

# Modelación del tráfico vehicular de carreteras, mediante autómatas celulares

POR MARÍA ELENA LÁRRAGA

El transporte desempeña una función esencial dentro de la cambiante economía global, vinculando a personas y lugares, proveedores y consumidores; facilitando el comercio y el turismo, y contribuyendo al desarrollo económico. Si bien las contribuciones positivas del transporte a las economías nacionales y a la vida cotidiana de las personas son importantes en todas partes, el transporte también acarrea efectos negativos. Esto se debe a que, en los países industrializados como México, el sistema de transporte se basa principalmente en el uso de vehículos automotores, lo que ha generado un incremento continuo del número de vehículos que circulan en las carreteras en los últimos años, que sobrepasa la capacidad vehicular para la cual fueron diseñadas. Desafortunadamente este incremento vehicular conlleva el correspondiente incremento de la contaminación ambiental, la congestión vehicular y el número de accidentes, lo que genera enormes pérdidas económicas y deterioro en la calidad de vida.

Diversas consideraciones ecológicas, de espacio y de dinero, limitan la posibilidad de resolver el problema del congestionamiento vehicular mediante la modificación y construcción de nuevas redes de transporte. Ante esa situación, en los últimos años se han desarrollado modelos para entender ampliamente el complejo desempeño del tránsito vehicular y, así, incrementar la capacidad vehicular de las vías y mejorar el manejo de los sistemas carreteros existentes.

Con estos modelos es posible estudiar diversos fenómenos que ocurren en el tráfico vehicular, como son la congestión vehicular, el comportamiento en el cruce de vías, los accidentes de tráfico, el desempeño del flujo vehicular en los carriles de acceso a carreteras y la formación de filas en las casetas de peaje.



Fig 1 Congestionamiento vehicular en la autopista Mexico-Cuernavaca

## Modelación del tránsito vehicular

El tránsito vehicular es causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. El conocimiento del flujo vehicular en una red vial permite estimar el grado de ocupación y las condicio-

nes en que opera cada segmento de la misma. Con el análisis de su evaluación histórica es factible definir las tendencias de crecimiento, y el momento a partir del cual ciertos segmentos dejarán de prestar un servicio adecuado y se convertirán en cuello de botella del transporte, estancando el desarrollo en lugar de seguir propiciándolo.

La adecuada auscultación del tránsito de una red resulta fundamental para su operación, mantenimiento y desarrollo; resulta un insumo indispensable para planear las actividades por realizar en la red. En lo que a infraestructura se refiere, facilita la asignación de tránsito en los nuevos segmentos propuestos, así como definir sus características geométricas y estructurales. En los segmentos existentes, permite priorizar las necesidades de mantenimiento, definir el momento de las modernizaciones o reconstrucciones y señalar la necesidad de rutas alternas. En la operación, el conocimiento del flujo vehicular permite comparar la oferta de servicio con la demanda existente y realizar análisis operacionales que orienten el encauzamiento del tránsito y el desenvolvimiento de la red.

Por estas razones, en los últimos años se han desarrollado modelos para investigar el desempeño del tránsito vehicular y ayudar en la toma de decisiones relacionadas con él. Los factores involucrados en una modelación de tráfico vehicular son muchos. La densidad del tráfico —vehículos que circulan por la longitud del segmento estudiado— es, obviamente, un factor importante, pero también lo son los límites de velo-

ciudad, incorporaciones de tráfico a una vía rápida, bloqueos, vehículos lentos, semáforos, etcétera. La teoría detrás de esto es, por supuesto, necesariamente compleja y representa el problema principal para desarrollar un modelo que ayude a analizar el desempeño del tráfico vehicular, ya que las soluciones analíticas (la forma matemática exacta de la solución), cuando las hay, no producen los resultados esperados. Esto es porque es muy complicado encontrar una solución analítica buena, y aun encontrándola, la simulación computacional de esta solución es difícil de hacer en forma eficiente y rápida.

En general, existen dos marcos conceptuales para modelar el desempeño del tráfico vehicular según alguna de sus características: los modelos macroscópicos y los modelos microscópicos. Ambos responden con cierto grado de apego a la realidad, midiendo alguna o algunas características del flujo vehicular.

Los modelos macroscópicos se enfocan a captar las relaciones globales del flujo de tráfico, tales como la velocidad promedio de los vehículos, el flujo vehicular promedio y la densidad global del tráfico (véase fig 2, izquierda). Estos modelos asumen que el comportamiento de los conductores depende de las condiciones del tráfico, y estudian el comportamiento de los autos a gran escala. Dentro de estos modelos también existen modelos puramente empíricos, denominados modelos de capacidad y nivel de servicio, que renuncian al planteamiento matemático preciso y se limitan a establecer relaciones empíricas entre las principales variables bajo control del diseñador.

