



AUTÓMATAS CELULARES Y SU APLICACIÓN A LA MODELACIÓN DEL TRÁFICO AUTOMOTOR EN LA CIUDAD DE CARACAS

Resumen: En este trabajo se propone un modelo microscópico de tráfico vehicular, de comportamiento emergente, basado en un autómatas celular. Este modelo forma parte de un estudio de tráfico automotor que se ha iniciado recientemente para la ciudad de Caracas. El modelo incluye un solo tipo de vehículos y las velocidades de los mismos se asignan a través de una distribución gaussiana, de manera de tomar en cuenta que no todos los conductores acatan los límites de velocidad. La validación del modelo se lleva a cabo mediante la comparación entre los valores del flujo vehicular simulados y medidos empíricamente por medio de conteos mecánicos.

Abstract. *In this paper an emergent microscopic traffic model based on a cellular automaton is presented. The model is part of a vehicular traffic study recently initiated in the city of Caracas in Venezuela. The proposed simulation model is an extension of the Nagel and Schreckenberg model for identical vehicles incorporating several important features: Velocities of cars are picked from a Gaussian distribution to take into account that not every car driver honors velocity limits. The model is validated by fitting measured normalized average vehicle flows by means of an iterative unconstrained optimization algorithm. For this purpose mean and variance of the velocity distribution are considered as optimization parameters together with other model parameters. Objective Functions quantifying the mean square deviations of the differences of measured and simulated normalized averages flows, are defined. The results show that the proposed simulation models reproduce satisfactorily the general features of empirical flow measurements.*

■ Lic. Angel Aponte

Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI)
Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Andrés Bello
Caracas, DC. Venezuela
aaponte@ucab.edu.ve

■ Dr. José Alí Moreno

Laboratorio de Computación Emergente (LACE)
Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela
Caracas, DC. Venezuela
jose@neurona.ciens.ucv.ve

1 Introducción

El estudio y simulación del tráfico vehicular ha adquirido gran auge en los últimos años, y constituye un área de investigación de sumo interés y gran actividad en mecánica estadística, física de materia condensada, computación emergente, ingeniería de tráfico y planificación urbana.

La literatura especializada reporta numerosos estudios de tráfico realizados en diferentes universidades e institutos de investigación alrededor del mundo. En muchos casos estos estudios tienen como objetivo el desarrollo de Sistemas de Información de Tráfico (SIT). Como referencia pueden mencionarse los SIT implementados para algunas autopistas en Seattle, Boston, Amsterdam, ciudad de México [1, 2, 3], para la red de *autobahns* de North Rhine-Wesphalia en Alemania [4, 5, 6, 7], y los SIT utilizados para estudios a gran escala para modelar el tráfico urbano y operaciones de transporte público, en las ciudades de Dallas (TX USA), Estocolmo (Suecia), Ginebra (Suiza), entre otras [8, 9, 10].

Los enfoques generalmente más utilizados para la modelación del tráfico vehicular son el “macroscópico” y el “microscópico” [11, 12, 13, 14]. Típicamente en los modelos “macroscópicos”, el tráfico es considerado un fluido compresible. Los conceptos y formalismo de la dinámica de fluidos, son utilizados para caracterizar el fenómeno. Los vehículos no aparecen explícitamente en la teoría. Este enfoque genera modelos “gruesos”, menos detallados y, por tanto, menos exigentes desde el punto de vista computacional.

Por otra parte, en los modelos “microscópicos” la atención se centra en cada “partícula” individual, en cada vehículo. De manera que la dinámica del tráfico y su desempeño estarán determinados por la manera en que cada vehículo influye sobre el movimiento de los demás. Por su naturaleza detallada, estos modelos caracterizan y describen mejor el fenómeno pero a un alto costo en lo que a cómputo se refiere.

La casi totalidad de los SIT mencionados más arriba, incorporan en sus algoritmos lo que se denomina un Modelo Microscópico de Comportamiento Emergente Basado en un Autómata Celular (MMCEBAC) [11]. En los MMCEBAC se implementan reglas muy sencillas con las cuales se busca reproducir las características más relevantes del comportamiento

del tráfico automotor observadas en la realidad. Esto es posible además a un costo de cómputo relativamente bajo, ya que programas de este género, es posible ejecutarlos satisfactoriamente y en tiempos razonables en plataformas computacionales que no van más allá de PCs.

Pero ¿Por qué son tan importantes los SIT?

Una solución inmediata a los problemas de los congestionamientos de vehículos y a la reducción de sus efectos colaterales, pero de fuerte impacto económico, es sin duda alguna la ampliación de la infraestructura de calles, avenidas y autopistas. Sin embargo, los costos involucrados, incluido el costo social, particularmente en áreas densamente pobladas, son enormes. Una alternativa mucho más económica es la utilización efectiva de los recursos viales ya existentes. Los SIT permiten estudiar la dinámica del tráfico y de los congestionamientos y a partir de ese conocimiento, proponer acciones destinadas a mitigar sus efectos, optimizando así el uso y aprovechamiento de la vialidad disponible [2, 5], reduciendo considerablemente los costos operativos, ya que un SIT permite simular y evaluar en el computador múltiples escenarios estructurales y de desempeño, sin necesidad de movilizar un solo obrero ni una sola maquinaria. Un subproducto de este análisis es el diagnóstico oportuno de las locaciones donde la infraestructura vial debe crecer y simular con cuáles características debe hacerlo, permitiendo así planificar y ejecutar efectivamente proyectos futuros de mejoras y ampliaciones.

