

LA METÁFORA CIBERNÉTICA Y LOS ECOSISTEMAS

MIGUEL ALCÍBAR
Universidad de Sevilla
Facultad de Comunicación
alcibar@supercable.es

INTRODUCCIÓN

Según Poincaré «una ciencia se construye a partir de hechos, lo mismo que una casa se construye a partir de ladrillos. Pero no se puede llamar ciencia a una mera colección de hechos, como no puede llamarse casa a un montón de ladrillos.»¹ Esta instructiva cita del gran filósofo francés, puede ilustrar la importancia que tienen las relaciones entre los elementos para que el sistema (en nuestro ejemplo, la ciencia) del que forman parte mantenga una cierta coherencia.

La tesis general de que los sistemas complejos (por ejemplo, un organismo vivo o un ecosistema) son esencialmente sistemas intactos –y como tales deben ser estudiados–, puede denominarse *holismo*: el todo ostentaría unos rasgos que sólo se conservarían si concebimos el sistema en su totalidad; y desaparecerían al destruir esta integridad. En la versión vulgar de este punto de vista el «todo es más que la simple suma de las partes». Las relaciones entre las partes no pueden expresarse por enumeración o por simple análisis de cada una de ellas, sino que esas relaciones internas son características del sistema como un todo. No olvidemos que la definición clásica de sistema es un conjunto de partes en interacción.

El holismo, no obstante, debe tomarse con grandes reservas cuando se adopta desde la *Teoría General de los Sistemas (TGS)*. La TGS

¹ Citado por Hanson, Norwood Russell: *Patrones de descubrimiento*, Alianza Editorial, Madrid, 1977, p. 112.

presupone que sólo a través del análisis de un sistema en sus componentes, del establecimiento de las interrelaciones entre estos, y del estudio de la estructura de estas interacciones, pueden comprenderse las propiedades y el comportamiento del sistema como totalidad. Esto no deja de ser, pues, una forma de reduccionismo, antagónica a una concepción compleja de la naturaleza (Aracil, 1982; Morin, 1995).

Es evidente, por tanto, que un enfoque exclusivamente reduccionista-especialista no es el más adecuado para discernir las *propiedades emergentes* que caracterizan a los sistemas complejos (Prigogine, 1983). Ante tal postura, a partir de mediados de la década de 1940, han ido surgiendo paradigmas de pensamiento que intentan acceder a problemas otrora insolubles: disciplinas como la cibernética, la teoría de los sistemas *sensu stricto*, la teoría de la información, la teoría de los juegos, la teoría de la organización jerárquica, la teoría de la criticalidad auto-organizada, etc., han aportado importantes generalizaciones y conceptos (Bertalanffy, 1968; Bak & Chen, 1991).

LA CIBERNÉTICA: APROXIMACIÓN AL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS

La cibernética (del griego «kybernetes», gobernante, piloto) tiene su origen en generalizaciones de resultados obtenidos del estudio de máquinas. Su creador, el matemático Norbert Wiener, la definió como la ciencia del control y la comunicación en las máquinas, los seres vivos y las organizaciones sociales. La introducción de la *información* —mediante soportes físicos como la electricidad— en la concepción de las máquinas determina la incorporación en sus estructuras de los mecanismos denominados de *realimentación (feedback)*, que están en la base de la cibernética. El control de la información interna y externa, hace que las máquinas muestren comportamientos *adaptativos* (autorregulación y estabilidad) y, en apariencia, *teleológicos* (búsqueda de un objetivo o meta), sensiblemente diferentes a los comportamientos mecanicistas. En este sentido, los dispositivos cibernéticos proporcionan poderosas metáforas para el estudio de los sistemas complejos (McNaughton & Coughenour, 1981; Aracil, 1982).

