

Herramientas para sistemas complejos: autómatas celulares y algoritmos autoorganizativos

Antonio Córdoba

Departamento de Física de la Materia Condensada

Universidad de Sevilla

cordoba@us.es

Los autómatas celulares son sistemas dinámicos discretos en el espacio y en el tiempo, cuyas variables pueden representar un número finito de estados. Son el arquetipo de sistemas discretos; también son unos buenos representantes de los sistemas que evolucionan según reglas; por último, cabe señalar que en ellos se manifiestan plenamente las características propias de los sistemas complejos en los que emergen propiedades colectivas y fenómenos de autoorganización global a partir de interacciones locales muy simples.

Los conceptos que hay que considerar a la hora de definir un autómata celular (AC) son

- El retículo
- Los estados de las celdas
- La vecindad
- La regla local

Hay que considerar también si al hacer evolucionar el sistema la actualización de sus estados se hace de modo determinista o estocástico y de modo síncrono o asíncrono.

El AC más simple es el unidimensional binario. Sin embargo, ya aquí aparecen comportamientos complejos. La evolución temporal de un AC unidimensional se puede representar en un plano tomando el tiempo en el eje vertical. La evolución de un AC bidimensional puede visualizarse como una sucesión de fotogramas similar a un video, lo que en muchos casos, debido a las distribuciones espaciales que presentan, puede resultar muy llamativo.

Los ACs presentan un conjunto reducido de tipos cualitativos de comportamientos, que pueden encajarse en cuatro categorías, llamadas clases de Wolfram:

- Clase I: La evolución del sistema lleva a un estado homogéneo sin estructuras espaciales o temporales de ningún tipo.
- Clase II: La evolución del sistema da lugar a estructuras separadas de tipo estable o periódico.
- Clase III: La evolución genera patrones caóticos.

- Clase IV: La evolución origina estructuras complejas localizadas, que se propagan a través del sistema y cuya duración aumenta exponencialmente con el tamaño del sistema

En este contexto se introducirá el concepto del llamado filo o borde del caos.

Para estimar cual puede ser el tipo de evolución que seguirá un AC se utilizará la distancia de Hamming, por una parte, y el parámetro de Langton, por otra.

Los ACs fueron introducidos por Ulam y Von Neumann como una posible idealización de los sistemas biológicos con capacidad para autorreproducirse. Posteriormente se han utilizado para modelar con éxito muchos sistemas reales. A título de ejemplo, pueden citarse fenómenos de difusión, de reacciones químicas, dinámica de poblaciones, desarrollo urbano, propagación de epidemias, etc. Una ventaja de los ACs es su fácil implementación y el sentido más directo que puede tener un modelado a nivel “microscópico”, lo que puede permitir comprender mejor los mecanismos elementales que determinan el comportamiento de los sistemas. Otra ventaja es que no se desprecia ningún tipo de correlación, a diferencia de lo que ocurre con las ecuaciones macroscópicas. Un inconveniente es que aparece en los resultados un ruido inherente a la estructura discreta, lo que implica que hay que promediar en un rango suficientemente amplio para amortiguarlo. Sin embargo, si las escalas de longitud y los tiempos de observación son mucho más largos que el espaciado del retículo y que el paso de tiempo, se pueden obtener resultados satisfactorios. Obviamente hay problemas que se adaptan mejor que otros a este formalismo. Cuando se originan estructuras espaciales propias del fenómeno que se considera existen técnicas para evitar que la geometría del retículo las desvirtúe o contamine. Se presentarán algunos casos de modelos de sistemas reales.

Otra aplicación de los ACs consiste en utilizar éstos como aproximación a ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, tales como la ecuación de Laplace o ecuaciones de mecánica de fluidos. O hacer aplicaciones basadas en el llamado gas reticular.

Por último cabe citar el uso de los ACs en ciencias de la computación. En este contexto se prestará especial atención al Juego de la Vida de Conway y se describirá cómo un AC puede funcionar como un ordenador y realizar tareas de computación universal.

Los ACs son sistemas complejos donde se manifiestan procesos de autoorganización. En esta parte final, se mencionarán algunos conceptos generales relativos a la autoorganización y se pondrán ejemplos de diferentes sistemas en los que la autoorganización puede llevar a algoritmos útiles para diversas tareas de computación. Algunos de ellos serán desarrollados con más detalle en otras lecciones del curso.

Se dará información sobre diferentes recursos (bibliografía, páginas web, software...) relativos a los temas tratados y a lo largo de la exposición se irán haciendo simulaciones con un programa específico para ir ilustrando algunos de los conceptos y ejemplos a medida que se vayan tratando.