

SISTEMAS COMPLEJOS

COMPLEX SYSTEMS

Yadira Rangel

Laboratorio de Biología de Vectores. Instituto de Zoología Tropical. Facultad de Ciencias,
Universidad Central de Venezuela, Apartado 47058, Caracas 1041-A, Venezuela . E-mail:
yrangel@strix.ciens.ucv.ve

RESUMEN

La complejidad de la biología es contrastada con la simplicidad de las leyes de la física. Los organismos ocupan una parte singular de los objetos físicos porque son interna y funcionalmente heterogéneos. Mas aún son sistemas complejos porque son descritos por una alta estructuración con variación (muchas partes cada una formada por variaciones del mismo código genético). La unidad metodológica del método científico ha estado exitosamente basada en argumentos contenidos en una ontología fisicalista o vía teoría reduccionista. La biología moderna ha tenido un gran progreso por el uso de nuevas áreas y herramientas. Es necesario el desarrollo y discusión de una metodología científica y un marco conceptual (manipular variables emergentes de una escala de multi-niveles) que puedan facilitar el entendimiento de los sistemas complejos.

ABSTRACT

The complexity of the biology is contrasted with the simplicity of the laws of physics. Organisms occupy a special part of the space of physical objects because they are internally and functionally heterogeneous. Furthermore, they are complex systems that can be described by a higher structure with variations (many parts each formed by variations of the same genetic code). The methodological unity of a scientific method has successful been basing on arguments within a physicalist ontology or via theory reduction. Modern biology has progressed largely by the use of new domains and tools. It is necessary the development of a scientific methodology and conceptual framework (manipulate emergence variable from multi-level views) that can facilitate the understanding of complex systems.

Palabras clave: Complejidad, estructura, variación, reduccionismo.

Keywords: complexity, structure, variation, reductionism

INTRODUCCIÓN

La admiración de los biólogos hacia la física está sustentada en la simplicidad de sus leyes y por el inmenso éxito que ha tenido en manipular y predecir el comportamiento del mundo inanimado. Tiene un número pequeño de leyes básicas que gobiernan un gran número de fenómenos que se cumplen universalmente, la mecánica de Newton, relatividad de Einstein, la teoría termodinámica, electromagnética y la mecánica cuántica. Son máquinas Cartesianas, mecanismos de relojería que pueden ser entendidos identificando las articulaciones en el tiempo y en los niveles claramente reconocibles de sus partes. Todo es relativamente simple, claro y expresable en términos de la otra

gran ciencia exacta, la matemática, ya sea por ecuaciones diferenciales parciales o diferenciales ordinarias. Pero, si las leyes son tan simples ¿por qué el mundo vivo se nos asemeja tan complicado?

Los organismos no son una violación de las leyes fisicoquímicas. pero ocupan un lugar especial en las propiedades espaciales de los objetos físicos; son heterogéneos internamente y funcionalmente. Están compuestos por distintos subsistemas (organelos, células, tejidos, etc) y referenciados a distintos niveles (individuo, población, comunidad) con algunos componentes (moléculas en células) presentes en un número tan reducido que sus reacciones no pueden ser estadísticamente descritas. Lo que es cierto para un organismo en un momento no

es cierto para el mismo o para cualquier otro en otro momento y circunstancia. A su vez, los organismos son ubicables a varios niveles, individuo, población, comunidad, generando diferente organización y variables emergentes en cada nivel.

Los organismos son complejos también, porque representan una estructura jerárquica con variación constituida por un gran número de partes o elementos activos, cada una formada por variaciones del mismo código genético. Pero también los organismos, ya sean animales o vegetales muestran regularidad estructural y complejidad en homologías y analogías que se repiten en la escala evolutiva. En consecuencia tenemos un sistema vivo dentro de vida a distintos niveles y formado por un gran número de elementos que están sujetos a una incertidumbre estocástica.