La ciudad de Caracas, como muchas de las ciudades mencionadas anteriormente, padece cotidianamente los efectos colaterales de los congestionamientos de tráfico en sus calles, avenidas y autopistas. Sin embargo, en esta ciudad no se ha llevado a cabo, hasta ahora, un estudio sistemático y a gran escala, que incluya una campaña masiva de levantamiento de información, así como también un análisis detallado que incorpore la modelación y simulación del comportamiento y desempeño del tráfico automotor en sus calles, avenidas y autopistas.

Con el propósito de contribuir a cubrir esta necesidad, en este trabajo se presentan los resultados preliminares de un estudio de tráfico automotor que se ha iniciado recientemente en la ciudad de Caracas. Específicamente, se presentan los resultados de aplicar un MMCEBAC para simular el desem-

peño del tráfico en dos locaciones específicas de la ciudad. El modelo aquí propuesto será el punto de partida para la implementación e implantación en el mediano plazo de un SIT para el área metropolitana.

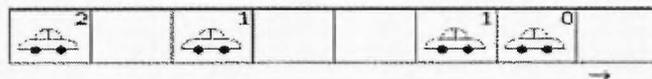
La estructura del trabajo es como sigue. En el apartado 2 se describen los elementos esenciales de un MMCEBAC. La sección 3 describe la implementación y validación del modelo propuesto. En el apartado 4 se presentan y discuten los resultados obtenidos. Se cierra en la sección 5 con las conclusiones y algunos comentarios finales.

2. Autómatas Celulares (AC) y modelos de tráfico

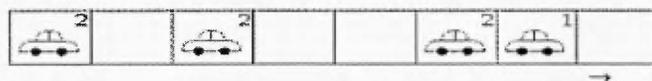
Tal como se mencionó en la introducción, existen básicamente dos enfoques en los que actualmente se fundamentan los modelos para el estudio del tráfico vehicular: el "macroscópico" y el "microscópico". La aproximación macroscópica produce modelos "gruesos" con los cuales es posible caracterizar aspectos generales del fenómeno [12, 13] a un bajo costo computacional. Sin embargo, la revolución en la tecnología de los PCs, pone hoy a la disposición equipos con gran poder de cómputo a costos relativamente bajos. De aquí que ahora esté al alcance llevar a cabo estudios de tráfico a gran escala, con una perspectiva microscópica donde pueden ser incorporados detalles de la geometría de la red vial, así como también, detalles de las interacciones entre los vehículos que circulan a través de ella [11, 12, 14].

Específicamente, dentro de los diferentes modelos microscópicos reportados en la literatura, los que incorporan un MMCEBAC en su implementación, son de los más difundidos. En ellos se incluyen reglas muy sencillas con las cuales es posible reproducir las características más relevantes del comportamiento del tráfico automotor observadas empíricamente. Todo esto a un costo computacional relativamente bajo, ya que algoritmos de este género, es posible ejecutarlos satisfactoriamente y en tiempos razonables en una PC o en una combinación de ellas ("cluster").

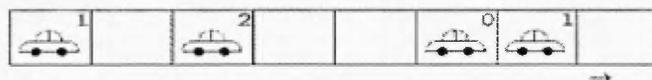
Configuration at time t :



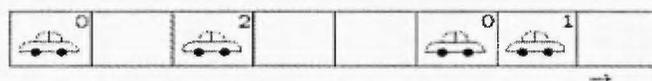
a) Acceleration ($v_{max} = 2$):



b) Braking:



c) Randomization ($p = 1/3$):



d) Driving (= configuration at time $t + 1$):

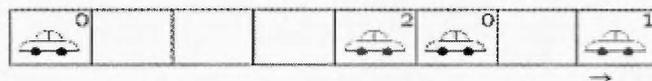


Fig. 1 Esquema del modelo de tráfico unidimensional propuesto por Nagel y Schreckenberg en 1992 (tomado de D. Chowdhury et al. Physics Reports 329, 199 -2000).

Un modelo de tráfico de este género fue propuesto por vez primera en 1992 por los investigadores alemanes K. Nagel y M. Schreckenberg (modelo de NaSch) [15], para modelar y simular el tráfico vehicular en las *autobhans* de North-Rhine Whesphalia en el noroeste de Alemania. La implementación requiere subdividir una vía de longitud L en n celdas. Algunas celdas son ocupadas con vehículos y el resto se dejan vacías (ver Fig.1). Se permite sólo un vehículo por celda. La densidad vehicular de la vía o canal de circulación (número de vehículos por unidad de longitud) se define por $\rho = n_{ocp}/L$, donde n_{ocp} es el total de celdas ocupadas. Las velocidades y posiciones se representan también por cantidades discretas, esto es, números enteros. La variable temporal se subdivide en pasos discretos de tiempo. La dinámica vehicular es modelada aplicando un conjunto de reglas sencillas derivadas de la observación empírica y el sentido común.

La Fig.1 muestra esquemáticamente el MMCEBAC originalmente propuesto por NaSch para modelar una vía rectilínea de un solo canal. Los

vehículos se desplazan de izquierda a derecha. La dinámica del proceso se divide en una secuencia de cuatro etapas: a) si la velocidad del vehículo es menor que la velocidad máxima establecida, entonces la velocidad es incrementada en una unidad (aceleración), en caso contrario la velocidad se toma igual a la máxima permitida; b) si la velocidad del vehículo es mayor que la distancia entre el mismo y el auto que tiene inmediatamente por delante, entonces la velocidad del primero se hace igual a esta distancia disminuida en una unidad (frenado), evitando así colisiones; c) para cualquier vehículo cuya velocidad sea mayor que cero, con cierta probabilidad, esta velocidad se reduce en una unidad (frenado aleatorio o “randomization”); d) finalmente, las posiciones y velocidades de los vehículos son actualizadas (conducción). Es importante destacar que el paso c) es determinante en la formación de los congestionamientos (espontáneos) [11]. La secuencia descrita se repite en cada uno de los pasos de tiempo. Se requiere además imponer Condiciones de Borde (CB), las cuales pueden ser Condiciones de Borde Periódicas (CBP) o Condiciones de Borde Abiertas (CBA).

