

Simulando una carretera con autómatas celulares: el caso del libramiento de Cuernavaca

Leonardo M Castro González
Facultad de Ciencias, UNAM.

Jesús Antonio del Río Portilla
Instituto de Energías Renovables,
UNAM, Centro de Ciencias de la
Complejidad, UNAM. Miembro de
la Academia de Ciencias de Morelos.

En Semana Santa me fui a Acapulco

Al vivir en la Ciudad de México tuve que atravesar Cuernavaca por su llamado "libramiento", aquel tramo de la autopista México-Acapulco que pasa por un costado de la zona metropolitana de Cuernavaca. Noté un tráfico inesperado que me frenó en el camino. También noté que el gobierno planea hacer una obra para terminar con los problemas "severos" de estancamientos en la carretera. El retraso no me pareció lo suficientemente "severo", por lo que rápidamente me olvidé de ello: solo quería llegar a relajarme en un camastro.

Arena, mar y sol. De repente ya era domingo y tenía que regresar a la cruda realidad de la Ciudad de México. Deprimido, empecé a manejar y tomé camino, esperando que la realidad no fuera tan cruel conmigo. Pero esta me alcanzó antes de lo planeado. Cruzar el "libramiento" de Cuernavaca, es decir un tramo de 27.3 kilómetros, sin semáforos, accidentes u otro elemento especial, me tomó casi 1 hora.

El objetivo de las obras que planea el gobierno adquirió sentido. Pero, ¿realmente funcionarán? Recientemente en un artículo [1] hablamos sobre cierta herramienta matemática llamada *autómata celular* con la cual podemos *simular* los vehículos circulando en una carretera, usando una analogía con el juego de Serpientes y Escaleras. En esta ocasión ilustraremos la forma de modelar específicamente el libramiento de Cuernavaca y con ello anticipar si las obras que el gobierno está realizando tendrán un desempeño favorable. Responderemos a la pregunta si las obras tendrán beneficios para el automovilista y el medio ambiente. De esta manera, calcularemos cómo cambia el tránsito y las emisiones de CO₂ con la modificación a la carretera.

El libramiento de Cuernavaca
¿Cómo adaptar las características específicas del libramiento de Cuernavaca en un autómata celular? En este caso nos fijaremos en tres elementos: la topografía, las curvas y rampas, y el tipo de vehículos que circulan por el libramiento.

La autopista México-Acapulco cruza las montañas que separan las ciudades de México y de Cuernavaca. Estas provocan una gran diferencia de altitudes en el estado de Morelos. Poniéndolo en números, el lugar donde empieza Cuernavaca al norte se encuentra a aproximadamente 2000 metros sobre el nivel del mar. Desde este punto hasta donde termina el libramiento, en el ITESM, hay una diferencia de 750 metros de altura. Esto crea una pendiente importante en la carretera y también existen distintas curvas sobre el libramiento que obligan a los conductores a modificar la rapidez.

La pendiente favorece a los pasajeros cuando viajan hacia el sur, ya que el peso del vehículo ayudará a acelerar por la ley de la gravedad. Sin embargo, si el destino es la Ciudad de México, entonces el peso del coche será un *impedimento* para lograr la misma velocidad que de bajada. Esto no tiene mayor efecto si conducimos un vehículo ligero (o incluso una camioneta) en buenas condiciones. Pero al pensar en un camión de pasajeros o de carga, el peso se vuelve considerable y sus motores se verán demandados. En otras palabras, los vehículos pesados o en malas condiciones irán a una velocidad considerablemente menor en el ascenso con respecto a los ligeros, haciendo que los camiones de carga lleguen a disminuir su velocidad hasta los 50km/h [2]. Considerando que en nuestro modelo los vehículos ligeros pueden ir a una velocidad máxima de 135 km/h, la diferencia de velocidades entre estos dos grupos de vehículos congestiona la carretera.

Así la representación matemática del libramiento basada en autómatas celulares [1], tendrá que considerar pendientes y curvas. Siguiendo la forma de modelar el libramiento tendremos que dividir su segmento en un gran número de celdas. Cuando un vehículo representando a un camión o un coche en malas condiciones pase por alguna celda correspondiente a la pendiente, su velocidad será reducida a un máximo de 50 km/h. Fuera de la pendiente, los camiones podrán alcanzar una velocidad de 80 km/h. Lo mismo para los vehículos ligeros en las curvas: en este caso se disminuye en un 20% en las curvas peligrosas con respecto a las rectas.

