

---

## Alan Turing: un pionero de la biología matemática

Anxo Sánchez / Fundación Ramón Areces

*Este año se celebra el centenario del nacimiento de Alan Turing (1912-1954). Turing es famoso por ser un fundador de la informática y por descifrar la máquina Enigma durante la segunda guerra mundial. Bajo el título «El legado de Alan Turing»\*, la Fundación Ramón Areces organizó un simposio científico en el que expertos mundiales debatieron sobre computación, informática, inteligencia artificial, lógica, filosofía, biología y matemáticas, campos en los que Alan Turing fue pionero. Anxo Sánchez, del Grupo Interdisciplinar de Sistemas Complejos (GISC), Departamento de Matemáticas de la Universidad Carlos III de Madrid, describe en este artículo las razones por las que Turing fue, además, un pionero de la biología matemática.*

**E**n uno de sus últimos trabajos, «La base química de la morfogénesis», dedicado al estudio de cómo aparecen estructuras y formas (o «patrones») de manera espontánea en distintos sistemas físicos, químicos y biológicos, Turing se planteó el modelo más sencillo que uno puede pensar: dos sustancias químicas en un es-

---

\* Las conferencias de este simposio están disponibles en: [www.fundacionareces.tv](http://www.fundacionareces.tv)

espacio unidimensional, que reaccionan una con la otra de acuerdo a ciertas funciones y, lo más importante, que se difunden en el espacio, es decir, que si están muy concentradas en un lugar y poco en otro, las diferencias de concentración tienden a desaparecer con el tiempo. Sorprendentemente, Turing descubrió que las ecuaciones que describen este modelo tienen soluciones en las que ambas sustancias están homogéneamente distribuidas en el espacio cuando no consideramos la difusión; sin embargo, esas soluciones se vuelven inestables cuando se incluye la difusión, es decir, si por lo que sea aparecen pequeñas desviaciones de la homogeneidad, estas desviaciones aumentan en lugar de disminuir, dando lugar a la aparición de diversos tipos de patrones. Esto es realmente antiintuitivo porque, como he mencionado antes, la difusión tiende a uniformizarlo todo.

Para entender de qué estamos hablando, centrémonos en un ejemplo concreto, que se debe a James D. Murray. Consideremos que una de esas sustancias es un «activador», es decir, que pone en marcha la acción de algo, y la otra un «inhibidor», que tiene el efecto contrario. Consideremos además que lo que se activa es la generación de melanina, el pigmento de la piel que confiere color oscuro a aquellas zonas donde aparece. Pues bien, partiendo de la idea de Turing, Murray propuso que todos los tipos de patrones que vemos en los pelajes y pieles de los animales se podrían explicar a partir de este modelo sencillo, donde los patrones del activador y del inhibidor darían lugar a los patrones que vemos en los animales. Para ello Murray extendió el estudio de Turing de una a dos dimensiones y mostró que la solución uniforme dejaba su lugar a unos patrones u otros, y que el patrón que aparecía dependía de la forma de la superficie bidimensional considerada, probando dos teoremas:

Teorema 1: Las serpientes siempre tienen patrones de rayas o anillos pero no pueden tenerlos de puntos o manchas (es conse-

cuencia de suponer que la piel de la serpiente es un rectángulo muy estrecho y largo, Figura 1).

