



Dificultades para aprender los sistemas complejos

*Una mujer nada en el agua.
Un hombre camina sobre el agua.
Cuál es el milagro?
El primero.*

Jacques Prevert. Traducción libre

Los sistemas biológicos son sistemas complejos. La enseñanza de la biología puede ser un medio eficaz para que los alumnos desarrollen la capacidad de comprender otros sistemas complejos, además de los seres vivos.

La enseñanza de las ciencias requiere tomar en cuenta seis temas: la definición de los conceptos fundamentales (conceptos estructurantes), el análisis de las representaciones sociales de los alumnos, el análisis de sus dificultades para aprender, el análisis de los estilos de aprendizaje de los alumnos, el análisis de los estilos de aprendizaje necesarios o más adecuados a lo que se está enseñando y la definición de los métodos de evaluación más adecuados.

En relación a las dificultades de aprendizaje podemos mencionar las dificultades conceptuales, es decir las que están relacionadas con la ignorancia de conceptos de base para el tema que se enseña, las dificultades relacionadas con el lenguaje, las emocionales o psicológicas (por ejemplo cuando el alumno rechaza el tema que está estudiando o la mala opinión que tiene el alumno sobre su capacidad de aprender) y las dificultades relacionadas con el desarrollo de la lógica.

En el caso del aprendizaje de los sistemas complejos, además de esas dificultades generales, encontramos dificultades particulares. Como los sistemas biológicos son sistemas complejos, esas dificultades tienen mucha importancia para el aprendizaje de la biología.

Algunas de las dificultades para aprender las características de un sistema complejo están en relación con las características de esos sistemas:

Un sistema complejo es un sistema compuesto por muchos componentes que interactúan entre

si. No basta la descripción de los componentes del sistema para explicar sus características. Un sistema complejo tiene propiedades que sus componentes aislados no poseen y que derivan de las interacciones entre ellos. Esto requiere centrar la atención no sólo en los componentes del sistema sino en cómo se relacionan unos con otros, comprender cómo las modificaciones de un componente provocan modificaciones en los demás, cómo las propiedades de cada componente están en parte determinadas por los otros componentes. Para comprender una sociedad, por ejemplo, no basta conocer cuantos individuos hay y cómo son. Es necesario comprender cómo interactúan, es decir qué efecto produce lo que hace uno de ellos sobre los demás. Una de las grandes dificultades para comprender el funcionamiento de un organismo vivo es que no basta conocer las moléculas que lo componen, hay que conocer también cómo interactúan entre ellas, qué efecto produce la modificación de una de ellas sobre las demás y qué resultado da en todo el organismo.

Los componentes de un sistema complejo suelen ser muy diferentes al sistema total. La observación del sistema no suele indicar cómo son los componentes. Esto es particularmente importante cuando los componentes de un sistema son sensiblemente más pequeños que el sistema en sí. Una de las dificultades para aprender la biología está determinada por el hecho que los componentes de un organismo, los átomos y las moléculas, son muy diferentes del organismo. Lo que podemos ver de un organismo -incluso el más pequeño- no nos indica que está compuesto de átomos y de moléculas ni cómo esas moléculas interactúan. Es difícil comprender que un organismo es un sistema químico muy complejo en el que interactúan millones y millones de moléculas.

Pequeños estímulos externos pueden producir grandes cambios en el comportamiento de un sistema complejo. Es difícil predecir el comportamiento de un sistema complejo porque la respuesta a los estímulos no es lineal. Tirarle la cola a un león dormido puede provocar reacciones graves para los que están cerca del león. Un cambio en la concentración de yodo del agua puede provocar grandes cambios en el desarrollo embrionario del axolotle.¹ Un pequeño cambio en la política puede provocar grandes cambios sociales. Poder predecir los cambios en un sistema complejo a partir de pequeños estímulos, es trascendental a todos los niveles de una sociedad. Es importante desarrollar esa capacidad en los alumnos y de esa manera evitar la toma de decisiones apresuradas que pueden tener graves consecuencias en su vida y en sociedad.

Un mismo estímulo puede provocar respuestas muy diferentes en distintos sistemas complejos e incluso en el mismo sistema en diversos momentos. La luz determina la fotosíntesis en un vegetal verde, pero cambios en la duración de la iluminación puede establecer la floración en algunos vegetales. En ciertos animales la duración de la iluminación consigue determinar una respuesta reproductiva, o el comienzo de la migración. La misma política puede producir efectos sociales muy diferentes en diferentes sociedades o en distintos momentos históricos en la misma sociedad. Por ese motivo es muy importante no transferir automáticamente las experiencias en sistema complejo a otro ni repetir siempre la misma estrategia. Un sistema complejo con el que interactuamos debe ser analizado frecuentemente para poder evitar de cometer errores con él. Cada nueva decisión requiere un nuevo análisis.