Todos los sistemas complejos presentan una característica común: contienen una *red informativa* que conecta entre sí a los distintos elementos que componen el sistema. La acción de un elemento repercute

en todos los demás, como la ausencia de George Bailey (James Stewart) cambia la vida y costumbres de los habitantes de Bedford Falls, en la famosa película de Frank Capra *¡Qué bello es vivir!* A estos sistemas se les llama *cibernéticos (SC)* porque contienen bucles informativos cuya función es controlar o regular el sistema; los SC contrastan con los sistemas *no cibernéticos (SNC)*, en los que su organización carece de enlaces informativos (Engelberg & Boyarsky, 1979).

En resumen, los SC se caracterizan fundamentalmente por presentar redes de información, bucles de realimentación y estabilidad. En cualquier sistema material aparecen interacciones entre sus elementos y mecanismos cibernéticos. El resultado es que estos sistemas acumulan información paulatinamente. Es obvio, por tanto, que los SC son sistemas *autoorganizados*. La información se expresa por un mecanismo, y almacenar información significa incrementar la complejidad del mecanismo (Margalef, 1968, 1974).

Como ya hemos apuntado, la información se incorpora a la estructura del SC mediante circuitos de realimentación. Estos pueden ser de dos clases: (1) *positivos*: mantienen una *dirección* que suele terminar con el colapso del sistema; sin embargo, se pueden concebir sistemas abiertos en los que esta realimentación positiva se desarrolle indefinidamente mientras exista energía disponible para ello. Por ejemplo, el crecimiento poblacional, el proceso evolutivo –y otros sistemas semejantes, representables como series progresivas–, pueden definirse como *sistemas retroactivos positivos*, sólo constreñidos cuando hay un límite de energía disponible necesaria para ese crecimiento, o cuando elementos perturbadores entran en juego, y (2) *negativos*: mantienen un *estado estacionario* u *homeostasis*. En los sistemas con bucles de realimentación negativa la relación causal circular es tal que el sistema se mantiene, a lo largo del tiempo, dentro de ciertos límites permisibles. Así, al realizar una acción global (sucesión de acciones parciales) con el fin de alcanzar un determinado objetivo, el sistema se realimenta continuamente de información sobre los efectos de las acciones previas, de modo que las acciones sucesivas tengan en cuenta los resultados de aquellas acciones pasadas. La realimentación negativa es, por tanto, *realimentación de información* sobre los resultados de las acciones pasadas para decidir, en función de esta información, las acciones futuras (Margalef, 1968; Aracil, 1982).

El control de la concentración de hormonas en el organismo se debe, en la mayoría de los casos, a un mecanismo de realimentación

negativa. En general, si algún factor hormonal alcanza concentraciones excesivas o demasiado bajas, el sistema de control pone en marcha una serie de cambios moleculares que devuelven el factor a un valor medio determinado, conservándose así la homeostasia del organismo. En otras palabras, la respuesta del sistema es negativa porque, al inhibir el aumento o la disminución anormal de la hormona, regula la velocidad de producción hormonal.

Por lo tanto, todos los sistemas de esta clase requieren una entrada de *energía* (para operar) y una de *información* que ha de propagarse muy rápidamente (en función de la cual *actuar*). Es en este sentido y no en otro por lo que son *sistemas abiertos*.

¿SE COMPORTAN LOS ECOSISTEMAS COMO SISTEMAS CIBERNÉTICOS?

Si comparamos los distintos tipos de ecosistemas (selva tropical, desierto, taiga, arrecife de coral, etc...) según un criterio de complejidad, salta a la vista que cuanto más complejo es un ecosistema mayor capacidad de automantenimiento presenta. Esta persistencia en el espacio y en el tiempo, ligada a una eficaz autorregulación, deriva de las interacciones que se establecen entre los distintos compartimentos o subsistemas que forman su estructura interna, tanto en lo que respecta a los intercambios de materia y energía como a los de información (Margalef, 1974, 1985; Odum, 1985).

Son los bucles de realimentación negativa los que proporcionan la estabilidad: cuando el sistema es perturbado, los ciclos de *feedback* reaccionan reduciendo el efecto azaroso de la perturbación; por tanto regulan, lo que se traduce en que ciertas variables del sistema (como por ejemplo, producción, respiración, biomasa, biodiversidad, tamaño poblacional...) tienden a mantenerse constantes (Engelberg & Boyarsky, 1979). Esto significa que la tendencia global del ecosistema es a la *estabilidad*, es decir, a mantener su estructura en *equilibrio dinámico* (*steady state*).

