáry & Maynard Smith, 1997).

En los sistemas biológicos, el ADN representa el medio de almacenamiento fundamental y universal. En organismos complejos, el almacenamiento informacional se amplía mediante características como la metilación heredable del ADN y la memoria de la cromatina, que codifican estados contextuales y regulatorios. Adicionalmente, los sistemas nerviosos son dispositivos capaces de retener información de forma dinámica a través del aprendizaje y la memoria (Jablonka & Lamb, 2005; Herrera-Paz, 2018).

En las sociedades humanas, los primeros medios de almacenamiento consistían principalmente en los cerebros humanos que portan la memoria individual y colectiva

transmitida oralmente. Posteriormente, estos se expandieron radicalmente con la aparición de registros escritos a mano en piedra, papiro, papel, y más recientemente la imprenta. En las sociedades modernas las tecnologías digitales significaron un salto cuantitativo enorme en la capacidad de almacenamiento. Estos medios permiten la transmisión intergeneracional de información con alta fidelidad y gran capacidad, facilitando niveles sin precedentes de acumulación cultural y coordinación a largo plazo (Boyd & Richerson, 1985; Lian & Xie, 2024).

### 2.5 Códigos: interpretación y operatividad de la información

Los códigos definen las reglas que traducen la información almacenada en resultados funcionales. Un código especifica cómo debe interpretarse una secuencia, señal o símbolo para originar una acción, regulación o respuesta concreta dentro del sistema. Sin códigos, la información almacenada permanece inerte y no operativa, por lo que la aparición temprana de códigos funcionales es un requisito previo para la complejidad evolutiva (Pattee, 2012; Barbieri, 2017).

En los sistemas biológicos, el código genético es el ejemplo canónico, ya que traduce secuencias de nucleótidos en cadenas de aminoácidos. Más allá de este código universal, surgen códigos reguladores cada vez más complejos tanto en organismos unicelulares como multicelulares, como promotores, potenciadores y redes de regulación génica. En los organismos multicelulares, estas arquitecturas regulatorias son esenciales para la diferenciación celular y la división coordinada del trabajo entre tejidos y órganos (Levine & Tjian, 2003; Davidson, 2006; Moris, Pina, & Arias, 2016).

En los sistemas socioculturales, las lenguas naturales funcionan como códigos simbólicos primarios que permiten la transmisión de información compleja (Kirby, Tamariz, Cornish, & Smith, 2023). En niveles organizativos superiores, surgen códigos adicionales en forma de sistemas legales, normas institucionales y procedimientos formalizados que regulan el comportamiento colectivo (Hodgson, 1998). Las sociedades tecnológicas dependen además de códigos formales altamente especializados —como la lógica binaria, los lenguajes de programación y los protocolos estandarizados— que posibilitan el funcionamiento de infraestructuras técnicas complejas (Plantin, Lagoze, Edwards, & Sandvig, 2018).

### 2.6 Contenidos informacionales: secuencias, patrones y textos

Los contenidos informacionales corresponden a las instancias concretas de información que se almacenan, interpretan y ponen en práctica mediante un código determinado. En los sistemas biológicos, incluyen secuencias específicas de ADN, patrones de expresión génica concretos y configuraciones neuronales dinámicas que subyacen a la conducta y la cognición (Liu, Abdellaoui, van Wingen, & Verweij, 2024).

En las sociedades humanas, los contenidos informacionales adoptan la forma de textos escritos, manuales téc-

nicos, protocolos, conocimientos científicos y registros históricos. Aunque la diversidad potencial de los contenidos informacionales es prácticamente ilimitada, su expresión funcional está condicionada por la capacidad de los medios de almacenamiento disponibles, los códigos interpretativos y la capacidad del sistema para gestionar la complejidad informacional (Mesoudi, 2024; Jang, Acerbi, Enquist, & Ghirlanda, 2025).

### 2.7 Escalamiento informacional y presión hacia la especialización

El crecimiento del sistema conlleva una expansión acoplada de los tres componentes: mejores medios de almacenamiento, diversificación de los códigos y proliferación de contenidos informacionales. Esta expansión incrementa los costes cognitivos, energéticos y organizativos de la gestión de la información de forma marcadamente no lineal. La evidencia muestra que, en sistemas complejos adaptativos, las demandas informacionales crecen de manera supralineal con el tamaño y la conectividad del sistema (Varley, 2025; Di Felice, Prokopenko, & Lizier, 2025). Además, trabajos recientes que cuantifican la complejidad configuracional muestran que, a medida que las redes de interacción se vuelven más densas, los costos de procesamiento informacional aumentan drásticamente. Entonces, a medida que el sistema crece, se requiere de códigos más ricos y mayores capacidades de almacenamiento de lo que predecirían modelos aditivos simples (Rock, Gershenson, & Fernández, 2025).