El mundo físico y el mundo vivo contienen muchos ejemplos de sistemas complejos pero podemos resaltar de cada uno, sistemas extensamente estudiados por su impacto global. Uno de los modelos más interesantes en el campo de la física es el estudio del caos y como ejemplo, el sistema natural clima. El caos, definido como sistema de "inestabilidad dinámica" o de "sensibilidad a condiciones iniciales", había sido considerado como una singularidad matemática hasta que el meteorólogo Edward Lorenz en 1963, lo usa para predecir con mayor precisión el clima en un modelo de corrientes atmosféricas. El clima puede ser representado por un sistema caótico lo que simplemente significa, que para hacer predicciones a largo plazo con un grado de precisión, deben hacerse un infinito número de medidas. Pero también, el clima es un sistema complejo estocásticamente predecible porque tiene estructura y contiene regularidad: el invierno sigue al verano, la estación de lluvia sigue a la estación seca. Uno de los tópicos actuales más interesantes es determinar si el modelo caótico puede realmente producir estructuras ordenadas y patrones a gran escala. De cualquier forma, la presencia del sistema caótico en la naturaleza parece haber colocado un límite a la habilidad de aplicar leyes físicas determinísticas para predecir movimientos con algún grado de precisión.

En el campo de la biología, la malaria es una de las enfermedades infecciosas más importantes, cau-

sada por la superposición de un parásito protozoario del género *Plasmodium*, un mosquito vector del género *Anopheles* y el género humano. Aproximadamente 300-500 millones de personas son infectadas anualmente y 1.5-2.7 millones de vidas se pierden, incidiendo principalmente en la población infantil de África. La variabilidad existente en cada elemento del sistema ha respondido exitosamente con el desarrollo de resistencia del parásito a las drogas, resistencia del mosquito a los insecticidas y por ende al agudizamiento y resurgencia de la enfermedad en muchas partes del mundo. Como se puede observar, cada elemento del sistema es altamente organizado, distintivo de excepcional complejidad y donde evidenciamos el mecanismo evolutivo darwiniano sustentado en una variabilidad dentro que se transforma en una variación entre (parásito, mosquito, humano), basada en un mismo código genético y contrastada con el carácter emergente de funcionamiento cohesivo, resultado de un proceso co-interactivo de multi-especies.

La ciencia consiste de una gran abundancia de disciplinas que son elementos del conocimiento global del mundo natural pero muchas veces tengo la impresión que mientras más especialización tenemos, más conocemos y menos sabemos lograr enfoques efectivos. Esa fue mi inquietud para mi disertación sobre sistemas complejos, enfermedades y genética de poblaciones en el marco de las jornadas de homenaje a mi mentor y de muchos, Prof. Jesús Alberto León y sigue siendo mi motivación en la preparación del manuscrito para la publicación, unos meses después. En mi opinión los científicos dentro de su gran esfuerzo de trabajo en esquema de grano fino tienen la intuición de ser parte de un todo, pero existe dificultad en hacer una relación precisa para la apreciación del proceso como un todo y el punto es que debe buscarse patrones en las propiedades que se manifiestan para lograr una cierta estructura. La integración en biología conduce a la realización de estudios conceptuales, técnicos de propiedades o características emergentes (validez de las propiedades y del concepto) y a estudios coherentes teórico-experimentales de frontera en inter-áreas de la ciencia. También conlleva un aspecto importante de relación entre ciencia y filosofía donde los científicos ya no deben escapar a ser confrontados a problemas conceptuales porque ahora tienen

problemas básicos que no pueden ser resueltos dentro de las estructuras y suposiciones de un paradigma específico.

Estudio del Sistema

Una innovación importante en el campo de la física ha sido la idea que las leyes del universo material serían mejor entendidas si las propiedades físicas eran expresadas como medidas cuantificables, en términos numéricos y por ende sus leyes fueron expresadas en ecuaciones matemáticas. Las teorías en física son poderosas porque implícitamente contienen una definición de las condiciones de validez, por ejemplo en el caso de la mecánica "newtoniana" es completamente claro que los modelos se aplican a objetos que están caracterizados por las variables masa, ubicación espacial y velocidad. En el sistema clima las variables comunes a ser medidas pueden ser (existen otras), composición de la atmósfera y proporción, temperatura, humedad relativa, presión, velocidad de vientos, densidad, etc., con el cumplimiento de las leyes de termodinámica, mecánica de fluidos y la ley de gases ideales.

