

SIMULACIÓN MICROSCÓPICA DEL TRÁNSITO

Esp. Juan Carlos Montenegro Arjona. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería - Facultad de Ingeniería UNAM. jcmontenegroa@unal.edu.co

Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas. Instituto de Ingeniería UNAM – Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales

RESUMEN.

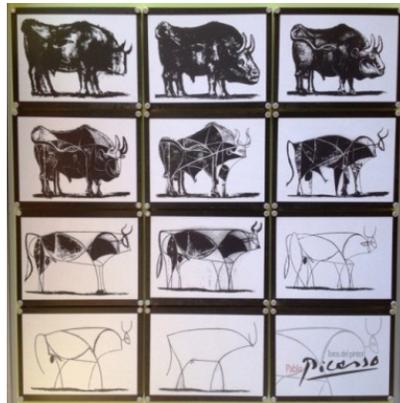
Existe una amplia variedad de posibilidades de software técnico para el desarrollo de modelos que permitan replicar las condiciones del tránsito y el transporte y a partir de ellos analizar y/o plantear soluciones, ante lo cual surge la pregunta ¿cuál es el mejor software para el análisis del tránsito?, una respuesta adecuada podría ser “aquel que el ingeniero a cargo del proyecto mejor conozca y maneje”. Se debe considerar que no hay un software de microsimulación que por sí mismo sea superior a los demás, simplemente hay modeladores que saben potencializar de mejor manera un software que otro, básicamente porque lo conocen y lo saben manejar adecuadamente, identifican el valor apropiado de los parámetros para su calibración, saben que factores deben emplear, como debe alimentarse la información y como deben interpretarse los resultados, pero por sobre todo, conocen y son conscientes de las limitaciones que el software tiene. El trabajo realizado revisó y aplicó tres diferentes programas de cómputo de microsimulación (Synchro-SimTraffic, S-Paramics y Lisa+), centrándose específicamente en los parámetros que permiten describir las características del flujo de tráfico y operación del sistema modelado, los cuales tienen efectos significativos sobre los resultados de simulación. Aunque estos modelos proporcionan un conjunto de valores predeterminados para cada parámetro y los usuarios pueden llevar a cabo una simulación sin calibrarlos, los valores por defecto no siempre pueden ser representativos de la situación del tráfico en estudio, por lo que es conveniente conocer cuál de ellos debe ser modificado en función del análisis a realizar.

Palabras Clave. Microsimulación, Tránsito, Modelación, SimTraffic, S-Paramics, Lisa+

INTRODUCCIÓN

La construcción de modelos constituye una de las actividades naturales del ser humano, siendo su primera habilidad cognitiva en la comprensión, entendimiento y transformación del medio que lo rodea. A esta acción de construir un modelo para comprender el entorno y su funcionamiento se le denomina “modelación”. La modelación supone la aplicación de condiciones y circunstancias conocidas por el modelador y obedecen, principalmente, a su experiencia, además de involucrar las variables que se identifican como fundamentales en la interacción de las situaciones a modelar.

SIMULACIÓN MICROSCÓPICA DEL TRÁNSITO
Montenegro, Juan Carlos; Lozano, Angélica



Como lo permite ilustrar esta serie de litografías, la modelación / simulación de tráfico debe seguir el proceso de abstracción; desde la observación del sistema a estudiar, lleno de detalles, hasta la simplicidad de las ecuaciones que lo representen (en función de las relaciones entre sus elementos)

Pablo Picasso, Toro (litografías 1 – 11) 1945

Figura 1. La abstracción, clave en los procesos de modelación

Como marco conceptual para este artículo, es procedente retomar la explicación que el Dr. Jaume Barceló¹ planteó en una de sus presentaciones: “se construyen modelos para experimentar con ellos en búsqueda de respuestas a una serie de preguntas sobre el sistema estudiado (el modelo es una herramienta para adquirir conocimiento sobre un sistema) y de esta forma servir de sustento, de una manera racional, a un proceso de toma de decisiones”.