El modelo de NaSch descrito en el último párrafo es considerado un “modelo mínimo”. Sin embargo, se ha encontrado que reproduce cualitativa y cuantitativamente algunas características relevantes del comportamiento del tráfico automotor observadas en la realidad. De allí su importancia y trascendencia en este contexto. No obstante, para una descripción más completa del fenómeno y/o modelos más elaborados, se hace necesario considerar los diversos aspectos geométricos de la vialidad y por tanto incorporar reglas, según sea el caso, para cambios de canal, maniobras de adelantamiento, maniobras de cruce en intersecciones, etcétera. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta aspectos relacionados con el comportamiento de los conductores, el cual ejerce, según lo reporta la literatura [2, 16], gran influencia sobre la dinámica vehicular resultante.

Sistemas de Información de Tráfico como *OLSIN* [5, 6, 7], *MITSIMLab* [8], entre otros, incorporan en su implementación un MMCEBAC con características semejantes a las descritas en los últimos párrafos.

3. Implementación y validación del modelo

En este apartado se describe la implementación de un modelo computacional generado para el estudio del tráfico automotor en algunas locaciones de la ciudad de Caracas. El mismo incorpora un MMCEBAC basado en el modelo de NaSch descrito anteriormente. El MMCEBAC propuesto en este trabajo está conformado por dos módulos, los cuales permiten modelar y simular respectivamente: un tramo rectilíneo de autopista de dos canales, donde los vehículos circulan en el mismo sentido, y un tramo de carretera curva, donde los vehículos circulan en sentidos opuestos a través de un canal de ida y otro de vuelta.

En el tramo rectilíneo de autopista se establecen reglas para los cambios de canal. Para el tramo de carretera con una curva, se implementan reglas para maniobras de adelantamiento. Por seguridad no se permiten estos últimos en el sector curvo de la vía.

Se comienza fijando valores para el número total de celdas n , número de pasos de tiempo n_k , densidad vehicular relativa de los canales o vías df_{21} , probabilidades de frenado p_{c_1} , p_{c_2} , número total de corridas, parámetros geométricos de la vía, las velocidades de los vehículos, etcétera.

Seguidamente se calcula la densidad vehicular en cada canal o vía, las posiciones de las celdas ocupadas, y se asigna una velocidad a cada vehículo. Las velocidades se escogen según una distribución gaussiana para tomar en cuenta que no todos los conductores acatan los límites de velocidad establecidos. Se toma ahora la media de esta distribución como velocidad máxima. Se evalúa además la distancia entre los vehículos. Así se genera la primera generación del AC. Para los cambios de canal se implementa un algoritmo basado en los reportados en las referencias [17, 18, 19, 20]. Para la carretera, los adelantamientos se implementan con un algoritmo obtenido mediante la modificación del algoritmo de cambio de canal antes mencionado. Tanto para los cambios de canal como para los adelantamientos, se incorporan criterios de incentivo y de seguridad, siendo este último esencial para evitar las colisiones entre los vehículos. Seguidamente se aplica la secuencia de aceleración, frenado, “randomization” y conducción, obteniéndose una nueva generación del AC en cada paso de tiempo. A continuación se calculan y se almacenan en cada corrida los obser-

vables de interés: velocidad promedio y flujo vehicular (número de vehículos que pasan por unidad de tiempo por un punto dado). Por simplicidad se imponen en todos los casos CBP, esto es, los carros que llegan al final del arreglo son reintroducidos al inicio del mismo.

El proceso descrito en los dos párrafos anteriores representa una simulación o "experimento numérico". Se realizan tantos como se requieran.

Se encontró que el modelo de comportamiento emergente propuesto reproduce cualitativamente los diferentes regimenes de tráfico observados en la

realidad: desde el flujo libre hasta la formación de los congestionamientos espontáneos. La Fig.2 muestra un ejemplo donde se comparan cualitativamente las trayectorias vehiculares simuladas en un canal y las trayectorias reales medidas en un canal de una autopista en Ohio USA. Adicionalmente se encontró que para los dos casos estudiados (tramo de autopista y carretera curva) los diagramas fundamentales derivados del modelo emergente propuesto muestran transiciones de fase congruentes con las reportadas en los diagramas fundamentales empíricos generados a partir de medidas reales [21,22].