Existe una realidad histórica y hay consenso actual entre filósofos e historiadores de la ciencia que la física entendida como un sistema axiomático de teorías se ha constituido como el prototipo de ciencia en los círculos filosóficos y científicos (Emmech, 2001). Mayr (1982, 1988) expresaba que filósofos desde Bacon y Descartes a Locke y Kant señalaron a la ciencia física y en particular la mecánica como el paradigma de la ciencia. La existencia de procesos químicos en los organismos, el desarrollo de la teorías Darwiniana y Mendeliana, el avance tecnológico de la bioquímica, biología celular, deshojaron exitosamente las capas apuntalando el punto de vista reduccionista y la mecanización de la biología (Lewontin, 2000). La frase de Dobzhansky (1974), lo expresa claramente, *la mayoría de los biólogos son reduccionistas en la medida que vemos la vida como un patrón de procesos químicos y físicos poco probables pero muy especiales y complejos.*

La biología moderna es el resultado de una batalla entre dos corrientes extremas ontológicas y epistemológicas. Un extremo toma como modelo la

física con su extraordinario éxito en manejar, predecir el comportamiento del mundo inanimado y realiza el estudio bajo el dominio de leyes físicas universales. Un enfoque reduccionista extremo considera el siguiente argumento, si los organismos no desobedecen las leyes fisicoquímicas y son el resultado de una colección autónoma de elementos genéticos entonces las partes del organismo son definidas por el ensamblaje autónomo de sus genes. Basada en el argumento de Lewontin (2001), es hacer suposiciones para extrapolar el término cuasi-independencia del mundo físico (interacción efectiva de las fuerzas dentro pero independencia operacional entre los sub-conjuntos) a los subconjuntos de caracteres naturales que constituyen a los seres vivos. En el otro extremo el holismo, representa el todo conectado a un todo, no hay independencia y la delineación de caracteres o elementos es necesariamente arbitraria y finalmente destructiva de la verdad. Rippel (2000), señala que el fundamento atomístico es incompatible con la noción de una fuerte integración funcional y desarrollativa del organismo como un todo y confronta problemas para la explicación del origen evolutivo y modificación de los sistemas complejos.

La biología teórica conceptual desarrollada entre 1900-1950 y el uso del lenguaje matemático ha tenido un gran rol para visualizar, explicar y predecir ese mundo vivo complejo y evasivo. Algunas áreas de la biología organísmica y de sistemas están entre lo más sofisticado matemáticamente de la biología (teoría de juegos, bio-historia de vidas, genética de poblaciones y genética cuantitativa) ya sea con el estudio de variables puntuales de un organismo ante una variedad de condiciones como el estudio de variables emergentes en un sistema (teoría de sistemas). La sofisticación del lenguaje matemático también condujo a una acentuación de la brecha entre biólogos teóricos y empiristas que muchas veces se reflejó en una indefinición rigurosa (lo que no es típico en física) entre lo que es la propiedad del objeto biológico y su representación en el elemento del modelo. En los últimos años esa brecha se ha ido reduciendo pero sigue siendo necesario establecer relaciones equivalentes entre las operaciones matemáticas de la teoría con los procesos naturales que describen (Houle, 2001; Wagner & Laubichler, 2001) y más innovaciones conceptuales en la biología teórica (Laubichler, 2001).

Nadie niega que el reduccionismo metodológico ha tenido éxito y que el método es inmensamente poderoso en reconstruir historias y procesos individuales pero la misma metodología también ha enseñado que un todo es más que sus partes sin caer en argumentos de un factor "místico", "vitalista" o de "fuerza vital". Como ejemplo, el proyecto Genoma Humano ha señalado que aproximadamente 30.000 genes codifican a proteínas (Roest Crolius et al. 2000; International Human Genome sequencing Consortium 2001; Venter et al. 2001) y el 99% son compartidos con el ratón (Mattick & Gagen 2001). La pregunta que surge es ¿Por qué somos distintos? Probablemente ni un holismo ni un reduccionismo radical definirán totalmente la estructura actual de causales y efectos en el mundo vivo. Sin embargo, hay un amplio reconocimiento que la percepción científica es una función del método usado y la presencia de puritanos de cada fe han ayudado al avance del conocimiento, pero también han producido diferencias sustanciales conceptuales que han obstruido el intercambio de ideas entre ambos extremos (Lewontin, 2001, Fristrup, 2001).

¿Por qué somos distintos a un ratón?