En un sistema complejo se realizan simultáneamente muchos procesos coordinados. El funcionamiento de un sistema complejo es el resultado de muchos procesos internos entre los que pueden existir sistemas de control. Piense en todos los procesos que se realizan en su organismo mientras lee estas páginas. Es importante desarrollar la capacidad de los alumnos

para comprender la simultaneidad de los procesos en la sociedad o en su propio organismo. Una dificultad proviene de la necesidad de utilizar el lenguaje articulado lineal (una palabra después de la otra) para la descripción de los procesos simultáneos. Una solución puede ser ayudar a los alumnos a desarrollar un estilo de aprendizaje que permita comprender esquemas en los que se presentan redes de procesos. También existen dificultades provenientes de la forma de pensar de los alumnos. Una de las dificultades más frecuentes para comprender los sistemas complejos está relacionada con el *pensamiento lineal* en el que no se pueden comprender redes de procesos. Otra dificultad proviene de la *visión antropomórfica* en la que los procesos de los sistemas complejos son analizados atribuyendo características humanas a ese sistema. Esa visión se relaciona con el *pensamiento mágico*, que atribuye conciencia y sabiduría a objetos inanimados y a seres vivos sin sistema nervioso. La ciencia es contraria a la intuición. La mayoría de los conocimientos científicos no son coherentes con el pensamiento no científico. Por ese motivo la ciencia es difícil de comprender y hace falta “salir” del pensamiento común, ver el mundo de otro modo. Muchas veces los alumnos tienen gran resistencia a salir del pensamiento mágico, que les da una respuesta a fenómenos difíciles de comprender.

Las dimensiones de los componentes de un sistema complejo constituyen otra dificultad de aprendizaje. Con nuestros ojos podemos ver objetos mayores que un milímetro y menores que algunos miles de metros (por ejemplo montañas), podemos comprender fácilmente fenómenos que se realizan en períodos mayores que el segundo y menores que cien años. Tenemos muchas dificultades para comprender fenómenos que se realizan en microsegundos o en millones de años, pensar en términos de amstrongs o micrones o en años luz. También tenemos dificultades para pensar en grandes números.

Es muy difícil imaginarse, por ejemplo, cuantas molécula hay en un vaso de agua. Podemos decir que en 16 gramos de agua destilada hay 6,... por diez a la veintitrés moléculas de agua, es decir 6×10^{23} (si los conté bien hay 23 ceros). ¿Cómo pode-

1. Axolotle: *Ambystoma mexicanum*

mos imaginar la cantidad de moléculas de agua que hay en 35 litros de agua, o la cantidad del agua de un organismo de 50 kilos de peso?

No basta conocer las características de los componentes de un sistema complejo, es necesario comprender sus interacciones y a partir de ellas comprender como aparecen nuevas propiedades que no poseen los elementos. Si nos centramos en los componentes tendremos una *concepción reduccionista*, que trata de explicar, por ejemplo, todos los procesos de un organismo sólo por sus moléculas, o todos los procesos sociales sólo por las características de los individuos. Si centramos en las características del sistema complejo, sin tomar en cuenta sus componentes, desarrollaremos una *visión mágica* en la que las propiedades de ese sistema nacen de algún factor superior, la inteligencia de la naturaleza en el caso de los seres vivos, el espíritu fuera de la materia en el caso de la mente, o las fuerzas de la historia en el caso de la sociedad.

Relacionado con la visión mágica es frecuente la *atribución de conciencia a organismos que no necesitan poseerla para los fenómenos que estamos analizando*². Es fácil pensar que “la planta sabe cuando debe florecer” o que el instinto de un insecto determina el momento de su reproducción. Más difícil es que construir los conocimientos sobre la relación entre fotones, receptores, modificaciones del metabolismo, producción de hormonas, multiplicación celular, diferenciación celular y relojes biológicos que hacen que las plantas de una especie produzcan sus flores simultáneamente o que los machos y hembras de una misma especie se preparen para la reproducción al mismo tiempo.

La enseñanza de la biología puede facilitar el desarrollo de la capacidad para comprender sistemas complejos porque permite analizar concretamente la interacción entre los componentes de un sistema y a partir de ellas el surgimiento de sus propiedades.

2 No podemos decir que un vegetal no posee conciencia, solo podemos decir que la conciencia no es necesaria para explicar ciertos procesos como la fotosíntesis o la floración.

Una de las teorías de la biología que permite comprender la aparición de nuevas propiedades es la teoría de los sistemas jerárquicos de restricciones mutuas y múltiples, elaborado por Howard Pattee en los años 70. Esa teoría intenta explicar la emergencia de un nivel superior de organización, la célula, a partir de las interacciones entre sus componentes, las moléculas.