Dado que la capacidad de procesamiento informacional de los componentes individuales es finita, los sistemas en crecimiento se enfrentan inevitablemente a límites estructurales para la gestión centralizada o generalista de la información (Wagner, 2014b). Por tanto, estos límites pueden generar presiones selectivas que favorezcan la redistribución de las tareas informacionales entre componentes especializados. Desde esta perspectiva, la división del trabajo no surge como una contingencia histórica, sino como una respuesta evolutivamente necesaria a la sobrecarga informacional en sistemas en expansión. Esta lógica se aplica tanto a transiciones biológicas como a transiciones socioculturales. El escalamiento informacional proporciona así un vínculo mecanicista entre crecimiento, límites organizativos y el inicio de la especialización en la TEMI fraterna.

## 3 Resultados

### 3.1 Emergencia de la Especialización como Respuesta al Incremento Informacional

La variabilidad fenotípica natural que surge por mutaciones, cambios epigenéticos o recombinación sexual en contextos biológicos, y por innovación, aprendizaje social y recombinación cultural en contextos socioculturales —donde a menudo interactúan mecanismos biológicos y culturales— puede generar asimetrías funcionales incipientes. Estas asimetrías pueden actuar como impulsores direccionales, inclinando la trayectoria inicial hacia la especialización, sin que sean suficientes para estabilizarla (Boyd & Richerson, 1985). La especialización laboral estable y sistémica solo puede surgir cuando el crecimiento

sostenido y la expansión asociada de las demandas informacionales superan la capacidad de manejo de los componentes individuales, imponiendo así restricciones estructurales a la organización (Wagner, 2014b). Bajo estas condiciones, la especialización funcional emerge como una respuesta necesaria. Especializarse implica la restricción del repertorio funcional de cada componente —ya sean células, individuos u organizaciones— a un conjunto limitado de tareas, lo que permite la optimización local y mejora el rendimiento. Al reducir los costos cognitivos, energéticos y reguladores para gestionar múltiples funciones simultáneamente, la especialización incrementa la eficiencia colectiva y favorece el crecimiento adicional del sistema (Maynard Smith & Szathmáry, 1995; Bourrat et al., 2022).

En los organismos multicelulares, la especialización se manifiesta a través de la diferenciación celular en tejidos y órganos optimizados para funciones distintas como transporte, defensa, metabolismo o señalización. En las sociedades humanas, aparece como diferenciación ocupacional y profesional, sustentada en una formación prolongada y la acumulación de conocimientos específicos para cada tarea. En ambos sistemas, biológicos y socioculturales, la especialización representa una redistribución del procesamiento y control informacional, y no solo una mera división casual del trabajo físico (Bourrat et al., 2024; Doulcier et al., 2024).

### 3.2 Simplificación Funcional como Consecuencia de la Especialización

La especialización no implica únicamente el mejoramiento del desempeño en una función particular. También conlleva la pérdida progresiva de funciones que resultan innecesarias para el rol especializado. Este proceso de simplificación funcional surge por la degradación pasiva de capacidades no utilizadas, o por la supresión activa de funciones redundantes, ya que mantenerlas supondría costos energéticos y regulatorios innecesarios. La simplificación evolutiva de los componentes a medida que el sistema como un todo aumenta en complejidad puede verse como un aumento de entropía, lo que vuelve la METI altamente irreversible; una discusión de la simplificación como mecanismo evolutivo y su relación con la entropía puede encontrarse en (Herrera-Paz, 2021).

En los sistemas biológicos, la diferenciación celular va acompañada de un silenciamiento estable de grandes porciones del genoma mediante mecanismos reguladores y epigenéticos, como la metilación del ADN y la modificación de histonas. Estos cambios restringen la expresión génica, estabilizan los estados diferenciados y disminuyen drásticamente la plasticidad celular. Por consiguiente, las células especializadas rara vez reversionan espontáneamente a estados pluripotentes bajo condiciones naturales (Missinato, Murphy, Lynott, et al., 2023; Bell, Faulkner, & Gilan, 2024).

De manera análoga, en las sociedades humanas, la especialización ocupacional prolongada suele asociarse con una reducción de las habilidades cognitivas y prácticas generales. Las competencias amplias y flexibles adquiridas en la infancia son reemplazadas gradualmente por una experiencia refinada y específica de cada ámbito. Por lo tanto,

la reconversión profesional se hace cada vez más costosa e improbable con el paso del tiempo. En ambos niveles, la simplificación surge como resultado directo de la optimización local bajo restricciones informacionales y energéticas (Dane, 2010; Phan & Ngu, 2021).

### 3.3 Irreversibilidad por Pérdida de Autonomía Funcional

A medida que avanza la simplificación, los componentes del sistema se vuelven estructuralmente dependientes (inseparabilidad) de otros para funciones que ya no realizan. Una vez que se establece esta interdependencia, la reversión a un estado generalista anterior se vuelve altamente improbable sin que ocurra un colapso sistémico. En los organismos multicelulares, esto explica por qué la vida multicelular compleja no puede volver a una organización unicelular viable: la pérdida de funciones metabólicas, reproductivas y regulatorias autónomas de cada célula impide la desagregación funcional y determina la dependencia del sistema. Y por el paralelismo entre ontogenia y filogenia (Bergman, Bakarić, & Brčić-Kostić, 2026), un organismo multicelular adulto no regresará a su etapa de cigoto pluripotencial.