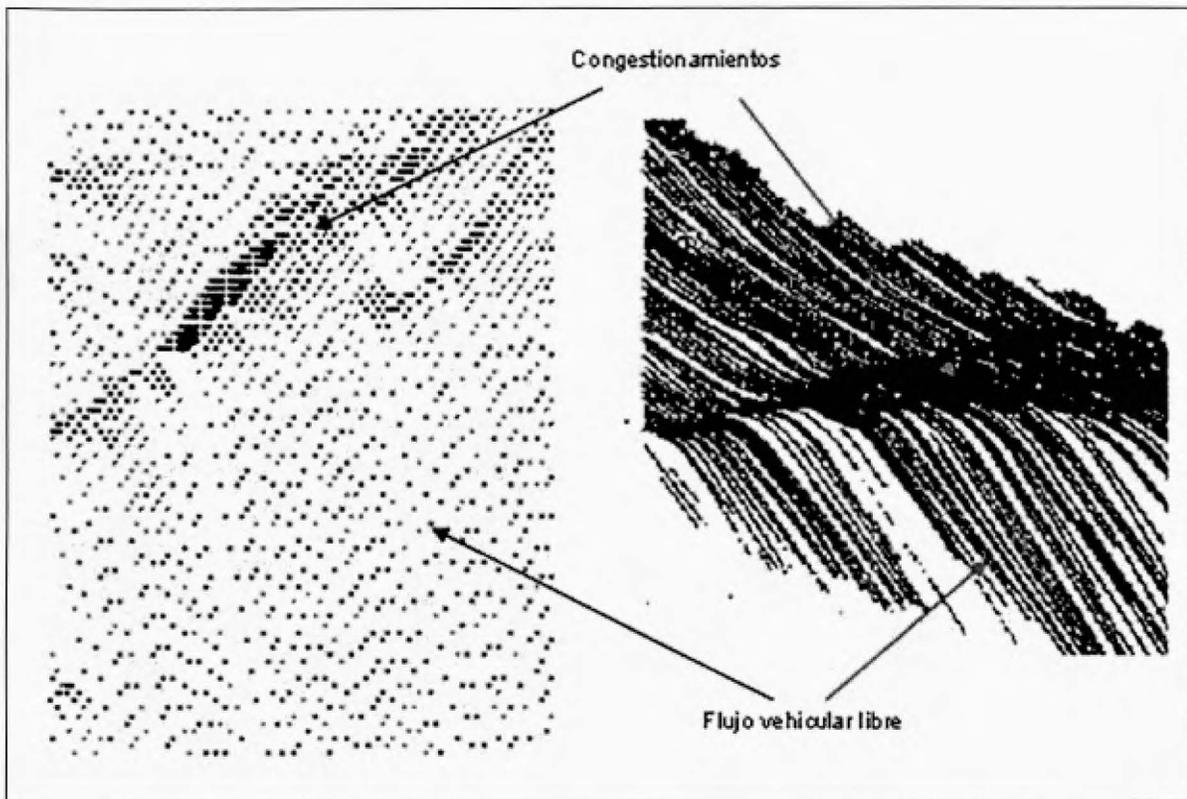


Fig. 2 Simulación vs. Observación empírica. Izquierda, simulación en un canal. En la imagen derecha las trayectorias de los vehículos individuales fueron dibujadas a partir de fotografías aéreas tomadas en un canal de una autopista del Estado de Ohio, USA (tomado de J. Teisterer: Ohio State Technical Report No. PB 246 094, 1975).



Fig. 3 Puente elevado del final Avenida Río de Janeiro. Las Mercedes Municipio Baruta, Caracas DC (tomado del sitio GoogleEarth).



Fig. 4 Tramo curvo de Carretera Vieja de Baruta. Las Mercedes Municipio Baruta, Caracas DC (tomado del sitio GoogleEarth).

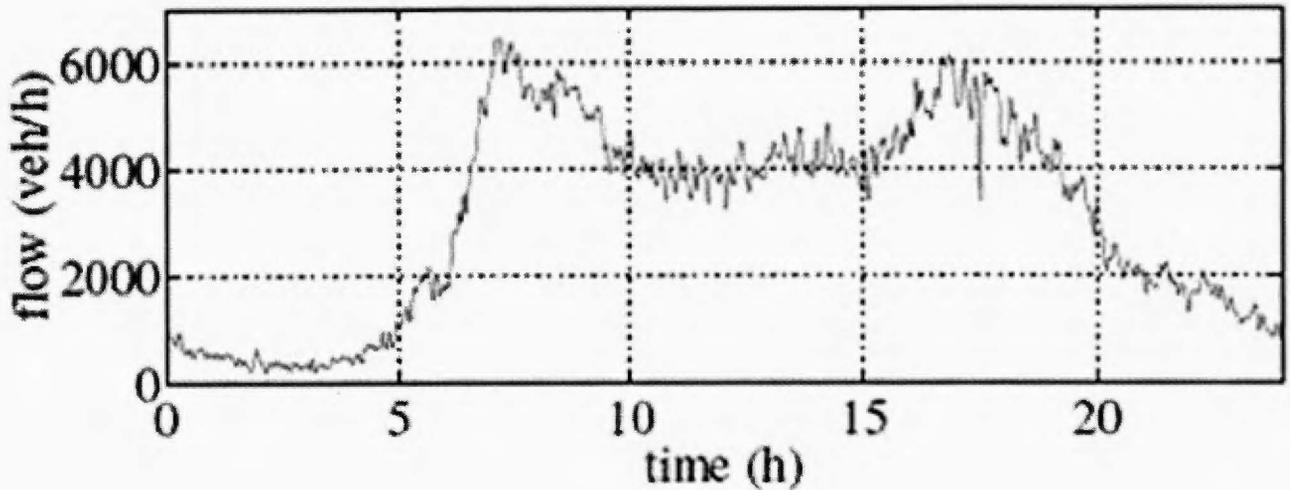


Fig. 5 Flujo vehicular en función del tiempo medido en la autopista E17 Gent-Antwerp en Bélgica (tomado de T. Bellemans, B. de Schutter & B. De Moor: *Models for Traffic Control*, 2 de marzo de 2000).