Las moléculas, y en particular las macromoléculas, pueden asumir diferentes estructuras espaciales. La estructura que asuman va a determinar muchas de sus propiedades. Una enzima, por ejemplo, va a catalizar una reacción química específica sólo si adopta una de sus posibles estructuras espaciales. Si adopta otra de las estructuras posibles no tendrá la capacidad de catalizar esa reacción. El conjunto de moléculas de una célula determina que cada una de ellas adopte una de sus estructuras posibles, es decir el conjunto de moléculas “ejerce una restricción” sobre cada molécula. A su vez cada molécula cuando adopta una estructura particular participa en la restricción a las demás. El conjunto de restricciones mutuas y múltiples determina la emergencia de la célula como un sistema de nivel superior. En este caso podemos mencionar a nivel del desarrollo conceptual un pasaje entre pensar en objetos (las moléculas) a pensar en términos de interacciones entre esos objetos (restricciones a la configuración molecular).

Una actividad posible en clase para facilitar ese proceso de desarrollo conceptual es analizar como el significado de una frase no está determinado sólo las palabras que la componen sino por la restricción que el conjunto de palabras de la frase ejerce sobre cada una de ellas. *Con pocas palabras se pueden construir muchas frases* no significa lo mismo que *con muchas frases se pueden construir pocas palabras*.

Pero una frase no es un organismo vivo. El significado de la frase no existe en el trazo de tinta ni en las imágenes de la pantalla del computador ni en las vibraciones del aire cuando hablamos, el significado de la frase existe en la mente del que la lee. Tenemos la interacción de un sistema complejo, el cerebro, con un elemento externo a él, el trazo de tinta sobre un papel. El cerebro organiza ese trazo en señales a las que atribuye significados, las letras, las

palabras y la frase. Es decir que la “emergencia del significado de la frase a partir de sus palabras” no se realiza en la frase misma sino en nuestro cerebro.

El significado que da un organismo vivo a las transformaciones de sus moléculas lo da el mismo organismo. Analizar este fenómeno en clase puede permitir a los alumnos comenzar a comprender que la interacción entre los componentes de un sistema es el origen de las propiedades de ese sistema, y que no es necesario recurrir a fuerzas extramateriales para explicar la aparición de nuevas propiedades.

Otra teoría de la biología nos muestra que no es necesario ningún tipo de mente externa al sistema para que este sea capaz de dar significado a fenómenos externos y adaptarse a ellos, es la teoría autopoiesis elaborada en los años 70 por Maturana y Varela. Un enunciado del concepto de autopoiesis es:

“Un organismo es una red de reacciones químicas en las que se sintetizan las moléculas que participan en esas reacciones, se determinan las condiciones que permiten la síntesis y se genera la identidad del organismo como un sistema diferente al medio”

Aparece aquí un punto de transformación del pensamiento, el pasaje entre la idea que en un organismo “HAY” un conjunto de reacciones químicas y la idea que el organismo “ES” un conjunto de reacciones químicas. Un ejemplo puede ser pasar de “en una casa hay un conjunto de paredes y un techo” a “una casa es un conjunto de paredes y un techo”. La primera proposición permite pensar que una casa es algo que contiene paredes y techo, mientras que la segunda dice que sólo es paredes y techo. El pasaje de “hay” a “es” indica que no hay nada más que reacciones químicas en la célula, nada de fuerzas extramateriales, ni de energías cósmicas, nada de instintos ni de conciencia. Una célula sólo es un sistema de reacciones químicas. Cualquier reacción de un organismo es un cambio en las reacciones químicas. La percep-

ción de fenómenos externos y su respuesta está basada en cambios en las reacciones químicas.

La autoconstrucción a partir de la nutrición puede ser un tema para tratar en clase la autopoiesis a partir de preguntas simples como: ¿porqué un vegetariano no es verde?

¿qué ocurre con lo que comemos?

Si unimos el concepto de autopoiesis con el de restricciones mutuas y múltiples podemos comprender la cascada de cambios que se producen en un organismo como resultado de pequeños estímulos, que provocan cambios en algunas moléculas, que a su vez modifican las reacciones mutuas y múltiples, producen cambios en otras moléculas, y modifican algunas de las reacciones químicas lo que provoca una síntesis de nuevas moléculas, lo que provoca cambios en el sistema de restricciones entre las moléculas, lo que ... produce al propio organismo y determina su futuro. Tenemos un sistema recursivo en autoconstrucción y mantenimiento de las propias condiciones y de respuesta al medio.

Espero que estas líneas sean un pequeño estímulo que provoque un pequeño cambio en las representaciones sobre los seres vivos, que determinen nuevos problemas, que requieran nuevas respuestas, que modifiquen lo que se piensa y abran la mente para nuevas informaciones, que a su vez provoquen cambios que ...

Sistemas complejos, sistemas recursivos, sistemas autoconstruidos, generación de nuevas propiedades, transformación de fenómenos externos en señales internas, cierre informacional, pueden ser temas de la enseñanza de la biología que permitan desarrollar mejor la capacidad de los alumnos para comprender los múltiples sistemas complejos que lo rodean y aprender a manejarlos mejor.

Prof. Dr. Raúl Gagliardi
Profesor de Didáctica de Ciencias
Universidad de Pavía, Italia
raul.gagliardi@bluwin.ch