Con respecto a las rampas de acceso y de salida, haremos que en aquellas celdas corres-

pondientes a estas en la realidad puedan entrar vehículos a una velocidad menor (54km/h) o simplemente salir del libramiento. En la Figura 1 se observa un esquema de las rampas. Nosotros solo agregaremos secciones donde se insertan vehículos y no aquellos que salen.

De esta manera, tenemos aquellos elementos para construir una simulación para estudiar el comportamiento del tránsito en el libramiento de Cuernavaca. Considerando los planos de las obras planeadas por el gobierno, podemos modificar la simulación, obteniendo información de la carretera cuando las obras terminen. En la Figura 2 se puede observar un esquema de estas. Básicamente el cambio

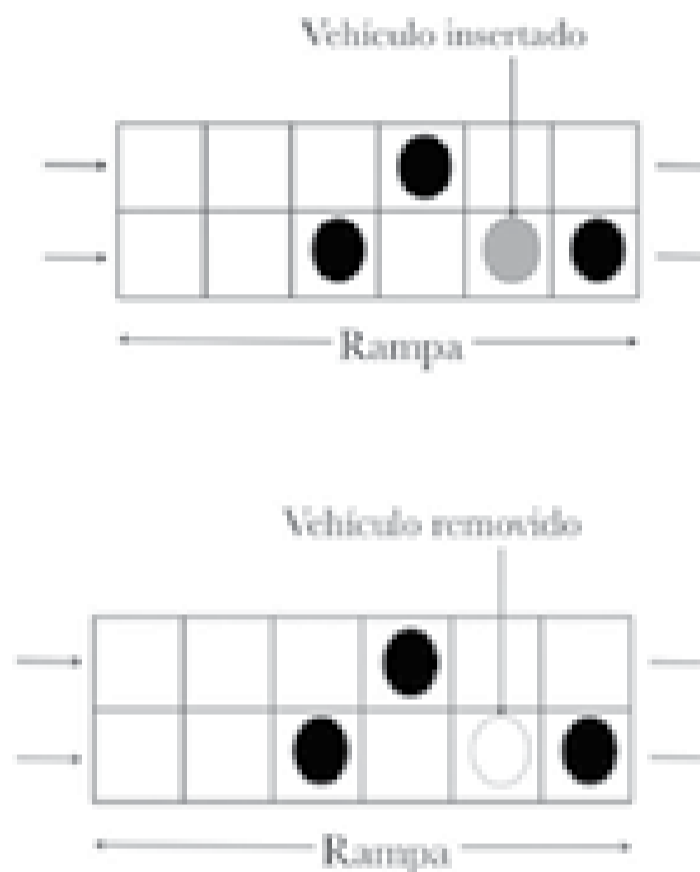


Figura 1. Esquemas de una rampa de entrada y una rampa de salida.

La idea es analizar los casos más complicados y esto se logra si introducimos vehículos y no les permitimos abandonar el libramiento. Es decir que estamos simulando los estados de máximo congestionamiento, el peor escenario.

planeado es la construcción de dos distintas carreteras. Una de dos carriles donde no haya rampas de acceso ni salida llamado paso express, y otra de tres carriles donde estén todas las rampas, al cual nosotros llamamos sistema local.

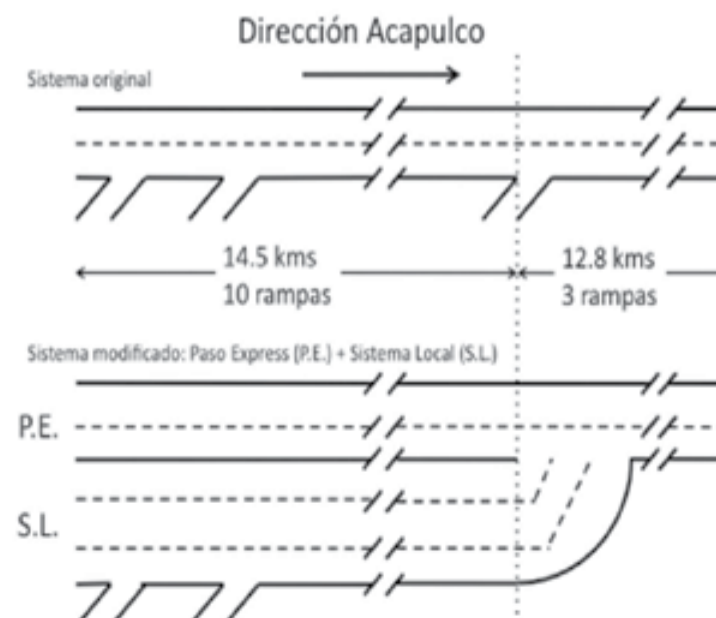


Figura 2. Esquema del libramiento de Cuernavaca y las modificaciones planteadas por el gobierno.

