

Carreteritas con autómatas celulares

J. Antonio del Río
Instituto de Energías Renovables, UNAM
Academia de Ciencias de Morelos

y Leonardo M. Castro
Facultad de Ciencias, UNAM

La mayoría de nosotros hemos viajado en automóvil y sufrido un congestionamiento de tránsito. No es agradable estar detenidos, sentados en el carro o en el microbús esperando a que la circulación se agilice; la sensación de pérdida de tiempo es desesperante.

¿Qué hacer hacer ante esos estresantes momentos? ¿Se abordan los problemas del congestionamiento vial desde la ciencia y la tecnología? ¡Por supuesto!

El estudiar y resolver el problema del tránsito vehicular es muy importante porque son pocas las ciudades en el mundo que se crearon hace menos de un siglo, por lo que la mayoría no fueron diseñadas para los flujos y densidades vehiculares actuales. Incluso aquellas que sí lo fueron, como Los Ángeles en Estados Unidos, hoy están totalmente rebasadas y se encuentran entre las más congestionadas del planeta. Los ingenieros y los científicos estudian y analizan la circulación de los automóviles a partir de modelos que simulan las complejas situaciones que se viven cotidianamente.

Las soluciones surgen continuamente, pero antes de implementarlas es preciso probarlas y para ello no hay nada mejor que simularlas en computadoras antes de ponerlas en práctica en el mundo real.

Una de las nuevas formas de modelar el tránsito vehicular es mediante los autómatas celulares. Aunque el nombre suena a algo relacionado con la biología, los autómatas son más bien una herramienta matemática, que no solo es útil y poderosa, sino también inesperadamente divertida, tanto que hasta puede ser vista como un juego. Ya Luis Mochán, en otro artículo publicado en esta sección, usó estas herramientas para simular los límites de velocidad vehicular [1], pero en este texto trataremos de detallar lo que es un autómata celular y cómo se han implementado modelos basados en ellos para simular otras condiciones del tránsito.

Todos hemos jugado *Serpientes y Escaleras*. En este juego, cada jugador tiene una ficha que debe seguir un camino compuesto por una serie de celdas. Cada ficha se mueve de celda en celda, por lo que si un jugador obtiene un seis al tirar un dado, la ficha recorrerá seis celdas. Lo importante aquí es notar que estos pasos que le permiten al jugador -a su ficha- moverse, son de una longitud definida, por lo que no se pueden dar seis pasos para moverse cinco celdas. Un paso equivale a una celda. Algo parecido ocurre con la manera en la que los jugadores tiran los dados. Cada uno tiene un turno y siguen un orden. Gran cantidad de juegos de mesa se basan en tableros con celdas y se juegan por turnos -ajedrez, serpientes y escaleras, damas chinas, etc.- A esta manera de cortar el tiempo y el espacio se le llama *discretizar*. En otras palabras, *discretizar* el espacio significa dividir el tablero en celdas, mientras que *discretizar* el tiempo sería jugar por turnos en lugar de todos a la vez, como en muchos videojuegos, como *Halo* o *FIFA*.

Además de estos elementos, cada juego tiene sus propias reglas y esto es básicamente lo que sucede cuando simulamos la realidad con un autómata celular. Podríamos decir que un autómata celular es: un tablero consistente de casillas (es discreto) con reglas establecidas que se aplican por turnos a cada uno de los jugadores. Los autómatas celulares son útiles para analizar el problema del tránsito en las ciudades porque una carretera puede ser vista desde un espacio discreto donde los autos se mueven siguiendo una serie de reglas en tiempos definidos o por turnos.

Específicamente, las reglas son que los vehículos pueden moverse un número máximo de celdas por turno, como por ejemplo 3 o 5. Con esta reglas podemos cambiar la velocidad de los carritos. También se agrega una cantidad de obstáculos o recompensas como en el juego de *Serpientes y Escaleras*, de tal modo que si el auto pasa por una región sinuosa, con curvas y montañas la velocidad debe reducirse. Y si en el camino hay subidas y bajadas la cantidad de celdas a moverse disminuye o aumenta.

Una última regla: los coches no pueden chocar. El vehículo que impacta a otros se penaliza, prohibiéndole moverse por una cantidad de turnos que definen los jugadores mismos. En la Figura 1 se muestra un esquema del juego que acabamos de describir. En el lado izquierdo está la carretera real y en el derecho la carretera "discretizada".