Hace aproximadamente un par de décadas irrumpió en el ámbito científico la polémica sobre la naturaleza cibernética o no cibernética de los ecosistemas. Los defensores de la naturaleza no cibernética argumentan que la tan cacareada capacidad para minimizar las perturbaciones (estabilidad) que evidencian los ecosistemas no es conferida por la red informativa, sino que sólo es el reflejo de las leyes que operan

a nivel fisicoquímico. Aseguran, además, que los ecosistemas carecen de procesos de *amplificación*, es decir que a partir de causas de baja energía no se generan efectos de alta energía; esto es lo mismo que decir que los intercambios de materia y energía portan información inespecífica. Aunque admiten que en el seno de los ecosistemas hay componentes cibernéticos (por ejemplo, la relación entre el depredador y su presa), concluyen que éstos no integran todas las partes de aquéllos en una red informativa (Engelberg & Boyarsky, 1979).

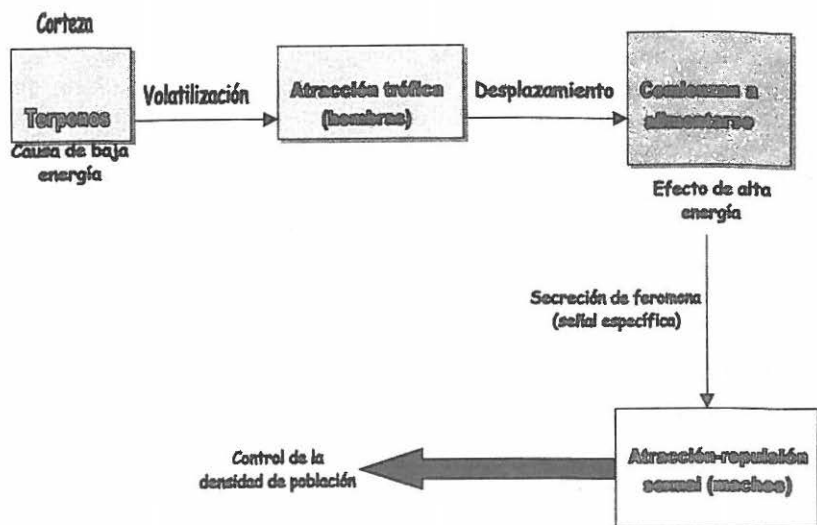
Basándonos en el trabajo de reputados ecólogos (Margalef, 1968; Patten & Odum, 1981; Knight & Swaney, 1980; McNaughton & Coughenour, 1981; Jordan, 1981) vamos a tratar de demostrar que la metáfora cibernética es aplicable a los ecosistemas en su totalidad.

LA INFORMACIÓN, PIEDRA ANGULAR DEL ECOSISTEMA

Las transferencias de materia y energía son en realidad informativas y no meros trasvases sin sentido. La autorregulación del ecosistema es consecuencia de la actividad de una *red primaria* que canaliza los flujos de materia y energía, en la que destacan todos los *procesos tróficos* (producción primaria, descomposición, reciclado de nutrientes, etc...). A esta red primaria se superpone una *red secundaria informativa* que controla estos procesos y representa la **historia natural** del ecosistema (medio físico, señales biológicamente activas como sustancias alelopáticas y feromonas, etc...) (Patten & Odum, 1981).

Las redes informativas presentan dos rasgos distintivos: (1) pueden *mapearse*; dado que la información fluye a través de la red, ésta última puede mapearse (transcribirse) de una entidad física a otra, y (2) determinan que causas de baja energía induzcan efectos de alta energía (amplificación).