Los resultados de la simulación con autómatas celulares

Hay que aclarar los detalles sobre nuestras simulaciones. El sentido México-Acapulco será llamado S1. El sentido opuesto, S2. Al número de coches que entran por una rampa por hora se le llama flujo por rampa. El número de vehículos entrantes por el inicio de la carretera por hora es llamado flujo inicial. Estas dos cantidades son usadas para mostrar los resultados de

ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

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



las simulaciones
Primero analizamos la carretera original. La Figura 3 muestra los tiempos de recorrido para cruzar los 14.5 km por modificar, es decir desde el distribuidor Palmira hasta Chamilpa, dirección sur-norte. Los tiempos resultantes son bastante similares a los que se pueden hacer en un día normal con congestión, o en un domingo terminando vacaciones. Las barras muestran la desviación estándar de nuestras simulaciones, o en otras palabras el intervalo en el que se encuentran los resultados de las diferentes corridas. Es importante mostrar esta gráfica para estar seguros de que sí modelamos el libramiento, y no otra carretera!
En los resultados mostrados en la Figura 3 se observa algo bastante curioso que suele suceder en grandes vías congestionadas. El cuarto punto rojo de la

gráfica, de izquierda a derecha se puede expresar como "de Palmira a Chamilpa me hago unos 10-20 min", lo cual, si bien no es completamente exacto, sí corresponde a la duración real a grandes rasgos. Para los tres puntos anteriores la incertidumbre es mucho menor. Sin embargo, para los últimos tres puntos, el rango de tiempos que puede tomar cruzar los 14.5km aumenta drásticamente. Por ejemplo, para el último punto, el viaje puede tomar desde 10 minutos hasta casi una hora. ¿Cómo es esto posible? Lo que pasa es que la carretera se vuelve un sistema inestable cuando los flujos iniciales y en rampas son muy altos: podría cruzarse en 7 minutos si los camiones respetaran su carril y ningún vehículo frenara aleatoriamente, mientras que podría requerir alrededor de una hora si algunos camiones usaran el

carril de la izquierda o muchos vehículos frenaran delante del conductor sin suerte. Sin embargo, al tratarse de una medida estadística, hay que decir que el promedio es alrededor de 32 minutos.

Con esta información y los comentarios de los usuarios del libramiento estamos seguros de que sí lo estamos modelando razonablemente bien, así que procederemos a realizar el estudio del libramiento modificado tal

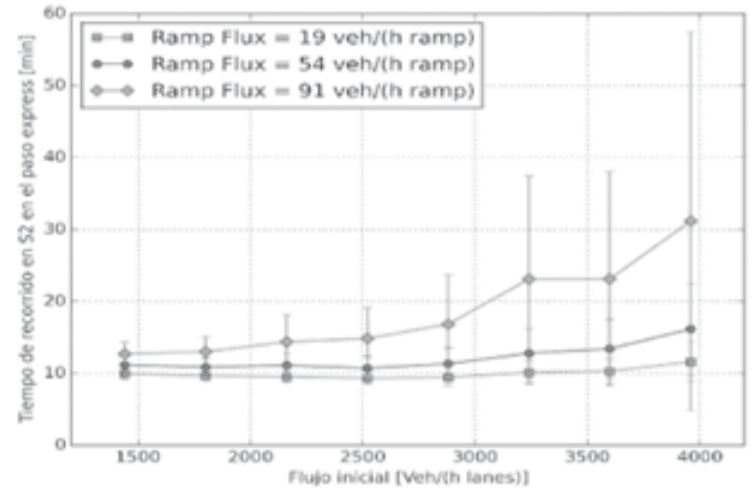


Figura 3. Tiempos de recorrido para los 14.5km que el gobierno planea modificar antes de las obras con sentido hacia la Ciudad de México.

LLEGÓ VOLVO SUMMER SALE. ¡APROVECHALO!

0%

¡SOLO POR TIEMPO LIMITADO!