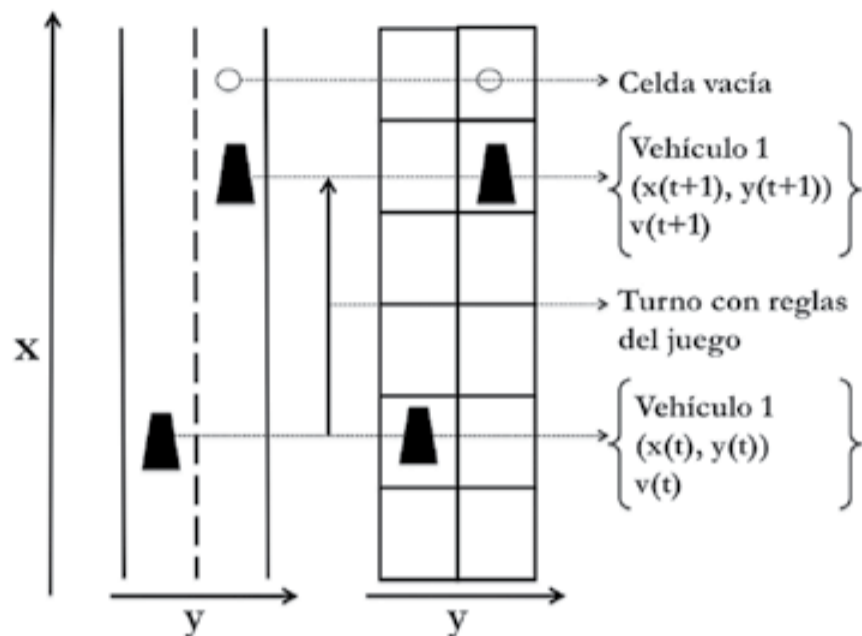


Figura 1. Esquema de una carretera vista como un autómata celular.

Hoy en día, es factible incorporar este juego en una computadora. No es lo que se imaginan, un videojuego con gráficos hiperrealistas y vehículos último modelo, ¡ojalá! En realidad se trata de una *simulación computacional* en la cual hacemos que la computadora implemente las reglas mediante un código, colocando y moviendo los vehículos en una carretera. Durante la simulación podemos implantar los límites de movimientos que queramos, igual que en las zonas montañosas o en las subidas y bajadas. De esta manera, la computadora juega con el autómata celular -que en este caso son la carretera y las reglas del juego- para poder saber cómo se desarrolla la dinámica real en una carretera. El programa se ejecuta miles de veces para explorar todas las posibilidades que se podrían dar en la vida real y obtener así comportamientos representativos. Aunque esto último es difícil de cumplir.

¿Cómo estar seguros de que aquello que pasa en la computadora se asemeja siquiera a lo que uno vive cotidianamente? La respuesta no es fácil. Lo esencial para pretender acercarnos a la realidad está en las reglas, o como dice el dicho popular: *el diablo está en los detalles*.

Antes de probar nuestro modelo es preciso decir que en esta ocasión no consideraremos los principios que todo conductor racional sigue: ir a la mayor velocidad posible y frenar cuando sea necesario para evitar un accidente, circunstancias que discutiremos más adelante en un segundo artículo.

Ahora sí, probemos y coloquémonos en la mente de un conductor: primera pregunta que surge ¿Por qué un conductor que se encuentra solo en una carretera tendría que frenar? Hay millones de respuestas distintas, pero a nosotros nos interesa solo un tipo de situación: los eventos que no podemos prever y que podrían causar una colisión. Con éstos nos referimos, por ejemplo, a los animales que atraviesan la carretera repentinamente, o a un bache. Este tipo de situaciones ocurren lo suficientemente seguido como para tenerlos en cuenta.

En 1992, dos científicos de apellidos Nagel y Schreckenberg propusieron cuatro reglas para el autómata celular donde estarían incluidos todos estos preceptos. Se trata de cuatro reglas que se aplicarían a cada uno de los vehículos en nuestra carretera. En autómatas celulares es importante el orden en que se aplican las reglas, por eso en este caso se aplican primero al vehículo más adelantado hasta llegar al más retrasado, esto se puede ver como el final de la carretera hacia el inicio, de tal modo que todos los coches en la autopista se mueven, por lo tanto el primero moverse es el que está más cerca de llegar a la meta.