Para una validación cuantitativa del modelo son necesarios datos reales recopilados en vías cuyas configuraciones geométricas se asemejen a las implementadas en cada uno de los módulos del modelo emergente propuesto. Tal como se hizo referencia anteriormente, en la ciudad de Caracas no se ha llevado a cabo hasta ahora un levantamiento sistemático de información de tráfico a gran escala. Sólo están disponibles datos de flujo vehicular provenientes de conteos mecánicos realizados en algunos puntos de la ciudad. En el año 2002 la Alcaldía del Municipio Baruta realizó un levantamiento de información de tráfico en puntos selectos de la urbanización las Mercedes, al sur-este de la ciudad. Estos datos están reportados en [23]. De todas las locaciones donde se realizaron mediciones, dos poseen características geométricas que permiten comparar con las simulaciones: un puente elevado de dos canales esencialmente rectilíneos (dirección este-oeste), y un sector curvo de la Carretera Vieja de Baruta con una vía de ida (dirección oeste-este) y otra de vuelta (dirección este-oeste), ambas con un solo canal de circulación.

Las figuras 3 y 4 muestran imágenes satelitales del puente elevado y del sector curvo de carretera. Para el puente elevado no se realizaron mediciones (conteos mecánicos) individuales en cada canal. La referencia [23] reporta solamente el flujo "promedio"

de los dos canales. Para la carretera sí se realizaron mediciones separadas para la vía de ida y para la vía de vuelta.

Los conteos mecánicos se realizaron simultáneamente en todas las locaciones entre los días 20 y 26 de febrero de 2002, ambos inclusive. Se reportaron 24 mediciones del flujo vehicular para cada día, entre la 1 de la madrugada y las 12 de la medianoche del día siguiente. Para llevar a cabo las comparaciones, las mediciones se ordenaron de menor a mayor, comenzando con los valores correspondientes de las 5 am (flujo mínimo). Salvo para los días sábados y domingos, típicamente los conteos diarios siguen una tendencia similar a la curva mostrada en la Fig.5, la cual fue obtenida en la autopista E17 Gent-Antwerp en Bélgica.

Es importante destacar que para la validación del modelo se llevarán a cabo comparaciones *vis-à-vis* entre curvas empíricas semejantes a la mostrada en la Fig.5 y las simulaciones. Las comparaciones se realizarán con las primeras 12 mediciones (que incluyen sólo el primer máximo de la curva), por las razones que se exponen a continuación.

En un día laboral típico, la variación del flujo en el intervalo temporal correspondiente a las primeras horas de la madrugada hasta pasado el mediodía, es producto del aumento de la densidad vehicular, consecuencia del incremento progresivo de la pre-

sencia de conductores en la autopista a medida que avanza la mañana. Para cierto valor de la densidad, el flujo alcanza un máximo. Superado el mismo, el flujo comienza a disminuir en la medida que la densidad vehicular continúa aumentando, hasta llegar a su valor mínimo alrededor de la "hora pico": hora en la cual la densidad vehicular en la vía es máxima. Este proceso describe una transición de fase típica, entre una fase de "flujo libre" y otra de "flujo congestionado" tal como lo reporta la literatura [11, 17, 18, 19].

A partir de la hora pico, se invierte el proceso en la medida que disminuye gradualmente la densidad vehicular, producto de la disminución del número de conductores que utilizan la autopista. Sin embargo, al irse aproximando la siguiente "hora pico", la densidad vehicular comienza a incrementarse nuevamente y se repite el proceso descrito en el párrafo anterior. Hacia las horas de la madrugada, el flujo alcanza de nuevo un valor mínimo, consecuencia de la ausencia casi total de conductores en la vía. Al avanzar el día, el ciclo comienza de nuevo, y así sucesivamente.

El modelo emergente propuesto ha sido implementado de manera de simular la primera transición de fase descrita, correspondiente a la primera etapa del ciclo mencionado en el párrafo anterior (el que incluye la primera "hora pico", el primer máximo de la curva).

La dinámica vehicular se simula fijando valores para los parámetros a los que se hizo referencia al inicio de este apartado, vale decir, densidad vehicular relativa de los canales o vías, probabilidades de frenado, etcétera. Pero, ¿es posible encontrar valores de estos parámetros que reproduzcan la tendencia de los flujos vehiculares reales reportados en [23] para el puente elevado y el sector curvo de carretera?

4. Resultados y discusión

Se comienza este apartado abordando la interrogante planteada al final de la sección anterior. En efecto, es posible encontrar valores de los parámetros de manera de

reproducir las tendencias observadas empíricamente, por ejemplo, para el flujo vehicular.

Para comenzar, considérese el puente elevado. Éste se modela, como ya se mencionó, como un sector rectilíneo de autopista con dos canales de circulación de igual longitud, con los autos circulando en el mismo sentido (este-oeste). Como ya se hizo referencia, se escogerán las siguientes magnitudes como parámetros de ajuste: densidad vehicular relativa de los canales ($df_{21} = \rho_2 / \rho_1$, ρ_1 , densidad canal derecho, ρ_2 densidad canal izquierdo), las probabilidades de frenado en cada canal (p_{c1} , p_{c2}), la media y la varianza de las distribuciones de velocidades para cada canal (v_{max1} , S_{v1} , v_{max2} , S_{v2}); siete parámetros en total.

En la Fig.6 se muestran en puntos (cuadrados, triángulos, rombos y círculos), valores empíricos del flujo vehicular en función del tiempo, correspondientes a cinco días de mediciones (normalizados a la unidad), para el puente elevado, para ocho horas de desempeño (de 5 am a 12 m). No se incluyen los días sábado y domingo. La línea punteada representa flujos vehiculares (normalizados) obtenidos de simulación, para un cierto conjunto de valores de los 7 parámetros de ajuste.