Si el 99% de los elementos de ambos organismos son comunes, ¿Cómo el 1% produce un todo distinto? En ningún momento, dicho hallazgo está señalando que el método reduccionista no sirve, sino que posiblemente lo que no funciona es la idea de subconjuntos cuasi-independientes (extraída equivocadamente de la física) en los seres vivos y deben buscarse otros enfoques alternativos. La fortaleza en la unidad de un argumento ontológico fisicalista o de un argumento epistemológico vía teoría reduccionista no está en el éxito sino en la capacidad de la metodología para detectar las fallas. El método es útil y eficiente porque permite llegar al nivel apropiado de descripción y de análisis pero el punto es no convertirlo en una normativa a priori. La idea a puntualizar es que la integración y coherencia de los resultados generados por la ultra-especialización en las áreas de investigación en biología (biología molecular, fisiología, ecología, modelos de biología teórica, etc.), en áreas frontera integradas a otras ciencias (geología, biofísica, bioingeniería, inteligencia artificial, etc.) y en la filosofía, formen parte de una estructura coherente y hallen un conjunto de principios generales para

entender y abordar un sistema complejo.

La física tiene una definición muy clara de sus conceptos y de sus fronteras y por ello su avance en el conocimiento es más rápido ante la presencia de novedosas áreas de estudio: el caos, la mecánica cuántica etc. En biología, los cambios de enfoque son más lentos porque los argumentos están llenos de sutilezas y pueden ser fácilmente mal entendidos. Retomando el caso de la malaria, hay una larga tradición de un gran esfuerzo por parte de científicos e instituciones en el trabajo de ese sistema complejo y en el logro de una vacuna, pero la incidencia de la enfermedad sigue aumentando. En la última década, la mayor inversión de dinero ha ido al recurso tecnológico que va de un extremo reduccionista con la ultra-especialización molecular hasta el otro extremo, reunir las capas de resultados (los elementos) en un Sistema de Información Geográfica quedando el intermedio, la búsqueda del enlace entre ambos como una gran brecha. Reunir el 99% común entre el ratón y el humano no nos va decir mucho del por qué son distintos. Por lo tanto que el estudio de ambos extremos, genotipo-fenotipo ha sido importante pero llenar la brecha también es necesario.

La exploración de las vías / rutas de conexión genotipo y fenotipo en condiciones espacio-temporales es importante porque son las unidades que cambian durante la evolución y la caracterización de esa comunicación puede ser usada para entender la inmensa complejidad y diversidad. Los biólogos pueden hacer ejercicios inter-disciplinarios, explotar nuevos enfoques para realizar estudios del producto histórico de la interacción genética y oportunidad ambiental (Eldredge 1999). Los enfoques conectivos han explorado diversas visiones, diferencias en el control de la arquitectura genética, mecanística o pleiotrópica (Cheverud, 2000; Pigliucci, 2000; Mattick & Gagen 2001), integración de desarrollos jerárquicos (Rieppel 2000), replicación y desarrollo de caracteres (Roth 2001), rasgos bio-históricos (Houle, 2001; Wagner & Laubichler, 2001), unidades funcionales (Schwenk, 2001), estructura matemática y embrionaria de módulos (Kim & Kim, 2001; Gilbert & Bolker, 2001). Lo que siempre debe quedar claro en nuestra mente es que en el conocimiento de cualquier proceso debemos ser muy cautos y rigurosos en racionalizar

la diferencia entre una imposición de una división arbitraria y la "caracterización real" (Lewontin, 2001).

La visión integracionista o de frontera o un nuevo nivel de reduccionismo plantea líneas de investigación inter que permitan probar, producir, conceptualizar una relación lógica entre teorías a todos los niveles de análisis. Esto ha provocado diversidad de opiniones que van desde un apoyo con alguna advertencia de peligroso regreso a un holismo obscurantista (Lewontin, 2001), a radicalizaciones del reduccionismo (Rosenberg, 2001) o a ataques desde la filosofía de la ciencia (Sokal & Briemont, 1998), advirtiendo que esa multi-visión produce un relativismo subjetivo, pseudo-análisis vagos y el uso inadecuado de la terminología científica. Sin embargo, filósofos modernos de la talla de L. Wittgenstein y A.N. Whitehead expresan que el riesgo se puede tomar, "hay motivación coherente para usar un estilo preciso y restringido de relativismo en una metodología científica madura que este mas allá de una visión realista e ingenua de la física tradicional".