La primera de estas reglas es sobre la aceleración. Un coche acelera lo más posible pero lo suficiente para no chocar con el que está enfrente. La segunda habla del frenado: si se lleva una velocidad con la que el coche puede chocar con el de enfrente, entonces reduce su velocidad. En la tercera regla se incluyen los elementos imprevistos, y para ello hay que desacelerar el coche aleatoriamente. Estas tres reglas se refieren a la velocidad del vehículo y en la primera y segunda reglas se incluyen los principios de los que hablamos en el párrafo anterior. La cuarta regla implica simplemente mover los vehículos con la nueva velocidad que surja a partir de considerar las tres reglas anteriores.

Con la inclusión de conceptos como la densidad vehicular y el flujo, el modelo logra describir algunos fenómenos que observamos cotidianamente al manejar. Pero ¿qué entendemos por densidad en una carretera? Si tomamos el tramo de una calle donde caben 20 coches, y en ella se encuentra solo uno, entonces hay una muy pequeña densidad de vehículos en ella. Si por el contrario, contamos 19, significa que hay una alta densidad y que la calle está casi llena.

¿Si la densidad es alta significa que los coches van lento? No necesariamente. Puede haber una gran cantidad de coches, todos en fila india, yendo a gran velocidad. Esto ocurre en grandes avenidas alrededor de las horas pico, donde una gran cantidad de vehículos aprovecha la luz verde de los semáforos para acelerar lo más posible.

Por el otro lado, todos hemos visto embotellamientos donde hay gran cantidad de coches en un tramo de tal manera que la circulación está detenida.

¿Cómo podemos entonces distinguir entre ambos casos? Si contamos el número de coches que salen por un extremo de la calle en un tiempo determinado, entonces podemos saber si todo el bloque de vehículos tiene una velocidad adecuada.

Si por ejemplo, tomamos la misma calle con alta densidad y contamos que por minuto salen 19 coches, entonces podemos decir que, aunque haya una alta densidad, la velocidad promedio es alta. Si por el contrario contamos que en ese mismo minuto solo salen dos coches, entonces podemos pensar que hay un gran embotellamiento y los vehículos están parados durante minutos y minutos.

A esta cantidad de vehículos por minuto se le conoce como *flujo* y simplemente sirve para contabilizar el número de coches que pasan por un lugar durante un cierto periodo de tiempo.

Ambas variables (densidad y flujo) sirven para explicar por qué en una carretera se pueden encontrar distintos "estados". Algo análogo serían los distintos estados del agua: cuando baja la temperatura -a presión ambiente-

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial@acmor.org.mx

el agua pasa de líquido a sólido y cuando aumenta, de líquido a vapor. En el caso del tránsito vehicular sucede algo parecido y a los estados se les conoce como de flujo libre y de flujo congestionado. Pensemos en una carretera completamente vacía donde un vehículo podrá acelerar sin mayor problema. Si se trata de dos vehículos, tampoco habrá complicación. Así la carretera puede irse llenando y aún así todos pueden ir a una gran velocidad debido a la baja densidad de la carretera. El que se coloquen más y más coches hace también que el flujo aumente, simplemente porque más coches pasan por el final de la carretera –como en el caso de la calle que se explicó arriba–.

Sin embargo, después de un cierto número de vehículos se alcanza un límite y se afectará la dinámica global y la velocidad promedio tenderá a disminuir y por lo tanto la cantidad de vehículos que crucen la carretera (o sea, el flujo) también. En otras palabras, al variar la densidad de la carretera el tránsito en ella sufre un cambio en su composición y comportamiento. Esto puede verse en la Figura 2, donde se observan datos del flujo contra la densidad, obtenidos de una simulación.

En la parte izquierda (densidad < 0.1 veh/celda) se observa una pendiente positiva, lo cual indica que cuando aumenta la cantidad de vehículos en la carretera el flujo también aumenta. Esta fase se conoce como de flujo libre.

Sin embargo, hay una densidad crítica a partir de la cual la dinámica de los vehículos se entorpece, y disminuyen la velocidad y el flujo. A este estado se le conoce como de flujo congestionado. A partir de esto concluimos que es el número de vehículos es el que provoca los congestionamientos en las grandes ciudades. ¿De verdad? Aunque esto es bastante intuitivo y lógico, es relevante explicarlo científicamente. Con estos modelos es posible realizar gran cantidad de análisis para mejorar la movilidad en las ciudades y carreteras. Por ejemplo, al saber la densidad crítica de vehículos en una ciudad con la transición de flujo libre a flujo congestionado, sería deseable pensar en políticas más claras para disminuir el tránsito –y por lo tanto la contaminación– en una ciudad; en síntesis con estos cálculos se puede saber el número máximo de vehículos que puede haber en una ciudad