SUMMER SALE



Promoción en servicio de mantenimiento

\$3,990 + IVA

Incluye la inspección general del vehículo, lavado de motor, lavado de carrocería y la actualización del software a versión 2.0



Tel: (777) 494 75 (32 al 36)

Av. Río Mayo esquina Iguala No. 30, Colonia Vista Hermosa. Cuernavaca Morelos. C.P 62290
Tel: 404 7532 404 7533 404 7534 404 7535 404 7536



pisos • azulejos • baños • cocinas

Espacios para Disfrutar

Precios increíbles para todos los presupuestos

pisos • azulejos • materiales de instalación • baños • vanities • llaves • tarjas

www.interceramic.com

Cuernavaca Palmas Tels. (777) 318 5863, 318 5927

Plan de Ayala Tels. (777) 322 -2961, 322 2962

Emiliano Zapata Tels. (777) 311- 2856, 317 -7373

Cuautla Centro Tels. (735) 352 -6732, 308 -0246

Cuautla Norte (735) 122 -2635, 122 -2636

Jojutta Tels. (734) 342-8585, 342-8704

Jiutepec Centro de Distribución Morelos Tels. (777) 516- 8614, 516- 9389

Ventas Corporativas Asesoría Personalizada al Público y Atención a Constructores
Tel. Directo (777) 310 8072 Oficina (777) 516 8614 Ext. 111 y 110

Abiertos de lunes a viernes de 9:00 a 19:00 horas, y sábados de 9:00 a 18:00 horas

Sus. CUAUTLA CENTRO de lunes a viernes de 9:00 a 19:00 horas y sábados de 9:00 a 18:00 horas
1 Hora de estacionamiento gratis
* Sujeto a aprobación de crédito.




como el gobierno planea hacerlo. En lo que resta analizaremos el peor caso para el nuevo libramiento, supondremos que todo el flujo se va por el paso express o por el paso local, no se divide el flujo en nuestras simulaciones.

En la Figura 4 observamos los tiempos de recorrido para los mismos 14.5 km en el carril central e izquierdo del sistema local y el paso express.

¿Por qué solo el central e izquierdo del sistema local? Porque en el carril extremo derecho encontramos la gran mayoría de camiones pesados (que van a menor velocidad por la pendiente) y a todas las rampas de entrada que disminuyen

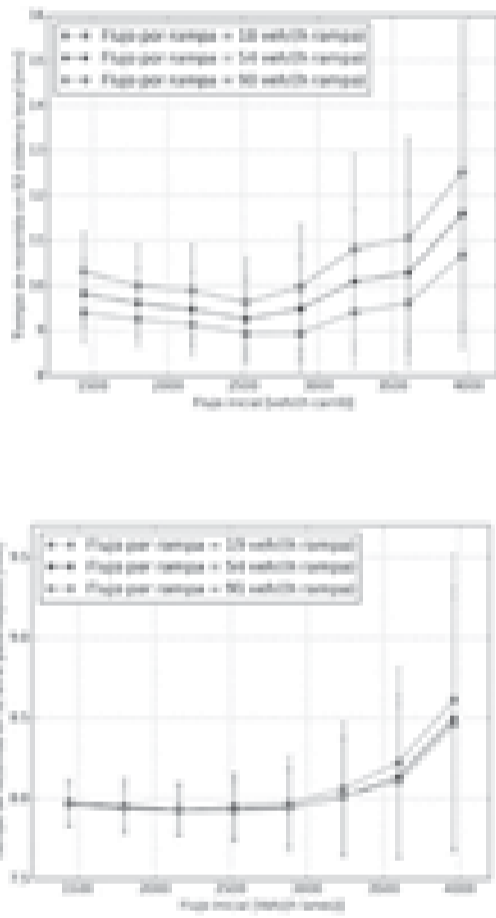


Figura 4. Tiempos de recorrido para los 14.5km a modificar después de las obras hacia la Ciudad de México. En el diagrama de la izquierda se muestran los tiempos para el sistema local. A la derecha, los tiempos para el paso express.

también el flujo. En el diagrama izquierdo de la Figura 4 podemos ver cómo los tiempos pueden descender de un promedio de 30 minutos como tiempo máximo a 16 minutos¹. De esta manera, si uno quiere cruzar el tramo del libramiento modificado entre 8 y 16 minutos, tal como lo muestra el diagrama, no habrá de circular por el carril de extrema derecha. Sin embargo, es importante también tener en cuenta los fenómenos de *inversión de carriles* como el que ya describimos en [3].

Esta situación puede mejorar si nos fijamos en el paso express (diagrama derecho de la Figura 4). Aquí los tiempos se reducen todavía más, teniendo un tiempo promedio máximo de 9.2 minutos. También notamos como los tiempos no dependen realmente de los flujos en las rampas, básicamente porque no hay rampas. Sin embargo, estos resultados están sujetos a una sola condición: que no haya camiones dentro del paso express. Esto permitiría a los vehículos a ir a su mayor velocidad sin tener que encontrar obstáculos con movimiento. En caso de que esto no se cumpla se obtendrían tiempos similares a los del sistema local (tomando en cuenta solo los dos carriles izquierdos).