Dependiendo del nivel de interacción entre los elementos que conforman el sistema considerado en el proceso, podemos reconocer tres niveles principales de modelación: Macroscópica en la cual se emplean modelos que utilizan variables agregadas, es decir, aquellas que resumen las condiciones y la información de múltiples vehículos, por ejemplo, la velocidad media de un grupo vehicular, la cual contiene la información sobre la velocidad de todos los vehículos presentes en una sección dada del camino y a partir de la cual se describe la situación del tráfico; Mesoscópica en la cual se emplean modelos matemáticos con algoritmos de mayor grado de especificación que la considerada en la simulación macroscópica, pero sin llegar a detallar la interacción de los elementos esenciales del modelo, principalmente estudia el comportamiento de flujos y corrientes vehiculares incorporando ecuaciones de interacción entre estos elementos; Microscópica la cual se ocupa de la interacción directa entre los elementos que componen y caracterizan el sistema analizado, mediante la aplicación de modelos matemáticos que contemplan el movimiento y las características operativas específicas de cada una de las unidades de estudio, describiéndolos de manera individual, mediante modelos dinámicos y estocásticos y definiendo un tipo de comportamiento para cada elemento.

Los modelos de microsimulación pueden ser considerados como representaciones o estimaciones complejas de un escenario de tráfico, en las cuales se requiere el uso de herramientas computacionales y software especializado para su montaje, configuración y calibración. El *Transportation Research Board* los define como “modelos matemáticos donde se experimenta con eventos de tráfico en una infraestructura de transporte durante periodos de tiempo definidos”.

¹ Director Científico del Área TIC y Movilidad del CENIT, Universidad Politécnica de Cataluña – presentó “Modelos, Modelos de Tráfico, Simulación, Simulación de Tráfico”. Primera Reunión de Modelos Matemáticos para Transporte, Instituto de Ingeniería de la UNAM – Abril 2012

Éstos se han venido aplicando desde hace ya más de una década como apoyo para la toma de decisiones en la ingeniería del tránsito y, en algunos casos, también como herramienta de apoyo a la planificación del transporte, ocupándose de aspectos como: el análisis de capacidad y de congestión, impactos de acciones propuestas, evaluación de medidas de control del tránsito y operatividad de transporte urbano.

El desarrollo de la tesis de Maestría que soporta este documento se orientó hacia la aplicación de tres diferentes programas de cómputo para microsimulación (Synchro-SimTraffic2, S-Paramics3 y Lisa+4) a las condiciones de operación existentes en una intersección vial compleja de la Ciudad de México DF, y a la comparación de los resultados que arrojaron cada uno de los modelos, con el propósito de identificar cuáles son los parámetros de eficiencia que más inciden en el análisis, así como la verificación de la influencia de los valores que por defecto traen establecidos estos parámetros, cuya función básica es la de caracterizar la operación del tránsito.

EL DETALLE DE LA MICROSIMULACIÓN

En la medida en la cual aumentan las condiciones de congestión y se dificulta la operación vehicular y peatonal en el entorno urbano, se requiere un elemento que agilice el análisis de dichas condiciones y facilite el entendimiento de los posibles resultados que genere la solución planteada a los problemas identificados, sin la necesidad de tener que implementarlos directamente en la vía pública.

En ocasiones las soluciones involucran a más de un elemento en particular o requieren de sofisticados análisis y procesos matemáticos, que ante un cambio en las condiciones de operación, exigen recalcular todo el planteamiento de manera íntegra. La aplicación de modelos microscópicos a las condiciones del tránsito ofrece un amplio espectro de análisis a posibles soluciones, las cuales en ocasiones dependen solamente de una modificación geométrica o del aumento de algunos segundos en un intervalo de verde, permitiendo la obtención de resultados de manera rápida ante el cambio realizado.