De modo similar, las sociedades humanas altamente especializadas no pueden retornar a configuraciones generalistas sin reducciones drásticas en productividad, coordinación y estabilidad. Por lo tanto, la irreversibilidad debe entenderse como un resultado intrínseco de la simplificación funcional y la interdependencia en la TEMI, más que como una consecuencia histórica contingente (Doulcier et al., 2024).

En entornos competitivos, los sistemas que alcanzan mayor eficiencia gracias a la especialización obtienen ventajas decisivas sobre aquellos que permanecen en estados generalistas. Aunque la competencia no genera directamente la especialización, favorece selectivamente a los sistemas donde ésta ya ha surgido, acelerando su expansión, persistencia y dominio. De este modo, la competencia grupal refuerza la irreversibilidad de las transiciones basadas en la especialización y contribuye a su consolidación evolutiva (Rainey, 2023).

### 3.4 La Comunicación como Requisito Estructural para la Especialización

La especialización funcional requiere inherentemente una infraestructura de comunicación eficaz. Sin mecanismos de comunicación adecuados, la especialización conduciría a la fragmentación y al colapso funcional, ya que los componentes especializados dependen de señales externas para una actividad coordinada en todo el sistema. Desde una perspectiva evolutiva, la comunicación no es solo la transferencia de información, sino cualquier mecanismo mediante el cual los estados internos de un componente influyen en otro. En este sentido, los sistemas de comunicación no surgen de manera fortuita, sino como necesidades organizativas. Es decir, una vez que la división del trabajo genera interdependencia entre los componentes del sistema, el intercambio de información y la coordinación se vuelven estructuralmente necesarios para la funcionalidad

colectiva (Maynard Smith & Szathmáry, 1995; Krakauer, Bertschinger, Olbrich, Ay, & Flack, 2021). Además, las mejoras en la comunicación pueden facilitar el crecimiento poblacional al reducir los costes de coordinación y permitir la cooperación e integración en escalas espaciales más amplias (Herrera-Paz, 2015).

### 3.5 Sistemas de Comunicación y Transporte en Contextos Biológicos y Socioculturales

En los sistemas biológicos, la comunicación química es uno de los mecanismos de coordinación más antiguos y universales. Puede darse mediante contacto directo (señalización yuxtacrina) o a distancia (señalización paracrina, endocrina, sináptica, o por medio de exosomas). Estos mecanismos permiten que las células especializadas intercambien información sobre estados fisiológicos y coordinen funciones que las células individuales ya no pueden realizar de forma autónoma. Esta evolución de los sistemas de señalización química no solo mejora la coordinación funcional, sino que también posibilita una mayor integración y complejidad (Herrera-Paz, 2015; Lim & Mayer, 2020). En los sistemas especializados, la comunicación y el transporte de sustancias están estrechamente ligados. El movimiento de nutrientes, metabolitos y moléculas señalizadoras actúa como una extensión física de la comunicación, asegurando que los componentes especializados reciban los recursos y señales de los que dependen.

En los organismos multicelulares, la evolución de redes de transporte —como los sistemas circulatorios— es inseparable de la especialización tisular y el crecimiento. A medida que los organismos multicelulares se hacen más grandes y especializados, las células individuales pierden la capacidad de obtener directamente todos los recursos que necesitan, de eliminar los productos tóxicos de su metabolismo y de comunicarse con componentes distantes solo mediante difusión. En lugar de ello, estas células dependen cada vez más de los mecanismos sistémicos de transporte del organismo para recibir nutrientes esenciales, eliminar desechos metabólicos y comunicarse con otras células distantes. Este cambio marca una transición crítica en la que las funciones autónomas son reemplazadas por procesos interdependientes, reforzando la necesidad de un transporte coordinado de sustancias a lo largo del organismo. La interdependencia refuerza aún más la irreversibilidad y la naturaleza integrada del organismo (West et al., 1997; Banavar et al., 1999).

En las sociedades humanas, la división del trabajo y la especialización ocupacional dependen de forma similar de sistemas robustos de comunicación y transporte. Las tecnologías de la comunicación que utilizan el lenguaje, la escritura o las imágenes, como los servicios postales, la comunicación electromagnética y las tecnologías digitales, permiten un intercambio preciso de información entre individuos especializados y no especializados. Por otro lado, las redes de transporte facilitan el movimiento de bienes, energía, información y personas. Históricamente, la expansión de estas infraestructuras —desde carreteras y puentes hasta ferrocarriles y redes digitales— ha sido un factor clave en el crecimiento de las sociedades complejas.

Estos sistemas reducen los costos de coordinación, posibilitan una especialización más fina, facilitan las relaciones entre individuos distantes permitiendo el crecimiento, y mejoran la productividad colectiva (Herrera-Paz, 2015; Turchin, 2016).