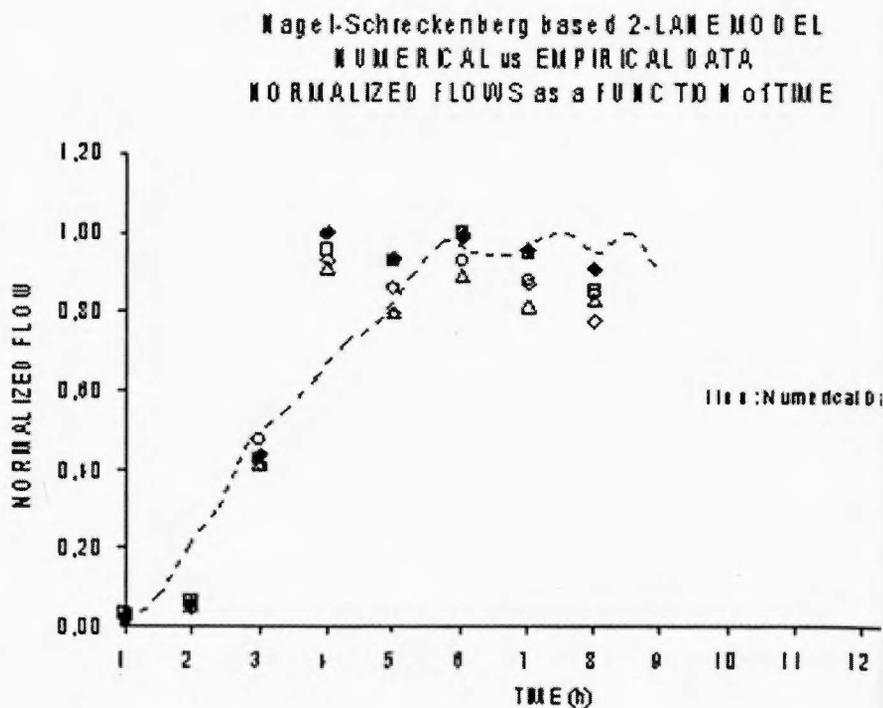


Fig. 6 Comparación resultados flujos normalizados simulados y empíricos, para un sector rectilíneo de dos canales de circulación (puente elevado).

El proceso de búsqueda de los mejores parámetros se realizó por medio de un proceso de ensayo y error, en el que se varían de forma aleatoria los valores de los 7 parámetros, de manera de reducir las diferencias entre los valores de los flujos medidos y los simulados. Ciertamente realizar este proceso manualmente es tedioso y poco práctico. Idealmente lo más conveniente sería utilizar un algoritmo iterativo que incorpore rutinas de optimización para la búsqueda del mínimo global, donde el modelo emergente propuesto para el puente elevado con sus siete variables, sea la función a optimizar. No obstante, para el alcance del presente trabajo los resultados presentados en la Fig.6 se consideran satisfactorios y reproducen *grosso modo* la tendencia de los flujos vehiculares medidos empíricamente para el puente elevado.

gún los estándares vigentes en ingeniería vial [24]. La misma consiste de dos tramos rectos unidos a un segmento curvo central (subtendiendo un ángulo $\Delta\Theta$), a través de sendas curvas conocidas como espirales de transición o *clotoides* (resaltadas en rojo en la figura).

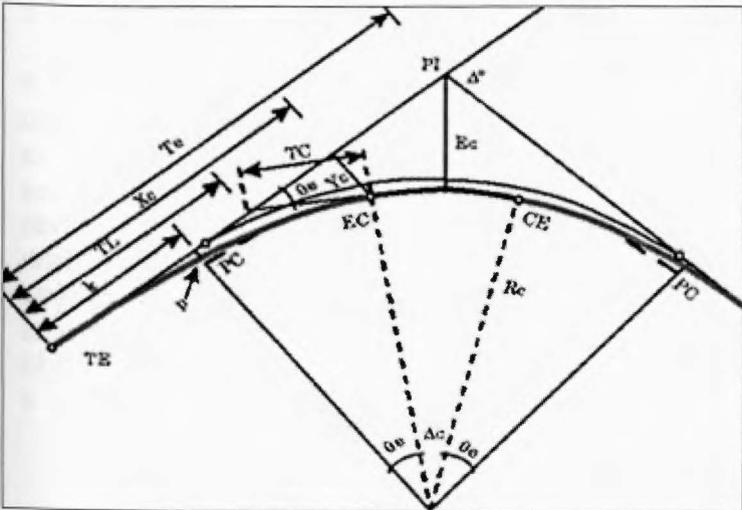


Fig. 7 Elementos de una curva circular con curvas de transición (clotoides) (tomado del curso Diseño de Carreteras Rurales, UCAB 2002).

En el caso del sector curvo de carretera, la función a optimizar depende de 9 parámetros: densidad vehicular relativa de las vías ($d_{cg} = \rho_c / \rho_g$, ρ_g densidad de la vía de ida, ρ_c densidad de la vía de vuelta), las probabilidades de frenado en cada vía (p_{cg} , p_{cc}), la media y la varianza de las distribuciones de velocidad en cada una de las vías (v_{max_g} , S_{v_g} , v_{max_c} , S_{v_c}), el ángulo de curvatura (Θ) y el llamado factor de longitud f_{long} , el cual toma valores iguales o mayores a 1. Las dos últimas magnitudes están relacionadas, como se verá más adelante, con la geometría de la carretera curva. La Fig.7 presenta esquemáticamente el diseño de una carretera, se-

Nagel-Schreckenberg based 1-LANE MODEL 1-CURVED ROAD
NUMERICAL vs EMPIRICAL DATA
NORMALIZED FLOWS as a FUNCTION of TIME

