

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XIX JORNADAS

VOLUMEN 15 (2009)

Diego Letzen  
Penélope Lodeyro

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



# Análisis de las posibles relaciones entre complejidad, sistemas complejos y medición

Mariana Cruz\* y Gabriel Infante-López† ‡

## 1. Complejidad y medición

En *El problema de una teoría general de la complejidad* (2007), Maldonado plantea que hay dos problemas fundamentales en el estudio de la complejidad: "a) el problema de la medición de la complejidad y b) la elaboración de una teoría general de la complejidad" (Maldonado, 2007, 103), asimismo sostiene que el problema de la medición tiene tres aspectos. El primero de ellos es la posibilidad de medición de cada sistema complejo, el segundo la medición de diversos sistemas complejos y, el tercero, la posibilidad de la coexistencia de medidas entre las dos primeras opciones.

Ahora bien, tras exponer un panteón general de los diferentes aportes acerca de las posiciones sobre la medición y la complejidad, Maldonado sostiene que "Cabe conjeturar que la formulación de una teoría general de la complejidad no es indiferente a la determinación de una medición de la complejidad" (2007, 105-6). Frente a esta perspectiva, sin embargo, Rolando García considera que no es posible obtener una tal teoría, sobre la que el propio Maldonado mantiene ciertos resguardos teóricos. Más aun, desde su perspectiva y práctica de investigación más directamente relacionada con la ecología y las ciencias sociales, García considera que el mayor servicio que pueden ofrecer las "estimaciones cuantitativas" es el de un "valor indicativo del comportamiento de un sector bajo condiciones especificadas" (García, 2006: 135) lo cual no tiene el valor de una medida del sistema porque no puede, según él lo entiende, darse cuenta de esta manera, del componente diacrónico y sincrónico necesario para el análisis general de un sistema complejo, puesto que los resultados cuantitativos capaces de modelar procesos parciales, "sólo son significativos, cuando se los interpreta dentro del contexto del análisis sistémico global, que es de carácter necesariamente cualitativo" (*Ídem*).

Vemos entonces, dos perspectivas en principio antagónicas, al menos disidentes, en cuanto al proyecto y las posibilidades de medir sistemas complejos. En el presente trabajo, sin embargo, nos detenemos en la cuestión de la medición independientemente, podríamos decir, del establecimiento de una tal teoría general y de las discusiones en torno a su posibilidad y deseabilidad. Creemos que es posible e interesante intentar avanzar en la caracterización del alcance y los límites para una medición de los sistemas complejos, aun cuando no quizá de la complejidad como un todo.

Para ilustrar esta cuestión nos valemos de *Avida* (Adami, 1998), una plataforma de simulación de vida artificial: exponemos cómo, distintas nociones de complejidad que se han definido sobre individuos y entorno de *Avida*, pueden expresarse por medio de distintas modelizaciones

---

\* UNC - CONICET

† UNC - CONICET

‡ El presente trabajo se enmarca en el proyecto Naturalismo y teleología. Análisis transdisciplinar de las relaciones entre perspectivas biológicas evolutivas y concepciones teleológico-naturalistas de lo mental, subsidiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba.

matemáticas y algorítmicas relacionadas con la teoría de la información. Las distintas métricas se nombran brevemente y ahondamos en una de ellas: la *complejidad física*. Todas estas nociones intentan atrapar conceptos intuitivos de complejidad en individuos, entornos y evolución. Argumentamos que las distintas medidas de complejidad permiten caracterizar distintas intuiciones sobre individuos complejos que evolucionan en un medio particular. Queremos mostrar además que el significado del término complejo depende del área específica donde se intenta capturar, lo que hace difícil concebir una noción de complejidad global que atrape todos los posibles significados de la palabra.

## 2. nociones de complejidad

El término *complejidad*, cuando se usa en el contexto de la biología evolutiva y cuando se refiere a la complejidad de un individuo, puede ser entendido de varias maneras. Cuando se piensa en complejidad de animales, se piensa generalmente en complejidad *estructural*, aunque esta parece la medida de complejidad más difícil de definir (McShea, 1996). Otra noción de complejidad es la *funcional*, esta puede ser entendida como la capacidad del individuo para operar exitosamente en el ambiente en el que se desenvuelve. Otro concepto, el de complejidad *secuencial* se focaliza en las propiedades del programa subyacente que controla al individuo, lo que da cuenta de la complejidad del organismo y no del ambiente en el que se desenvuelve. Si fuera posible formalizar matemáticamente estas nociones, esperaríamos, como indica Maldonado, encontrar relaciones entre ellas. En general, suele suceder que las nociones matemáticas de complejidad que se definen no suelen ser satisfactorias desde un punto de vista intuitivo. Por ejemplo, una de las medidas que más frecuentemente se ha sugerido como medida de complejidad secuencial es la basada en complejidad de Kolmogorov.