### 3.6 Retroalimentación Positiva entre Comunicación/Transporte y Crecimiento

Las mejoras en la comunicación y el transporte generan un bucle de retroalimentación positiva con el crecimiento del sistema. A medida que estas infraestructuras se vuelven más eficientes, favorecen una mayor especialización e interdependencia, lo que a su vez incrementa la eficiencia energética y la productividad global, fomentando así un crecimiento adicional. De este modo, las TEMI fraternas no son únicamente saltos discretos de complejidad, sino procesos direccionales difícilmente reversibles. Además, la TEMI podrían formar parte de una tendencia universal de la materia a evolucionar hacia niveles de complejidad progresivamente mayores (Herrera-Paz, 2022).

## 4 Discusión

Como una aproximación analítica inicial, el modelo puede expresarse de manera heurística mediante relaciones funcionales entre sus variables principales como muestra la Figura 1.

Por ejemplo, la carga informacional total del sistema  $I$  puede considerarse una función creciente y no lineal del tamaño del sistema  $N$  y de la densidad de interacciones  $D$ :

$$I \sim N^\alpha D^\beta, \quad \alpha, \beta > 1 \quad (1)$$

Lo que refleja el incremento supralineal de las demandas de coordinación a medida que el sistema crece. La especialización funcional  $S$ , por su parte, puede operacionalizarse como el número efectivo de tipos funcionales diferenciados dentro del sistema. En organismos multicelulares, esto corresponde al número de tipos celulares; en sistemas socioculturales, al número de ocupaciones, profesiones u oficios. De manera más general,  $S$  puede aproximarse mediante métricas de diversidad funcional, como el índice de Shannon (Shannon, 1948), aplicado a la distribución de funciones:

$$S \approx - \sum_{i=1}^k p_i \log p_i \quad (2)$$

donde  $p_i$  representa la proporción de componentes que desempeñan la función  $i$  y  $k$  el número total de funciones diferenciadas. Bajo esta definición, la especialización emerge como una respuesta a la sobrecarga informacional cuando la carga promedio por componente supera un umbral crítico  $I_c$ :

$$S \propto \max\left(0, \frac{I}{N} - I_c\right) \quad (3)$$

De este modo, el aumento en  $S$  refleja una redistribución del procesamiento informacional entre componentes diferenciados.

Finalmente, la eficiencia energética efectiva del sistema  $E_{\text{eff}}$  puede conceptualizarse como una función creciente de