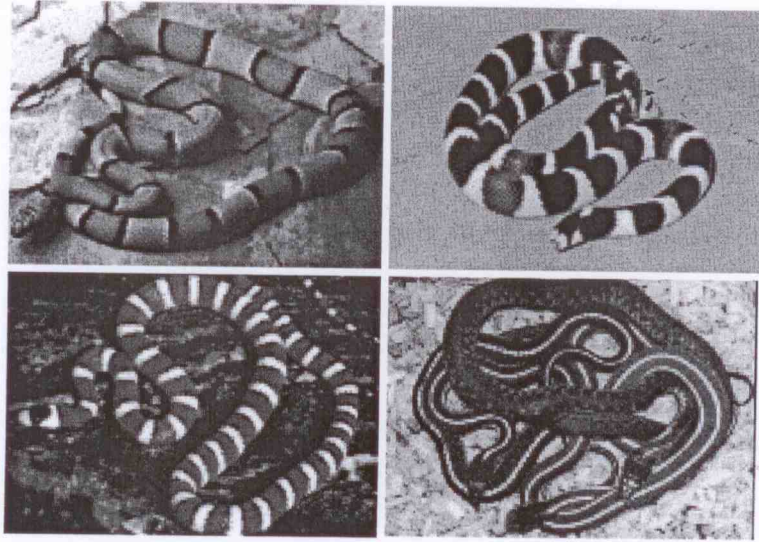


Figura 1. Ejemplos de distintas serpientes mostrando la validez del teorema 1.

Teorema 2: No puede haber animales con el cuerpo a rayas y la cola a manchas, pero sí al revés (en este caso se debe a que el cuerpo es aproximadamente un rectángulo más ancho que la cola, y como el mecanismo que actúa en todo el cuerpo es el mismo, si los parámetros son tales que producen rayas en el cuerpo, que es más ancho, también tienen que dar rayas en la cola, que es más estrecha, Figura 2).

Se puede ver además que el número de rayas de la solución también depende de los parámetros del sistema. Así, la cabra de Valois tiene un tamaño tal que solo hay dos manchas, mientras que los pandas tienen tres (Figura 3). Por otra parte, la aplicabilidad de

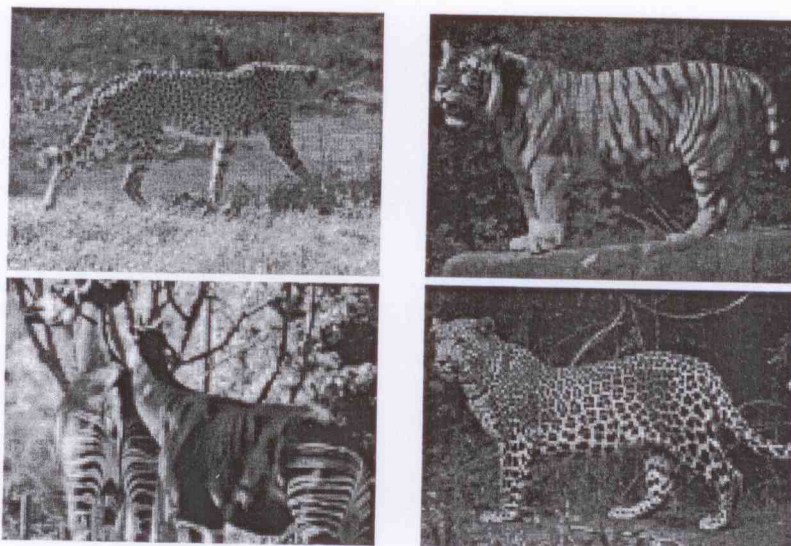


Figura 2. Ejemplos de la aplicación del Teorema 2. En sentido horario empezando por la figura superior izquierda, tenemos al guepardo, al tigre, al leopardo y al okapi.

la teoría, como dije más arriba, es enorme, y como ejemplo la Figura 4 nos muestra otros patrones de Turing que aparecen en animales marinos, tanto crustáceos como peces (donde ya no entra la melanina sino otras sustancias, pero que igualmente encajan en el modelo abstracto de Turing).

Esta descripción de los patrones tiene consecuencias que van mucho más allá del aspecto de los seres vivos, ya que nos obliga a cambiar nuestra forma de ver la actuación de los genes. Antes de Turing, se pensaba que los genes de distintas células daban distintas órdenes, originando así las estructuras que vemos. Esta teoría se enfrenta a un problema muy serio, y es que las células no tienen manera de saber dónde están y por tanto qué deben hacer para formar el patrón. Después de Turing, sabemos que lo que tienen que hacer los genes es ordenar la producción de sustancias activadoras