En teoría de la información algorítmica, la complejidad de Kolmogorov es una medida de las necesidades computacionales que se precisan para especificar el objeto, entendido éste como una secuencia de caracteres o un pedazo de texto. Formalmente, la complejidad de una secuencia de símbolos es la longitud de la descripción más corta de ella. Esta noción depende del lenguaje descriptivo que se utilice, se puede demostrar que la complejidad de Kolmogorov para cualquier secuencia de símbolos no puede ser mayor que la longitud de la secuencia misma. Las secuencias de caracteres cuyas complejidades de Kolmogorov son relativamente más cortas que la longitud misma de la secuencias de caracteres no son consideradas complejas.

La medida de complejidad de Kolmogorov puede ser utilizada para describir la complejidad del código de los individuos en Ávida, pero esta medida resulta ser una medida de la regularidad del programa, pero no de la complejidad del individuo. Esto implica que un individuo generado al azar tiene, de acuerdo a la complejidad de Kolmogorov, máxima complejidad, en contraposición a lo que interpretaría un biólogo de un individuo aleatorio.

Por otro lado, Adami *et al.*, (2000) define la noción de complejidad *física*, que parece corresponderse exactamente con lo que los biólogos suponen que se incrementa cuando se incrementa la complejidad de seres vivos. La complejidad física se aplica a secuencias simbólicas que describen y operan en un medio ambiente. Esta se define desde un punto de vista teórico, guarda una estrecha relación con la teoría de la información y a su vez resulta muy intuitiva: se puede entender como la cantidad de información almacenada en una secuencia

acerca de un ambiente en particular. Para genomas que evolucionan, su complejidad física está dada por la cantidad de información que almacenan sobre el ambiente en el cual evolucionan.

La existencia de una medida de complejidad tiene su uso e impacto en investigación. Calcular la complejidad física de seres vivos es, cuanto menos, dificultoso debido a la gran cantidad de variables a tener en cuenta, variables que pertenecen tanto al ambiente como al individuo. Sin embargo, existen plataformas de simulación de vida artificial en donde la medida de complejidad física se puede aproximar y este cálculo permite obtener conjeturas interesantes. Un ejemplo de estas plataformas es Avida (Adami, 1998). Esta plataforma virtual y la noción de medición de complejidad resultan de interés puesto que en Avida se propone explícitamente estudiar la biología evolutiva, la noción de evolución, de adaptación, de auto-replicación y auto-organización, pero principalmente de complejización sobre la base de condiciones aleatorias y ambientales, que en gran medida (como intentaremos mostrar), sirven específicamente para el estudio de la noción de complejidad de Maldonado, puesto que, como se ha mencionado en el trabajo anteriormente expuesto (*Evolucionismos y teoría de la Complejidad*), para ese autor, la noción de complejidad y de sistemas complejos no lineales se define y caracteriza por el aporte de la teoría evolutiva (si bien en este punto surgiría la cuestión a analizar de si en ambos casos, Avida y Maldonado, se manejan nociones acordes de evolución).

Argumentamos, que aún con una definición específica de complejidad, las consecuencias que se pueden derivar de su uso dependen de su definición (en contexto) y reemplazar las implicancias con el término "complejidad", descontextualizado de su definición específica, constituye por lo menos una trampa.

### **3. Avida: Una Plataforma Experimental para Evolución**

Avida es una plataforma de software diseñada para estudiar el surgimiento de configuraciones complejas desde una perspectiva teórica darwiniana. Mediante el uso de organismos digitales (programas de computadoras) que se auto-repican y que "evolucionan", entendiendo que se da una evolución siempre que, como sostuvo Daniel Dennett, se dan conjuntamente "reproducción, variación (mutación), y *fitness* diferencial (competencia)" (Dennett, 2002 en Lensky *et al.*, 2003). Así, Avida está provista de diferentes elementos que le permiten funcionar como un escenario evolutivo, del cual realizaremos una síntesis, centrándonos en los aspectos más relevantes para comprender la noción de medición y complejidad que allí se ejemplifica.