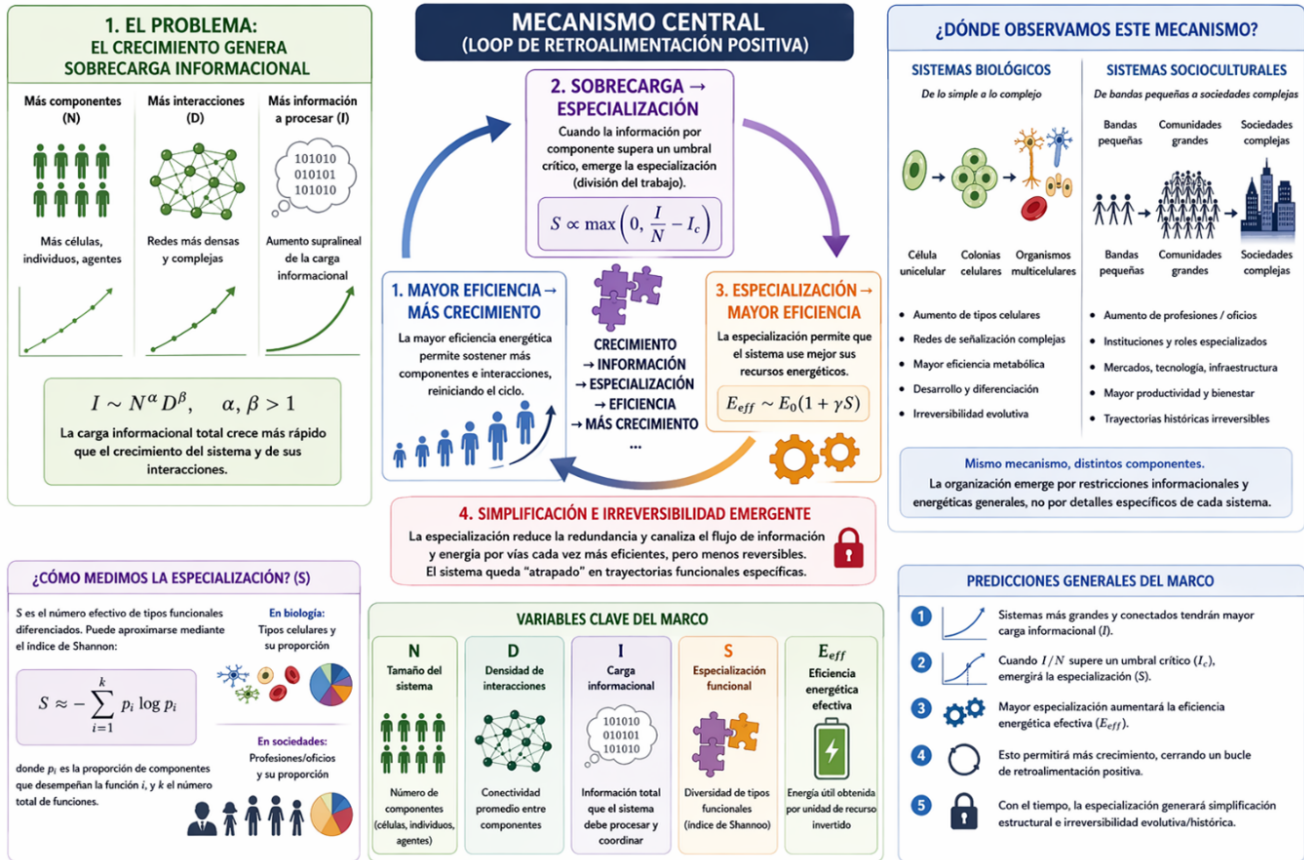


Figura 1 Interacciones entre variables durante una TEMI fraterna

la especialización, lo que introduciría un bucle de retroalimentación positiva entre crecimiento, información y organización:

$$E_{eff} \sim E_0(1 + \gamma S) \quad (4)$$

Donde  $E_0$  es la eficiencia sin especialización, y  $\gamma$  un coeficiente de mejora. Las posibles interacciones entre estas variables, *i.e.*, crecimiento poblacional, contenido informacional y eficiencia energética, en ciclos de retroalimentación positiva durante una TEMI fraterna como se muestra en la figura 1.

4.1 Conclusión

En esta revisión, y siguiendo enfoques recientes, se ha delineado un marco mecanicista para explicar las transiciones evolutivas mayores en individualidad (TEMI) de tipo fraterno, haciendo hincapié en las restricciones organizativas por encima de los mecanismos específicos de cada nivel de complejidad, ya sea biológico o sociocultural. Al centrarse en propiedades observables a nivel de sistema — crecimiento, uso de energía, tamaño del contenido informativo, especialización, simplificación y comunicación— el marco ofrece una visión unificada de la direccionalidad, irreversibilidad y ventajas competitivas que caracterizan a las transiciones evolutivas fraternas.

Desde esta perspectiva, la aparición de nuevos niveles organizativos y el inicio de la irreversibilidad no deben entenderse solo como productos de casualidades históricas. Más bien, surgen como consecuencias previsibles de la es-

pecialización bajo condiciones de crecimiento sostenido, aumento de disponibilidad energética y crecientes demandas informacionales en ambientes de competencia entre grupos. A medida que los sistemas aumentan en tamaño y densidad de interacción, la especialización se convierte en una respuesta estructural necesaria, reforzando progresivamente la interdependencia, la integración funcional y la estabilización de organizaciones de nivel superior.

Aplicando este marco mecanicista a la evolución de las poblaciones humanas modernas, se puede anticipar que la aparición de nuevas tecnologías en ámbitos clave como la adquisición de energía, el procesamiento de la información y los sistemas de comunicación y transporte, tendrán un impacto profundo en la dinámica colectiva de la sociedad futura. El desarrollo de tecnologías avanzadas promete potenciar notablemente la integración y coordinación de los componentes sociales. Entre las innovaciones con potencial disruptivo se encuentran la fusión nuclear para la obtención de energía; la inteligencia artificial y la computación cuántica para el procesamiento de datos; los avances en telecomunicaciones, y la posibilidad de realizar viajes interplanetarios. Estos progresos tecnológicos intensificarán la interdependencia entre los diferentes sectores y actores sociales, permitiendo la emergencia de nuevas formas de funcionamiento colectivo a gran escala. Como resultado, las sociedades humanas podrían evolucionar hacia estructuras cada vez más integradas semejantes a superorganismos, de ámbito regional, global o incluso planetario.

Es importante señalar que el desarrollo de estas capa-

ciudades tecnológicas no implica una trayectoria evolutiva inevitable ni predeterminada. Sin embargo, sí resulta coherente con los patrones organizativos observados en las transiciones fraternas biológicas. En estas, la mejora en los mecanismos de comunicación, la optimización del intercambio de recursos y la coordinación efectiva permitieron la aparición de organismos multicelulares de progresiva mayor complejidad.

La naturaleza explícitamente mecanicista del modelo constituye tanto su principal fortaleza como una limitación importante. Al abstraer los detalles genéticos, de desarrollo y culturales, el marco permite comparar directamente sistemas que de otro modo serían dispares, resaltando presiones organizativas recurrentes que trascienden sustratos particulares. Al mismo tiempo, este nivel de abstracción simplifica necesariamente la diversidad histórica, ecológica e institucional de cada transición individual y no pretende predecir las vías concretas mediante las cuales se realiza la especialización en cada caso. Tampoco pretende negar la posibilidad de reversiones parciales o resultados alternativos bajo condiciones excepcionales.