El fenómeno de la amplificación puede comprobarse claramente en el siguiente ejemplo de interacción trófica entre una especie de escarabajo (*Dendroctonus brevicomis*) y el pino ponderosa (*Pinus ponderosa*). El pino exuda de su corteza una resina rica en aceites terpenoides que al volatilizarse atrae a las hembras del coleóptero, que comienzan a alimentarse (*atracción trófica*). A partir de sustancias químicas de la corteza del árbol las hembras secretan una feromona que, en función de la densidad de población, actúa como atractiva o repulsiva para los machos (*atracción-repulsión sexual*). Un sencillo esquema puede aclararlo.



Esta interacción constituye un bucle de realimentación negativa. La red de relaciones es informativa porque los cambios que experimenta uno de los elementos (volatilización de terpenos) repercute en todo el conjunto (control de la densidad poblacional). Además, una causa de baja energía produce un efecto de alta energía (amplificación), con lo cual se deduce que existe una óptima regulación de la red. Obviamente, los distintos componentes por separado no son cibernéticos, pero el sistema en su conjunto se comporta como un dispositivo cibernético (McNaughton & Coughenour, 1981). La metáfora cibernética, por tanto, no sólo presenta un evidente valor *didáctico* (alto poder pedagógico) y *heurístico* (alto poder inventivo para resolver problemas), sino que también tiene una función *cognitiva* (alto poder para construir con el lenguaje la realidad estudiada).

En efecto, en el ecosistema pueden encontrarse componentes cibernéticos. Un ejemplo clásico es el sistema binario depredador-presa, que sigue un mecanismo de realimentación negativa puesto que el depredador *controla*, al destruir el excedente de presas, la densidad de población de éstas. Y como consecuencia de ese control, la abundancia de los propios predadores depende, en última instancia, de la abundancia precedente de presas (Engelberg & Boyarsky, 1979; Margalef, 1968).

Queda claro, pues, que en el ecosistema (cuanto más complejo sea más evidente) existen bucles de realimentación que son condición necesaria y suficiente para desencadenar respuestas coevolutivas e interacciones mutualistas (Jordan, 1981).

El modelo cibernético, como remarcaré más adelante, es válido para el ecosistema en su totalidad, ya que si éste incluye componentes, ligados por relaciones tróficas, que son cibernéticos, cualquier red trófica es cibernética. Baste señalar que el compartimento de los descomponedores enlaza informativamente a los demás elementos del ecosistema (McNaughton & Coughenour, 1981; Patten & Odum, 1981).

De todo lo anterior hay que destacar un hecho muy importante: los dos elementos que interactúan en un circuito recurrente presentan *asimetría* entre ellos. ¿Qué significa esto? Sencillamente que uno de los elementos proporciona al sistema un exceso de energía (por ejemplo, la presa) y el otro (el predador) utiliza una pequeña parte de esta energía (el resto se disipa, minimizando la **entropía** del sistema) para mantener un estado interno más estable. Cada interacción representa un nudo de intercambio de energía o un punto de regulación de energía. Cuando la energía pasa por ese punto parte de la información –se espera que sea redundante– se destruye (Margalef, 1968).

Según Margalef (1989) pueden distinguirse dos tipos de asimetría: (a) Una *asimetría termodinámica*, puesto que prácticamente toda la energía fluye a través de la población de predadores, y (b) una *asimetría informacional*, ya que la información es de diferente calidad en la presa y en el predador (en la presa es menor).

Las relaciones asimétricas son consecuencia de las distintas tasas de funcionamiento entre los componentes del ecosistema. De esta forma, el ecosistema se *estructura jerárquicamente* (O'Neill, De Angelis, Waide & Allen, 1986). Este punto es vital para entender cómo funciona el ecosistema y cómo la metáfora cibernética es adecuada para obtener una visión global y unificada del mismo.