Por otra parte, los modelos microscópicos se enfocan en la descripción del comportamiento del flujo del tráfico vehicular mediante descripciones de las entidades discretas individuales y atómicas que interactúan unas con otras (en este caso cada vehículo o conductor individual) (véase fig 2, derecha).

Son modelos por lo general discretos (finitos y contables) en espacio, tiempo o en ambos. Los modelos microscópicos se pueden clasificar en modelos de seguimiento de vehículos (car following), de velocidad óptima y de autómatas celulares (AC). Los dos primeros son modelos continuos en espacio, tiempo o en ambos, que aunque representan fielmente el tránsito vehicular requieren una gran cantidad de recursos de cómputo, lo que los hace inadecuados para la simulación en línea (real) del tránsito vehicular.

En contraste, los modelos para tránsito vehicular basados en AC han llegado a ser un método bien establecido para modelar, analizar, entender y aun para pronosticar el desempeño del tránsito vehicular real, debido a que la dinámica vehicular depende de un conjunto de reglas de evolución simples, fáciles de entender, computacionalmente eficientes y suficientes para emular el desempeño que se observa en el tránsito vehicular. La eficiencia de estos modelos basados en AC se debe a que simulan el espacio, el tiempo y el estado mediante variables discretas, es decir finitas y contables. En particular, el segmento de calle que se simula se divide en celdas de igual tamaño y los vehículos conducen sobre la simulada calle mediante saltos de una celda a otra, en contraste con las simulaciones con espacio continuo, donde cada vehículo tiene una posición descrita por un número real (véase fig 3).

El énfasis al modelar el tránsito vehicular mediante AC está en cada vehículo que circula por una vía de transporte superficial. Así, la red de transporte se divide en una malla con una topología ordenada, inducida por la topología real que se simula, que respeta las relaciones de conectividad y los sentidos de circulación de la red original. El estado de los vehículos se caracteriza por su posición y velocidad. La primera está determinada por su ubicación dentro de la malla y la segunda surge de las relaciones que el vehículo bajo análisis