En consecuencia, este marco debe entenderse como complementario a los enfoques específicos de cada nivel. Su principal aportación consiste en generar hipótesis mecanicistas sobre por qué la especialización, la simplificación y la irreversibilidad emergen de manera recurrente en las TEMI fraternas, a partir de restricciones organizativas generales más que de mecanismos particulares. En este sentido, su objetivo primario no es ofrecer descripciones causales exhaustivas para sistemas concretos, sino identificar relaciones estructurales susceptibles de formalización y contraste empírico.

Estas expresiones presentadas en este trabajo no pretenden constituir un modelo predictivo completo, sino ilustrar cómo los componentes del marco pueden traducirse en variables cuantificables, comparables y potencialmente integrables en modelos formales tanto en sistemas biológicos como socioculturales.

El trabajo futuro debería avanzar en esta dirección mediante la integración de análisis empíricos comparativos con modelos computacionales y basados en agentes que incorporen explícitamente estos parámetros y sus interacciones. Dichos modelos deberán incluir el efecto de los bucles de retroalimentación positiva, así como la cuantificación rigurosa y estandarizada de variables como el número de componentes, el contenido informacional, el consumo energético, el grado de especialización funcional y la evolución de infraestructuras. Esto permitirá derivar relaciones más precisas y potencialmente generalizables, con el fin de evaluar de manera sistemática la generalidad, los límites y el poder predictivo del mecanismo organizativo propuesto.

## 5 Financiamiento

No aplicable.

## 6 Reconocimientos

Reconocimientos: El autor agradece al Dr. Y. Carmel, del Technion Israel Institute of Technology, por su amable invitación al seminario Batsheba De Rothschild

“Evolución socio-tecnológica de la especie humana: ¿está la humanidad atravesando una transición evolutiva?” (<https://ste2019.net.technion.ac.il/program/>), celebrado en Safed, Israel, 2019, cuyas charlas inspiraron este trabajo.

## 7 Conflictos de Interés

El autor declara no tener conflictos de interés financieros, institucionales ni personales que pudieran influir en los resultados o en la interpretación de esta investigación.

## Referencias

- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2015). *Molecular biology of the cell* (6th ed.). Garland Science. Retrieved from <https://www.routledge.com/Molecular-Biology-of-the-Cell/Alberts-Johnson-Lewis-Morgan-Raff-Roberts-Walter/p/book/9780815344322>
- Banavar, J. R., Maritan, A., & Rinaldo, A. (1999). Size and form in efficient transportation networks. *Nature*, 399(6732), 130-132. doi: 10.1038/20488
- Barbieri, M. (2017). *Code biology: A new science of life*. Springer. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14569-3> doi: 10.1007/978-3-319-14569-3
- Bell, C. C., Faulkner, G. J., & Gilan, O. (2024). Chromatin-based memory as a self-stabilizing influence on cell identity. *Genome Biology*, 25, 320. doi: 10.1186/s13059-024-03461-x
- Bergman, J., Bakarić, R., & Brčić-Kostić, K. (2026). Measures of gene indispensability reveal the parallelism between phylogeny and ontogeny. *BioSystems*, 105710. doi: 10.1016/j.biosystems.2026.105710
- Bettencourt, L. M. A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C., & West, G. B. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(17), 7301-7306. doi: 10.1073/pnas.0610172104
- Bettencourt, L. M. A., Yang, V. C., Lobo, J., et al. (2020). The interpretation of urban scaling analysis in time. *Journal of the Royal Society Interface*, 17(163), 20190846. doi: 10.1098/rsif.2019.0846
- Bourrat, P., Doucier, G., Rose, C. J., et al. (2022). Trade-off breaking as a model of evolutionary transitions in individuality. *eLife*, 11, e67777. doi: 10.7554/eLife.67777
- Bourrat, P., Takacs, P., Doucier, G., et al. (2024). Individuality through ecology: Rethinking the evolution of complex life from an externalist perspective. *Ecology and Evolution*, 14(12), e70661. doi: 10.1002/ece3.70661
- Boyd, R., & Richerson, P. J. (1985). *Culture and the evolutionary process*. University of Chicago Press. Retrieved from <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/C/bo5961633.html>
- Carmel, Y. (2020). Operationalizing evolutionary transitions in individuality. *Proceedings of the Royal*