Entonces, incluso antes de hacer las simulaciones era un poco intuitivo el hecho de que los tiempos de viaje fueran a descender. Sin embargo, de las simulaciones podemos llegar a una conclusión mucho más importante, y es que las obras permitirán *estabilizar* la carretera. A diferencia de los resultados en la Figura 3, en la Figura 4 no observamos barras de desviación estándar tan grandes, de tal manera que los conductores podrán saber con mucha mayor precisión cuánto tiempo se tardará en cruzar de avenida Morelos a Chamilpa, incluso en domingo en la tarde regresando de vacaciones. De un "No pues ahí te hablo cuando vaya

llegando, pero pues no me esperen a comer" a un "llego en unos 10-15 minutos" hay una gran diferencia.

Veamos ahora las emisiones de CO₂. Podemos estimar estas al saber los litros de gasolina que gasta un coche al atravesar el libramiento y su equivalente en CO₂ [4,5].

Al ir hacia la Ciudad de México obtenemos emisiones de entre 5.9 y 7.2 kilogramos de CO₂ por vehículo por hora en el libramiento. Esta cantidad podría parecer pequeña. Sin embargo, si consideramos que en semana santa se han registrado flujos de aproximadamente 4000 vehículos por hora pasando por el libramiento [6], entonces la cantidad de CO₂ que se emite a lo largo de la carretera sube a entre 23.6 y 28.8 toneladas métricas de CO₂ por hora. Esto afecta directamente a la salud de todos los habitantes de Cuernavaca, ¡y los automovilistas que se encuentran atascados en el libramiento!

Calculando las emisiones para las nuevas obras encontramos un ahorro significativo. En el sistema local estas disminuyen un 14%, mientras que en el paso express un 17%. Estos ahorros son considerables, sin embargo las emisiones de CO₂ siguen siendo importantes, contribuyendo al calentamiento global. Resultados muy parecidos se encuentran en el otro sentido, aunque por espacio no pueden presentarse aquí.

En conclusión, podemos decir que es posible usar los autómatas celulares, análogos al juego de Serpientes y Escaleras, para modelar el libramiento de Cuernavaca. Este último tiene distintos elementos especiales como el número de rampas y la pendiente que se crea por su ubicación específica. Nuestras simulaciones pueden modelar todos estos elementos. Con ellas podemos encontrar información para saber si una obra planeada tendrá los efectos deseados.

De nuestros resultados podemos decir que las obras sí ayudarán a todos aquellos que busquen cruzar el libramiento de Cuernavaca enteramente. Sus tiempos de recorrido disminuirán considerablemente, aunque estas disminuciones no se verán reflejadas en una mejoría de la calidad del aire que se respira. Los ahorros de CO₂ son bastante moderados para la obra, por lo que los conductores y las personas en Cuernavaca seguiremos respirando prácticamente el mismo aire contaminado.

Este tipo de análisis es muy importante. Así como para este artículo logramos modelar el caso específico del libramiento de Cuernavaca, también se podría modificar nuestro modelo de autómatas celulares para simular prácticamente cualquier carretera en el mundo. Esto sin duda sería una gran ventaja para anticipar mejoras no solo para la movilidad alrededor del mundo, sino también para disminuir la huella ecológica que nuestros coches están dejando, y de paso ayudar a los gobiernos a planear obras eficientes.

Referencias

- [1]: Castro González, L.M., del Río, J.A., "Carreteritas con autómatas celulares". <http://acmor.org.mx/?q=content/carreteritas-con-aut%C3%B3matas-celulares>
- [2]: Castro González, L.M., Transiciones de fase entre flujo libre y flujo congestionado: el caso Cuernavaca, Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias - UNAM, febrero 2016.
- [3]: Castro González, L.M., "Física y matemáticas para entender los embotellamientos de una carretera". <http://acmor.org.mx/?q=content/f%C3%ADsica-y-matem%C3%A1ticas-para-entender-los-embotellamientos-de-una-carretera>
- [4]: Factores de emisión y consumo de combustible, Reporte interno, Instituto Nacional de Ecología, abril 2005. http://www.inecc.gob.mx/descargas/calibre/2005_inf_fac_emis_combus.pdf
- [5]: US Environmental Protection Agency, GHG Equivalencies Calculator - Calculations and References, mayo 2016. <https://www.epa.gov/energy/ghg-equivalencies-calculator-calculations-and-references>
- [6]: Publímetro. Revisa la carga vehicular en las principales carreteras del DF (2015).