En cualquier sistema jerárquico, un nivel superior controla a otro inferior, en sentido exclusivamente unidireccional, mediante transferencias de materia, energía e información. Este control depende directamente de la *tasa de renovación* diferencial de los niveles de la jerarquía. Así, los niveles con tasas de renovación más largas (más organizados y, por tanto, con mayor acumulación informativa) controlan a los que presentan tasas más bajas (menos organizados y con menor *pool*

informativo). En líneas generales la información, entendida como organización y capacidad de control, no aumenta de igual forma en los distintos componentes que interactúan, sino que aumenta más en el que ya tiene más información a expensas del que tiene menos. Se trata del llamado *principio de San Mateo*, metáfora bíblica que designa a todas aquellas relaciones asimétricas en las que interviene la información como moneda de cambio: la información siempre aumentará en el sistema que más información tiene almacenada a expensas del que tiene menos (Margalef, 1968; 1986).

La organización jerárquica del ecosistema es necesaria para que éste se autorregule y emerja la estabilidad, es decir, para que tenga capacidad de restitución tras un impacto negativo (O'Neill et al, 1986).

CONCLUSIONES

Un sistema se concibe compuesto de elementos (subsistemas) y de las interacciones que relacionan los subsistemas entre sí. Suponiendo que las interacciones persistan en el tiempo, el estado futuro del sistema no está completamente indeterminado. La información, concepto clave para entender el comportamiento no azaroso de un sistema, se caracteriza por imponer *restricciones*, que de alguna manera limitan el ámbito dentro del que se sitúan los futuros estados del sistema.

Un sistema que presenta redes informativas (primarias y secundarias) tiende a converger, a cerrarse sobre sí mismo. Los sistemas que no lo hacen, tarde o temprano, se derrumban. Puesto que cada acción depende de la pléyade de interacciones entre los elementos del sistema, las respuestas posibles se reducen y el comportamiento del sistema parece teleológico. En este sentido muy amplio, todo sistema (el ecosistema, incluido) se puede calificar de *cibernético*, si por cibernética entendemos la ciencia del control y la regulación.

La metáfora cibernética, por tanto, es una útil herramienta heurística y cognitiva para dilucidar aspectos ecológicos de gran calado: interacciones tróficas, relaciones mutualistas y simbióticas, procesos coevolutivos, etc..., y, por supuesto, los bucles retroactivos a nivel del ecosistema en su totalidad, responsables de conectar informativamente la red primaria y la red secundaria, para dar lugar a la estructura persistente de éste.

BIBLIOGRAFÍA

- Aracil, J. (1982): *Cibernética y sistemas*, Real Academia de Medicina de Sevilla, Sevilla.
- Bertalanffy, L. V. (1968): *Teoría general de los sistemas*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Engelberg, J., Boyarsky, L. L. (1979): «The noncybernetic nature of ecosystems», *Am. Nat.*, 114: 317-324.
- Jordan, C. F. (1981): «Do ecosystems exist?», *Am. Nat.*, 118: 284-287.
- Knight, R. L., Swaney, D. P. (1981): «In defense of ecosystems», *Am. Nat.*, 117: 991-992.
- Margalef, R. (1968): *Perspectivas en la teoría ecológica*, Editorial Blume, Barcelona.
- Margalef, R. (1974): *Ecología*, Editorial Omega, Barcelona.
- Margalef, R. (1985): *Limnología*, Editorial Omega, Barcelona.
- Margalef, R. (1989): *Reflexiones sobre la diversidad y significado de su expresión cuantitativa*, Simposio sobre la Diversidad Biológica, Madrid.
- McNaughton, S. J., Coughenour, M. B. (1981): «The cybernetic nature of ecosystems», *Am. Nat.*, 117: 985-990.
- Morin, E. (1995): *Introducción al pensamiento complejo*, Gedisa, Barcelona.
- O'Neill, R. V., De Angelis, D. L., Waide, J. B., Allen, T. F. H. (1986): *Hierarchical concept of ecosystems*, Princeton University Press, Princeton.
- Odum, E. P. (1985): *Fundamentos de ecología*, Editorial Interamericana, México.
- Patten, B. C., Odum, E. P. (1981): «The cybernetic nature of ecosystems», *Am. Nat.*, 118: 886-895.
- Prigogine, I. (1983): *¿Tan sólo una ilusión?*, Editorial Tusquets.