- Society B: Biological Sciences*, 287(1920), 20192805. doi: 10.1098/rspb.2019.2805
- Carmel, Y., & Shavit, A. (2023). Human societal development: Is it an evolutionary transition in individuality? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1872), 20210409. doi: 10.1098/rstb.2021.0409
- Clarke, A. (2025). The contribution of metabolic theory to ecology: Constraints on biological rates, population dynamics, and ecological patterns. *Ecological Monographs*, 95(1), e70030. doi: 10.1002/ecm.70030
- Dane, E. (2010). Reconsidering the trade-off between expertise and flexibility: A cognitive entrenchment perspective. *Academy of Management Review*, 35(4), 579-603. doi: 10.5465/amr.35.4.zok579
- Davidson, E. H. (2006). *The regulatory genome: Gene regulatory networks in development and evolution*. Academic Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02299-8> doi: 10.1016/C2009-0-02299-8
- DeLong, J. P., & Burger, O. (2015). Socio-economic instability and the scaling of energy use with population size. *PLoS ONE*, 10(6), e0130547. doi: 10.1371/journal.pone.0130547
- Di Felice, G., Prokopenko, M., & Lizier, J. T. (2025). The value of information in multi-scale feedback systems. *Entropy*, 27(5), 456. doi: 10.3390/e27050456
- Doulcier, G., Takács, P., Hammerschmidt, K., et al. (2024). Stability of ecologically scaffolded traits during evolutionary transitions in individuality. *Nature Communications*, 15, 6566. doi: 10.1038/s41467-024-50625-1
- Herrera-Paz, E. F. (2015). *Evolution to complexity: From unanimated matter to the universal superorganism*. Createspace. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/283463710\\_Evolution\\_to\\_complexity\\_From\\_unanimated\\_matter\\_to\\_the\\_superorganism](https://www.researchgate.net/publication/283463710_Evolution_to_complexity_From_unanimated_matter_to_the_superorganism)
- Herrera-Paz, E. F. (2018). Adn, disco duro de la vida. *Revista Médica Hondureña*, 86(1-2), 77-85. Retrieved from <https://camjol.info/index.php/RMH/article/view/12169>
- Herrera-Paz, E. F. (2021). *Simplification as a mechanism that drives evolution to biological and socio-cultural complexity*. ResearchGate preprint. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/354742297> doi: 10.13140/RG.2.2.29279.12969/2
- Herrera-Paz, E. F. (2022). *A universal trend: Non-living, biological, and sociocultural/technological transitions in evolution towards complexity*. Retrieved from <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19212.80003/2> doi: 10.13140/RG.2.2.19212.80003/2
- Herrera-Paz, E. F. (2025). Is humanity undergoing a transition to reproductive specialization? insights on the evolution of modern societies to superorganisms. *Revista Médica del Hospital General de México*, 88, 88-95. doi: 10.24875/HGMX.24000001
- Hodgson, G. M. (1998). The approach of institutional economics. *Journal of Economic Literature*, 36(1), 166-192. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/2564954> doi: 10.2307/2564954
- Jablonka, E., & Lamb, M. J. (2005). *Evolution in four dimensions: Genetic, epigenetic, behavioral, and symbolic variation in the history of life*. MIT Press. Retrieved from <https://mitpress.mit.edu/9780262600699/evolution-in-four-dimensions/>
- Jang, H., Acerbi, A., Enquist, M., & Ghirlanda, S. (2025). Transmission networks of long-term and short-term knowledge. *PNAS Nexus*, 4(9), pgaf258. doi: 10.1093/pnasnexus/pgaf258
- Kirby, S., Tamariz, M., Cornish, H., & Smith, K. (2023). Compression and communication in the cultural evolution of language. *Cognition*, 231, 105322. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2022.105322> doi: 10.1016/j.cognition.2022.105322
- Krakauer, D. C., Bertschinger, N., Olbrich, E., Ay, N., & Flack, J. C. (2021). The information theory of individuality. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 15, 653651. doi: 10.3389/fnsys.2021.653651
- Lane, N. (2022). *Transformer: The deep chemistry of life and death*. W. W. Norton & Company. Retrieved from <https://wnorton.com/books/9780393651485>
- Levine, M., & Tjian, R. (2003). Transcription regulation and animal diversity. *Nature*, 424(6945), 147-151. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/nature01763> doi: 10.1038/nature01763
- Lian, Y., & Xie, M. (2024). The evolution of digital cultural heritage research: Identifying key trends, hotspots, and challenges through bibliometric analysis. *Sustainability*, 16(16), 7125. doi: 10.3390/su16167125
- Lim, W. A., & Mayer, B. (2020). *Cell signaling: Principles and mechanisms* (2nd ed.). CRC Press/Taylor & Francis. Retrieved from <https://www.routledge.com/Cell-Signaling-Principles-and-Mechanisms/Lim-Mayer/p/book/9780815342441>
- Liu, S., Abdellaoui, A., van Wingen, G. A., & Verweij, K. J. H. (2024). The relation between cortical gene expression and the neural correlates of risky behavior. *Nature Mental Health*, 2(10), 1183-1195. doi: 10.1038/s44220-024-00311-4
- Lizier, J. T., Prokopenko, M., & Zomaya, A. Y. (2008). Local information transfer as a spatiotemporal filter for complex systems. *Chaos*, 18(3), 037109. doi: 10.1063/1.2953658
- Maynard Smith, J., & Szathmáry, E. (1995). *The major transitions in evolution*. Oxford University Press. Retrieved from <https://global.oup.com/academic/product/the-major-transitions-in-evolution-9780198502616>
- McGill, E., Er, V., Penney, T., Egan, M., et al. (2021). Evaluation of public health interventions from a complex systems perspective: A research methods review. *Social Science & Medicine*, 272, 113697. doi: 10.1016/