En Avida cada organismo digital, cada individuo, vive en su lugar protegido de memoria, y se ejecuta en su propia unidad de procesamiento virtual. Otros organismos no pueden acceder a leer o a escribir espacios de memoria que no sean propios, asimismo, tampoco pueden ejecutar código que no esté en su propio espacio de memoria. Las distintas unidades de procesamiento de cada uno de los distintos organismos pueden correr a distintas velocidades, por ejemplo, un organismo puede ejecutar el doble de instrucciones que otro en la misma cantidad de tiempo.

La velocidad a la que una unidad de procesamiento se ejecuta se determina por varios aspectos, pero más importante, por las tareas que el organismo es capaz de ejecutar. Las tareas son computaciones lógicas que los organismos pueden realizar para obtener mayores velocidades de tiempo de procesamiento como bono. La idea principal es la siguiente: si se quiere una población de organismos que sean capaces de evolucionar la capacidad de sumar dos números, entonces se monitorea la entrada y la salida de los organismos y si algún organismo es alguna vez capaz de

sumar dos números recibirá ciclos extra de CPU. Si ocurre que los ciclos de CPU extras que recibe un organismo son más que los que demora en hacer la computación, tendrá a su disposición ciclos extras que podrán ser aplicados a su propia reproducción.

En Avida, cada organismo digital es una unidad auto-contenida de computación que tiene la habilidad de construir otra unidad. El organismo es responsable de construir el genoma (o programa de computación) que controlará a su descendiente y de entregar el nuevo individuo al mundo de Avida. Éste construirá entonces el hardware virtual para el nuevo genoma donde éste será ejecutado y determinará también cómo deberá ser integrado en la población este nuevo organismo (hay diferentes mecanismos específicos que controlan estas acciones y que son introducidos por parámetros del usuario).

Un elemento importante para la evaluación de la computabilidad de los individuos, tiene que ver con que estos son básicamente una secuencia de instrucciones en un lenguaje estilo *assembler*<sup>4</sup>, con pocas instrucciones y con una sintaxis clara diseñada de tal manera que ninguna combinación de instrucciones produce un programa sintácticamente incorrecto. Dicho código se ejecuta en máquinas virtuales proporcionadas por Ávida. La arquitectura de estas máquinas virtuales están basadas en una máquina simple von Neumann<sup>2</sup> y las instrucciones no pueden ser cualquiera; por ejemplo, la operación de *Split* se puede aplicar sólo en algunas condiciones (Lensky, 2003), así, si la longitud del individuo que la ejecuta es demasiado corta, entonces la operación es ignorada por la máquina virtual. A pesar de esto, el programa que la contiene sigue siendo sintácticamente correcto, pero la semántica de la instrucción depende de la longitud del programa.

Los programas *deciden* la manera de copiarse y el momento en que entregan el individuo a Avida. Los programas mutan sus instrucciones en el genoma de dos maneras posibles: a través de errores introducidos al copiar o por una distribución de probabilidad externa al individuo y controlada por Avida que cambia instrucciones aleatoriamente. Avida es un universo de  $N$  posiciones o celdas y cada celda puede ser ocupada por un solo organismo, por lo cual la máxima cantidad de organismos que pueden habitar en Avida es de  $N$  individuos y sus ubicaciones pueden estar ordenadas de distintas maneras (Lensky et al., 2003). Cuando un nuevo organismo nace reemplaza otra célula de su vecindario, mediante diferentes métodos. Los dos más comunes son: (a) el reemplazo aleatorio de un individuo del vecindario y (b) la selección por la edad, por el cual se reemplaza al individuo más antiguo del vecindario o se coloca preferentemente en alguna celda que todavía no esté ocupada.

Cada uno de estos organismos se ejecuta en su propio procesador virtual, cada individuo tiene asociado un *mérito*. Un mérito es un valor sin unidad, que sólo tiene significado cuando se la compara con los de otros individuos. Si un organismo  $A$  tiene el doble de mérito que un organismo  $B$ , entonces  $A$  debe ejecutarse el doble de instrucciones que  $B$  en cualquier ventana de tiempo. Todos los organismos en Ávida son provistos de la habilidad para absorber nuevos recursos (a través de computaciones), lo que les permite mejorar su propio mérito.

Finalmente, un ambiente de Ávida se describe por un conjunto de recursos y un conjunto de reacciones que pueden ser disparadas para interactuar con los recursos. Las reacciones son computaciones que el organismo debe efectuar. Un elemento importante para establecer la comparación con un medio evolutivo natural, en la lógica darwiniana, es que también en Ávida,

los recursos son finitos, hay recursos no-renovables, que dependen de las reacciones que disparen los individuos. La especie con mejor función de adaptación será la más dominante y aquella que mejor función de adaptación posea será eventualmente la que "conquistará" el mundo.