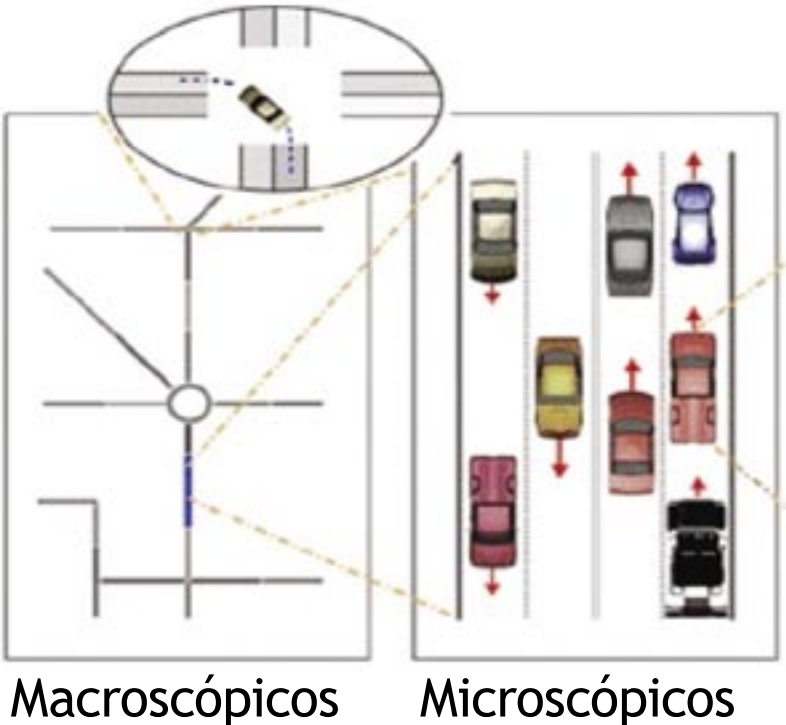


Fig 2 Las diferentes granularidades de modelación

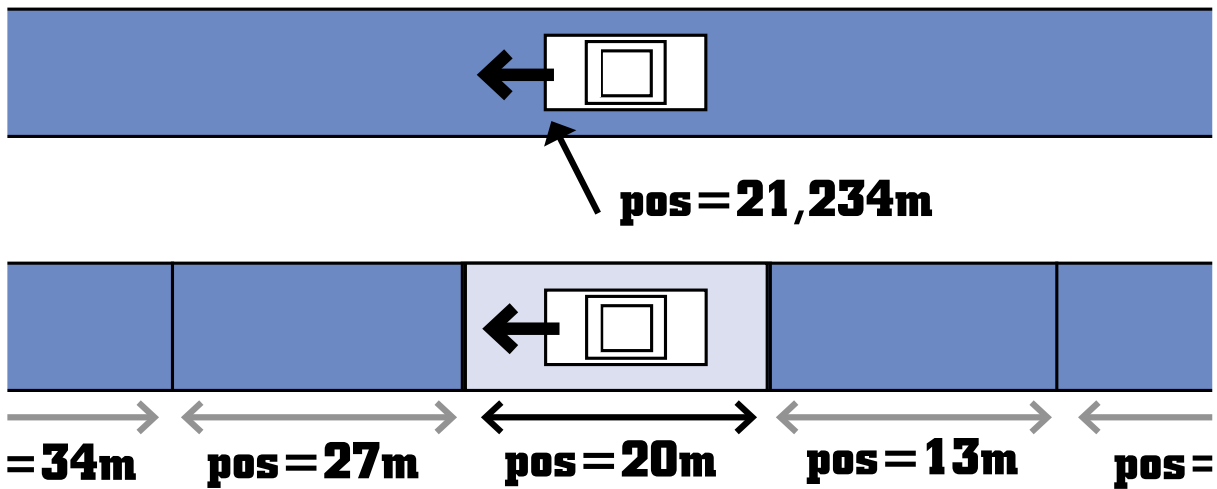


Fig 3 Diferencia entre una simulación con espacio continuo (arriba) y una con espacio discreto (abajo)

(CONTINUÍA)

guarda con su entorno, determinado por los vehículos vecinos y la presencia de elementos externos (intersecciones, casetas de peaje, etcétera (véase fig 3)).

Por su estructura relativamente simple, los modelos de autómatas celulares son ideales para hacer simulaciones masivas, con miles de vehículos. A partir de los resultados de estas simulaciones, es posible observar fenómenos de difícil predicción con modelos macroscópicos (como la formación de fases y patrones de flujo vehicular, por ejemplo). Por tanto, los modelos de AC combinan las ventajas de la compleja microsimulación, además de permanecer computacionalmente eficientes. Algunos modelos de AC para tránsito vehicular que se han aplicado con éxito al tráfico real pueden encontrarse en Chowdury et al, 2000a y Chowdury et al, 2000b.

Los modelos basados en AC son adecuados para planear el diseño de carreteras o redes urbanas, analizar su desempeño, determinar las causas de los congestionamientos y proponer modificaciones para mejorar el flujo vehicular. Sin embargo, actualmente no

se tiene conocimiento del mejor modelo basado en AC. Las investigaciones de tráfico con AC se deben orientar a reproducir en forma más real el desempeño del conductor humano y por tanto, los diversos fenómenos que se generan como consecuencia de la alta demanda vehicular. De forma que los nuevos modelos de AC que se desarrollen deben considerar los principios básicos que, de acuerdo con el estado del arte actual, conducen al desarrollo de modelos realísticos para descripción del tránsito vehicular: anticipación de la velocidad (estimación de la velocidad del vehículo precedente), aceleración retardada y frenado oportuno de acuerdo con las condiciones del tránsito vehicular. Además, se debe preservar la simplicidad que caracteriza los modelos de AC que los hace adecuados para su uso en tiempo real.

En México casi no se realizan estudios microscópicos de las carreteras como los basados en AC. La mayoría de las investigaciones que se realizan se basan en variables agregadas como el tránsito diario promedio anual (TDPA), que aunque permite estimar el desempeño promedio anual, no permite determinar

las causas que generan los congestionamientos que se presentan, por ejemplo, en días de asueto. Un estudio microscópico de las carreteras ayuda no sólo a determinar las causas que originan estos congestionamientos, sino a evaluar el resultado de posibles modificaciones para mejorar el servicio.

En la coordinación de Ingeniería Eléctrica y Computación, los doctores María Elena Lárraga Ramírez y Luis Álvarez-Icaza realizan investigaciones sobre el uso de técnicas de modelado basadas en autómatas celulares para el tráfico vehicular, con el fin de comprender fenómenos complejos del tráfico que no pueden ser apropiadamente capturados por los modelos de corte macroscópico. El trabajo está orientado a proponer nuevos modelos reales que en el futuro se puedan aplicar en México.