- j.socscimed.2021.113697
- Mesoudi, A. (2024). *Cultural evolution as a framework for information transmission*. Open Encyclopedia of Cognitive Science. doi: 10.31234/osf.io/7r2m4
- Milo, R., & Phillips, R. (2021). *Cell biology by the numbers* (2nd ed.). Garland Science. Retrieved from <https://www.routledge.com/Cell-Biology-by-the-Numbers/Milo-Phillips/p/book/9780367332402>
- Missinato, M. A., Murphy, S., Lynott, M., et al. (2023). Conserved transcription factors promote cell fate stability and restrict reprogramming potential in differentiated cells. *Nature Communications*, 14(1), 1709. doi: 10.1038/s41467-023-37256-8
- Moris, N., Pina, C., & Arias, A. M. (2016). Transition states and cell fate decisions in epigenetic landscapes. *Nature Reviews Genetics*, 17(11), 693–703. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/nrg.2016.98> doi: 10.1038/nrg.2016.98
- Nowak, M. A. (2006). Five rules for the evolution of cooperation. *Science*, 314(5805), 1560-1563. doi: 10.1126/science.1133755
- Nowak, M. A., Tarnita, C. E., & Wilson, E. O. (2010). The evolution of eusociality. *Nature*, 466(7310), 1057-1062. doi: 10.1038/nature09205
- Okasha, S. (2006). *Evolution and the levels of selection*. Oxford University Press. Retrieved from <https://global.oup.com/academic/product/evolution-and-the-levels-of-selection-9780199267972>
- Pattee, H. H. (2012). Laws and constraints, symbols and languages. In H. H. Pattee (Ed.), *Laws, language and life: Howard pattee's classic papers on the physics of symbols with contemporary commentaries* (pp. 101–113). Dordrecht: Springer. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5161-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5161-3_7) doi: 10.1007/978-94-007-5161-3\_7
- Phan, H. P., & Ngu, B. H. (2021). A case for cognitive entrenchment: To achieve optimal best, taking into account the importance of perceived optimal efficiency and cognitive load imposition. *Frontiers in Psychology*, 12, 662898. doi: 10.3389/fpsyg.2021.662898
- Plantin, J.-C., Lagoze, C., Edwards, P. N., & Sandvig, C. (2018). Infrastructure studies meet platform studies in the age of Google and Facebook. *New Media & Society*, 20(1), 293–310. Retrieved from <https://doi.org/10.1177/1461444816661553> doi: 10.1177/1461444816661553
- Powell, W. W. (2000). The capitalist firm in the twenty-first century: Emerging patterns in western enterprise. In W. W. Powell (Ed.), *The twenty-first-century firm* (p. 33-68). Oxford University Press. Retrieved from <https://global.oup.com/academic/product/the-twenty-first-century-firm-9780199248339>
- Rainey, P. B. (2023). Major evolutionary transitions in individuality between humans and ai. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1872), 20210408. doi: 10.1098/rstb.2021.0408
- Rock, K. D., Gershenson, C., & Fernández, N. (2025). Quantifying the configurational complexity of biological systems. *Journal of the Royal Society Interface*, 22, 20240558. doi: 10.1098/rsif.2024.0558
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
- Szathmáry, E. (2015). Toward major evolutionary transitions theory 2.0. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(33), 10104-10111. doi: 10.1073/pnas.1421398112
- Szathmáry, E., & Maynard Smith, J. (1997). From replicators to reproducers: The first major transitions leading to life. *Journal of Theoretical Biology*, 187(4), 555-571. doi: 10.1006/jtbi.1997.0421
- Turchin, P. (2016). *Ultrasociety: How 10,000 years of war made humans the greatest cooperators on earth*. Beresta Books. Retrieved from <https://www.amazon.com/Ultrasociety-Years-Humans-Greatest-Cooperators/dp/0996139511>
- Varley, T. F. (2025). Information theory for complex systems scientists: What, why, and how. *Physics Reports*, 1148, 1-55. doi: 10.1016/j.physrep.2025.09.007
- Wagner, A. (2014a). *Arrival of the fittest: Solving evolution's greatest puzzle*. Penguin Random House. Retrieved from <https://www.penguinrandomhouse.com/books/315187/arrival-of-the-fittest-by-andreas-wagner/>
- Wagner, A. (2014b). *Robustness and evolvability in living systems*. Princeton University Press. Retrieved from <https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691134017/robustness-and-evolvability-in-living-systems>
- West, G. B., Brown, J. H., & Enquist, B. J. (1997). A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 276(5309), 122-126. doi: 10.1126/science.276.5309.122
- White, C. R., & Seymour, R. S. (2005). Allometric scaling of mammalian metabolism. *Journal of Experimental Biology*, 208(9), 1611-1619. doi: 10.1242/jeb.01501