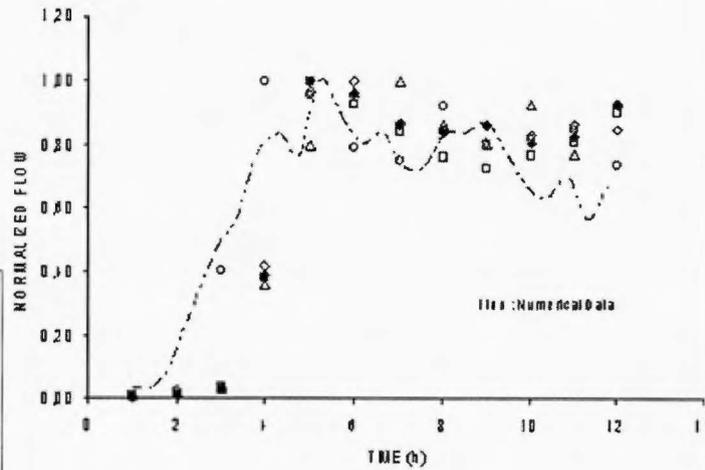


Fig. 8 Comparación resultados flujos normalizados simulados y empíricos, para sector curvo Carretera Vieja de Baruta: vía de ida (dirección este-oeste).

Nagel-Schreckenberg based 1-LANE MODEL 1-CURVED ROAD
NUMERICAL vs EMPIRICAL DATA
NORMALIZED FLOWS as a FUNCTION of TIME

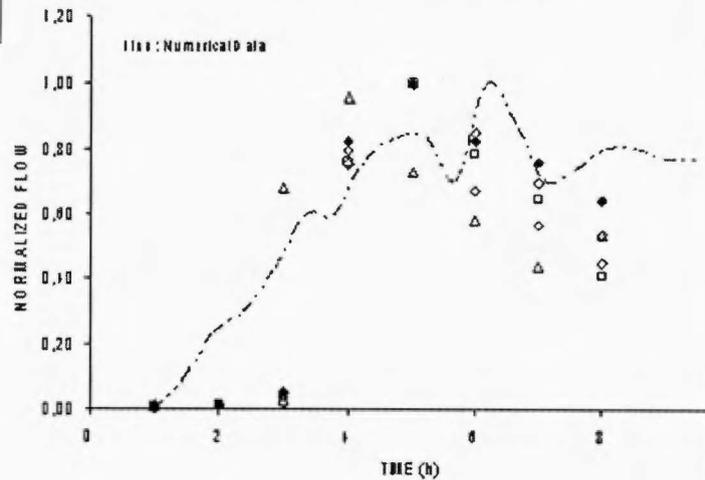


Fig. 9 Comparación resultados flujos normalizados simulados y empíricos, para sector curvo Carretera Vieja de Baruta: vía de vuelta (dirección oeste-este).

En el modelo propuesto en este trabajo, el diseño de la carretera se simplificó a dos sectores rectos idénticos de longitud l , unidos por un arco de circunferencia de radio $R = l f_{long}$ y longitud $S = R \Theta$. La longitud de los segmentos rectilíneos se calcula por la relación $l = n / (2 + \Theta f_{long})$, siendo n el número total de celdas en cada canal o vía.

A diferencia del puente elevado, para el sector curvo de carretera seleccionado (Fig. 4), existen conteos mecánicos tanto para la vía de ida como para la vía de vuelta. Con un procedimiento de ensayo y error semejante al utilizado para el puente elevado, se buscaron los valores de los parámetros de manera que la diferencia entre los flujos vehiculares medidos y simulados fuera la menor posible. Las figuras 8 y 9 muestran los resultados. Los puntos (cuadrados, triángulos, rombos y círculos) representan, igual que antes, los flujos vehiculares empíricos normalizados, obtenidos de los conteos mecánicos efectuados en cada vía, para cada uno de los cinco días laborales considerados. De nuevo, el modelo emergente propuesto reproduce satisfactoriamente las características generales de la dinámica vehicular en las vías de ida y vuelta del sector curvo seleccionado (ver Fig. 4) de la Carretera Vieja de Baruta.

Los ajustes presentados, en particular los mostrados en las figuras 8 y 9, pueden ser mejorados, como ya se hizo referencia, si se aplican técnicas de optimización en un algoritmo automático que incorpore además una función objetivo que incluya criterios de comparación que tomen en cuenta, además del flujo, mediciones de otros observables de interés, como por ejemplo, la velocidad promedio de los vehículos. Adicionalmente, el modelo emergente presentado puede ser mejorado al incorporar CBA, particularmente para el sector curvo de carretera, junto con vehículos de diferentes tipos, esto es, carros, camiones, autobuses, minibuses, etcétera. Si se hace uso de las CBA, el número de vehículos que entran y el número de vehículos que salen podrían también ser incluidos dentro de los parámetros de ajuste. Actualmente se está trabajando en la implementación de éstas y otras mejoras al modelo.

5. Conclusiones y comentarios finales

Se implementó un MMCEBAC para simular el comportamiento y desempeño del tráfico automotor

en dos locaciones de la ciudad de Caracas: un puente elevado con dos canales rectilíneos de igual longitud y sentido de circulación, y, un sector curvo de carretera con una vía de ida y otra de vuelta, encontrándose que el modelo emergente propuesto reproduce cualitativa y cuantitativamente las características más relevantes del tráfico vehicular reportadas para el elevado de Las Mercedes y un sector de la Carretera Vieja de Baruta.