#### **4. Implicancias de una Definición de Complejidad en Ávida**

Para poder hablar de complejidad es preciso adoptar una definición; de otra manera, preguntas como si la evolución darwiniana conlleva un aumento en la complejidad carecen de sentido. La *complejidad física* presentada por Adami (2002) muestra que la selección natural crea información acerca del nicho del individuo y argumenta que se puede demostrar que la complejidad física dentro del nicho debe incrementarse si el ambiente no cambia. En los experimentos el autor muestra que la complejidad física se incrementa si la selección actúa apropiadamente y se disminuye si falla. Evolución apropiada en este contexto significa, justamente evolución que no haga decrecer la función de ajuste de un individuo a su entorno. Aun así, la noción de complejidad no se traduce a una medida de adaptación: un organismo bien adaptado a un nicho simple puede tener menor complejidad que un organismo mal adaptado a un nicho complejo. Adaptación refleja solamente el grado en que la complejidad potencial del nicho es reflejada en la complejidad física del organismo. En "Sequence Complexity in Darwinian Evolution" Adami (2002), argumenta que aún con esta definición específica de complejidad, no es posible comparar la complejidad de individuos que interactúan con ambientes distintos, ya que la definición de complejidad incorpora el ambiente (de manera que coincide, en este punto, con lo sostenido por García que expusimos al comienzo).

Su trabajo deja translucir los problemas que surgen al trabajar con una definición global de complejidad, dada la vaguedad intrínseca del término. El trabajo contiene conclusiones tales como que en una evolución darwiniana, la complejidad de los individuos debe aumentar si el ambiente no cambia. Si en esta misma conclusión se reemplaza el término complejidad por una pequeña descripción de lo que se entiende por complejidad en el contexto donde se realiza el estudio, se obtiene: la información que los individuos guardan acerca del ambiente en el que se desarrollan aumenta con la evolución si el ambiente no cambia. Ambas afirmaciones son equivalentes en el contexto del trabajo, pero las implicancias de la primera son más generales y enmascaran el resultado real de la investigación.

#### **5. Conclusiones**

En relación con lo dicho, parece difícil establecer la posibilidad o imposibilidad de mediciones cuantitativas para sistemas complejos de manera general. Parte del interés de la perspectiva de análisis de la complejidad es el abandono de las pretensiones reduccionistas. Sin embargo, la pretensión de establecer un criterio abarcativo para todo sistema complejo, en relación con la medición, parece un ideal que excede el principio de niveles explicativos independientes, con las propias características emergentes, según los sistemas de que se trate. En algunos casos, ciertos sistemas, comparables con los instanciados en el Avida, parecen poder estudiarse mediante la aplicación de mediciones cuantitativas, y estas mediatamente podrían aplicarse también a entornos evolutivos biológicos. Esto, no obstante, no pone en cuestión que en algunos contextos, como aquellos contextos ecológicos y sociales en los que se desarrollan investigaciones como las

de Rolando García, pensar en la posibilidad de mediciones cuantitativas resulte bastante difícil de sostener.

---

### Notas

<sup>1</sup> (1) Un ensamblador es una aplicación de sistema que se encarga de traducir un fichero fuente escrito en un lenguaje ensamblador, a un fichero objeto que contiene código máquina, ejecutable directamente por la máquina para la que se ha generado.

(2) (En inglés, Assembler, abreviado como ASM). Lenguaje de programación bajo nivel, muy cercano al código máquina. Su sintaxis depende por completo del tipo de ordenador que se esté usando.

<sup>2</sup> Arquitectura que utiliza el mismo dispositivo de almacenamiento para los datos y los programas. Una máquina para que tiene la capacidad de construir otra máquina igual a la máquina creadora; diseñó un autómata celular con esas propiedades.

### Bibliografía

Adami, C. (1998). *Introduction to Artificial Life*. Berlin. Springer-Verlag.

Adami, C. - Cerf, N. J. (2000). "El concepto de complejidad física" en *Physical complexity of symbolic sequences* Physica, D., 137, 62-69.

Adami, C. (2002). "Sequence Complexity in Darwinian Evolution", en *Complexity*. 8 49-56. 2002.

García, R. (2006): *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, Ed. Gedisa, Barcelona.

Lensky, R. E., Ofria, C.; Pennock, R. T.; Adami, C. (2003) "The evolutionary origin of complex features" en *Nature* 423, 139-144 (8 May 2003).

Maldonado, C. E. (2007): *Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicaciones* Universidad Externado de Colombia, Bogotá.