La ciencia contemporánea confronta un reto ontológico y epistemológico donde la búsqueda por el conocimiento puede plantear la adecuación de

esquemas conceptuales básicos, interpretación del lenguaje teórico o eventualmente modificar y / o ampliar el lenguaje simplemente porque "la naturaleza puede producir estructuras complejas aun en situaciones simples y obedecer leyes simples en situaciones complejas" (Goldenfeld & Kadanoff 1999). Manteniendo la tradición histórica de la influencia de la física y su capacidad de darnos lecciones simples retomo una frase de Einstein "lo que queremos es conocer porque la naturaleza es así y no de otra forma" y concluyo como le digo a mis estudiantes de genética de poblaciones "lo importante es saber oírla para interpretarla".

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a Diego Rodríguez por haberme invitado a participar en las Jornadas y en la publicación y a Jesus Alberto León por los años de discusión y formación para que lograra mayor rigurosidad conceptual. Cualquier oscuridad en la exposición de ideas es mi entera responsabilidad. La preparación de este manuscrito fue apoyada por la beca Sabática del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) y por el Instituto Smithsonian, Washington DC, USA.

LITERATURA CITADA

CHEVERUD, J.M.

2001. The genetic architecture of pleiotropic relations and differential epistasis. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 411-433.

DOBZHANSKY, T.

1974. Introductory remarks. En F. Ayala & T. Dobzhansky (Eds.) *Studies in the Philosophy of Biology: Reduction and Related Problems*. California, Berkeley & Los Angeles of California Press.

ELDREDGE, N.

1999. *The Pattern of Evolution*. San Francisco, W.H. Freeman Co..

EMMECHE, C..

2001. Biology and the unity of science. *Nordic Journal of Philosophy*, 2: 153-162.

FRISTRUP, K.M.

2001. A history character concepts in evolutionary biology. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 13-35.

GILBERT, S.F., & J.A. BOLKE

2001. Homologies of process and modular elements of embryonic construction. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 435-454.

GOLDENFELD N., & L.P. KADANOFF

1999. Simple lessons from complexity. *Science*, 284: 87-89.

HOULE, D.

2001. Characters as the unit of evolutionary change. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 109-140.

INTERNATIONAL HUMAN GENOME SEQUENCING CONSORTIUM.

2001. Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature*, 409: 860-921.

KIM, J., & M. KIM

2001. The mathematical structure of characters and modularity. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, San Diego, pp. 215-236.

- LEWONTIN, R.C.
2001. Foreword. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press.
- MATTICK, J.S & M.J. GAGEN
2001. The evolution of controlled multitasked gene networks: The role of introns and other noncoding RNAs in the development of complex organisms. *Molecular Biology and Evolution*, 18:1611-1630.
- MAYR, E.
1982. *The Growth of Biological Thought*. Cambridge, Harvard University Press.
1988. *Towards a New Philosophy of Biology: Observations of an Evolutionists*. Cambridge, Belknap Press.
- PIGLIUCCI, M.
2001. Characters and environment. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 363-388.
- RIEPEL, O.
2001. Preformationist and epigenetic biases in the history of the morphological character concept. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 57-75.
- ROEST CROLLIUS, H., H.J. JAILLON, A. BERNOT, ET AL. (12 COAUTHORS).
2000. Estimate of human gene number provided by genome-wide analysis using *Tetradon nigroviridis* DNA sequence. *Nat. Genet.* 25:293-302.
- ROSSENBERG, A.
2001. The character concept: adaptationalism to molecular developments. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 199-214.
- ROTH, L.V.
2001. Character replication. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 81-107.
- SCHWENK, K.
2001. Functional units and their evolution. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 165-198.
- SOKAL, A., & J. BRIEMONT
1998. *Intellectual Impostures*. Picador, USA, St. Martin Press.
- VENTER, J.C., M.D. ADAMS, E.C. MYERS, ET AL. (274 CO-AUTHORS).
2001. The sequence of the human genome. *Science*, 291:1304-1351.
- WAGNER, G.P., AND M.D. LAUBICHLER
2001. Character identification: The role of the organism. En G.P. Wagner (Ed.) *The Character Concept in Evolutionary Biology*. San Diego, Academic Press, pp. 141-163.