Con el propósito de tomar en cuenta aspectos relacionados con el comportamiento de los conductores, el modelo emergente propuesto asigna las velocidades de los vehículos a través de una distribución gaussiana, de manera de tomar en cuenta que no todos los conductores acatan los límites de velocidad establecidos.

Para la validación del modelo se compararon *vis-à-vis* valores de flujos vehiculares simulados y medidos empíricamente (conteos mecánicos).

Específicamente para los casos presentados, el puente elevado y sector curvo de carretera, el modelo emergente propuesto reproduce *grosso modo* las tendencias de los flujos vehiculares empíricos reportados. Se lograría un mejor ajuste, incorporando mejoras al modelo emergente propuesto, así como también técnicas de optimización para la búsqueda del mínimo global de funciones de múltiples variables (variables continuas y discretas), siendo el modelo emergente propuesto aquí la función a optimizar.

Referencias

- [1] D. J. Dailey y N. Taiyad. *A Cellular Automata Model for Use with Real Freeway Data*. Washington State Transportation Center (TRAC). Enero, 2002.
- [2] Yang Q., Koutsopoulos H. y Ben-Akiva M. *A Simulation Laboratory for Evaluating Dynamic Traffic Management Systems*. 79th Annual Meeting of Transportation Research Board. Noviembre, 1999.
- [3] del Río J. A. y Lárraga M. E. *Transient Situations in Traffic Flow: Modelling the Mexico City Cuernavaca Highway*. Centro de Investigación en Energía Universidad Nacional Autónoma de México. Enero, 2005.

- [4] Hafstein S. F., Chrobok R., Pottmeier A., Wahle J. y Schreckenberg M. *Cellular Automaton Modelling of the Autobahn Traffic in North Rhine-Westphalia*. Gerhard Mercator University Duisburg, Alemania.
- [5] Schreckenberg M., Chrobok R., Hafstein S. F. y Pottmeier A. *OLSIM-Traffic Forecast and Planning using Simulation*. University of Duisburg-Essen Lotharstr, Duisburg Alemania.
- [6] Pottmeier A., Chrobok R., Hafstein S. F., Mazur F. y Schreckenberg M. "OLSIM: Up-to-Date Traffic information on the Web". *Physics of Transport and Traffic*. University of Duisburg-Essen, Duisburg Alemania.
- [7] Esser J. y Schreckenberg M. *Microscopic Simulation of Urban Traffic Based on Cellular Automata*. Gerhard-Mercator-University-Duisburg, Alemania. Junio 1997.
- [8] Ben-Akiva M., Cortes M., Davol A., Koutsoopoulos H. y Toledo T. *MITSIMLab: Enhancements and Applications for Urban Networks*. Massachusetts Institute of Technology. Civil and Environmental Engineering. Cambridge USA. Noviembre 1999.
- [9] Chopard B., Dupuis A. y Luthi P. *A Cellular Automata Model for Urban Traffic and Its Application to the City of Geneva*. University of Geneva. Suiza.
- [10] Chopard B., Dupuis A. y Luthi P. *Parallel Simulation of Traffic in Geneva Using Cellular Automata*. University of Geneva. Suiza.
- [11] Chowdury D., Santen L. y Schaschneider A. *Statistical Physics of Vehicular Traffic and Some Related Systems*. Institut für Theoretische Physik, Universität zu Köln, Alemania.
- [12] Hoogendoorn S., Bovy P. *State-of-the-Art of Vehicular Traffic Flow Modelling*. Delft University Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Transportation and Traffic Engineering Section. Holanda.
- [13] Burghout W. *Hybrid Microscopic-Mesoscopic Traffic Simulation*. Doctoral Dissertation. Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia. 2004.
- [14] Taplin J. *Simulation Models of Traffic Flow*. Department of Information Management and Marketing, University of Western Australia, Australia.
- [15] Nagel K. y Schreckenberg M. *A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic*. *J. Physique I* 2, 2221-2229. 1992.
- [16] Zhang H. M. y Kim T. *Understanding and Modelling Driver Behavior in Dense Traffic Flow*. University of California Transportation Center, USA. Octubre 2002.
- [17] Nagel K., Wolf D., Wagner P. y Simon P. *Two-lane Traffic Rules for Cellular Automata: A Systematic Approach*. Los Alamos National Laboratory, NM USA. 1997.
- [18] Nagel K., Wolf D., Wagner P. y Simon P. *Two-Lane Traffic Rules for Cellular Automata: A Systematic Approach*. *PHYSICAL REVIEW E*, Vol. 58, NO. 2. Agosto 1998.
- [19] Schreckenberg M. y Nagel K. *Physical Modeling of Traffic with Stochastic Cellular Automata*. Los Alamos National Laboratory, NM USA.
- [20] Daoudia A. y Moussa N. *Numerical Simulations of a Three-Lane Traffic Model Using Cellular Automata*. *CHINESE JOURNAL OF PHYSICS* Vol. 41, NO. 6. Diciembre 2003.
- [21] Aponte A. *Modelaje de Tráfico Automotor Mediante Autómatas Celulares*. Jornadas de Investigación de la Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Noviembre 2005.
- [22] Aponte A. *Modelaje del Tráfico Automotor en una Carretera Mediante Autómatas Celulares*. LV Convención Nacional de AsoVAC. Universidad Central de Venezuela (UCV) Noviembre 2005.
- [23] Urbanismo y Vialidad URVISA. *Estudio de Circulación y Diagnóstico*, Alcaldía de Baruta. Junio 2002.
- [24] Miralles W. *Curso de Vías de Comunicación*. Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Octubre 2004.