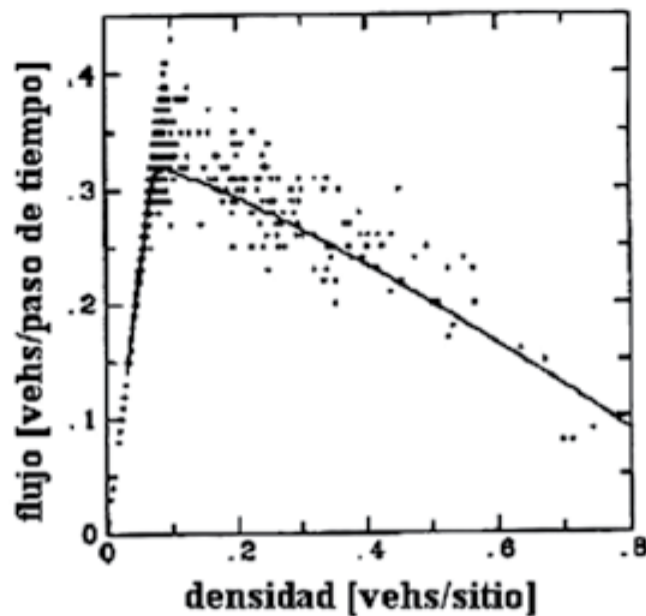


Figura 2: diagrama de flujo contra densidad donde se observan las dos distintas fases. (Reelaborada de [4])

o carretera sin que haya congestionamientos.

El modelo de NaSch –como se le llama a este autómata celular derivado de sus creadores– se ha aplicado con buenos resultados en situaciones reales alrededor del mundo [4]. Sin embargo, estas reglas que nos acercan a la realidad se refieren únicamente al comportamiento del conductor. ¿Qué hay del camino? Cada carretera es distinta y tiene sus propios elementos, por lo que tratar de modelar una carretera nevada para una carretera tropical no será muy adecuado. Por suerte, tenemos nuestro propio juego de *Serpientes y Escaleras*. Hace unos meses tratamos de simular con este método una carretera en el municipio de Cuernavaca, Morelos [3] que presenta distintos elementos que la hacen especial debido a las curvas y pendientes generadas por una serie de montañas. Para ello pusimos especial atención en los lugares donde teníamos que colocar los obstáculos para que los vehículos que la transitaran bajaran la velocidad. Es un trabajo meticuloso, sin embargo, el comportamiento que genera la carretera *en el conductor* puede ser aproximado.

Para resumir. Un autómata celular es básicamente como un juego de mesa. Cuenta con un tablero y con reglas establecidas para que las fichas se muevan por turnos (tiempo discreto). Aunque como toda analogía no es completa: en el caso de los juegos de mesa hay un ganador, en cambio en las simulaciones con autómatas celulares no hay ganadores; pero tenemos una descripción aproximada de situaciones reales. Así, el comportamiento del flujo vehicular en una carretera es aproximada-

mente descrito por uno de estos autómatas, al considerar a la ca-

Referencias bibliográficas

- [1] Mochán, L. “La contingencia” <http://www.acmor.org.mx/?q=content/contingencia>
 [2]: del Río, J.A., Lárraga, M.E., Transient Situations in Traffic Flow: Modelling the Mexico City Cuernavaca Highway, American Institute of Physics Conference Series, 757, 190-199 (2005).
 [3]: Castro González, L.M., Tesis de licenciatura, “Transiciones de fase entre flujo libre y flujo congestionado: el caso de Cuernavaca”, Facultad de Ciencias, UNAM, febrero 2016.
 [4]: Nagel, K., Schreckenberg, M., A cellular automaton model for freeway traffic, Journal de physique I, 2, 2221-2229 (1992).

Para saber más:

Video de Youtube donde se ve un frente de onda. <https://www.youtube.com/watch?v=Suugn-p5C1M>
 Simulación del modelo de NaSch. <https://www.cie.unam.mx/~arp/simulation1.html>



Si te gusta la biotecnología

Biotecnología en
MOVIMIENTO

desde tu computadora o
dispositivo móvil



Instituto de Biotecnología
Secretaría de Vinculación
(52 777) 329 1777 Ext. 38122

[in](#) IBt - Instituto de Biotecnología UNAM
[f](#) Instituto de biotecnología-UNAM
[t](#) @ib_t_unam

DISPONIBLE EN
www.ibt.unam.mx



Para actividades recientes de la Academia y artículos anteriores puede consultar:
www.acmor.org.mx