Adicionalmente, la representación gráfica de los resultados y la visualización de las condiciones operativas y sus cambios ante una modificación en los parámetros de eficiencia del problema, permite ofrecer un formato comprensible no solo a los expertos, sino también al común de las personas que quieren conocer de manera sencilla las posibilidades ante un cambio propuesto o ante la implementación de una nueva condición de viajes.

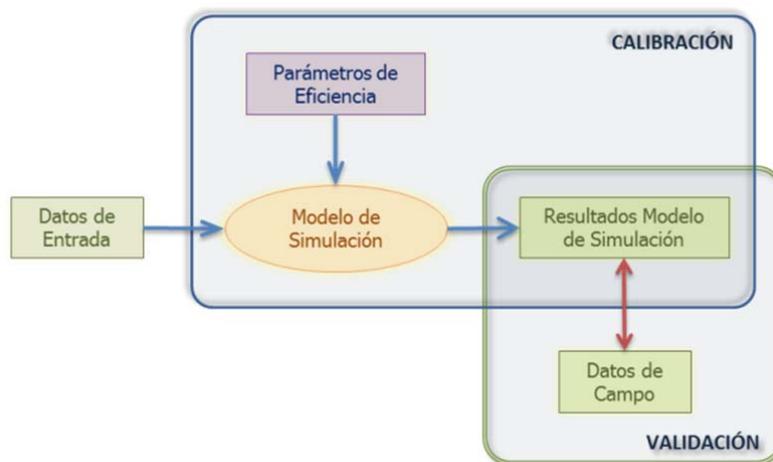
A pesar de la versatilidad de la microsimulación, un aspecto fundamental es el proceso de calibración (ajuste de los valores en los parámetros de eficiencia para generar un modelo válido, con el propósito de replicar las condiciones observadas a partir de datos de campo en un entorno particular) y validación de los resultados obtenidos (se debe comprobar que las predicciones del modelo, una vez fijados los parámetros del mismo, reflejan condiciones

² <http://www.trafficware.com/products.html>

³ <http://www.sias.com/ng/sparamicshome/sparamicshome.htm>

⁴ <http://www.schlothauer.de/es/LISA.html>

cercanas a la realidad observada; los datos de calibración no deben ser los mismos que se empleen para la validación del modelo - Roca, V. (2009)). Dicha situación en ocasiones es pasada por alto y se trabajan los análisis con la aplicación de valores que por defecto se tienen alimentados en los programas de cómputo y que no necesariamente reflejan las condiciones locales analizadas.



Nagui M. Roupail & Jerry Sacks, Workshop on Modeling Trends, Sitges, 2003

Figura 2. Esquemática de los procesos de calibración y validación de modelos

Por esta razón, es relevante preguntarse si todos los programas de cómputo disponibles consideran de la misma manera los elementos básicos que condicionan la movilidad vehicular y peatonal, o si por el contrario, es necesario realizar una modificación a éstos para que las condiciones locales del análisis sean consideradas de la mejor manera en el proceso de microsimulación y de esta forma encontrar la solución buscada.

Otra consideración que se debe realizar, sobre la base del fácil acceso a los programas computacionales de microsimulación, es que los resultados obtenidos, para iguales condiciones analizadas con diferentes paquetes de cómputo, pueden generalmente ser cuestionados debido a la desproporción entre éstos, además de que en ocasiones no corresponden con lo observado en la realidad.

Cualquier simulador que pretenda reproducir de forma realista el comportamiento del tránsito deberá incluir dentro de sus parámetros una diferenciación por tipo de conductor y su influencia en la operación del tránsito por el comportamiento de dicho conductor. La red impondrá límites a través de sus características propias como son la pendiente, la visibilidad, el ancho de los carriles, las restricciones de cambio de carril, entre otras. Los diferentes programas de cómputo consideran estas condiciones y particularidades a través de diferentes modelos matemáticos, dentro de los cuales los más relevantes son:

El modelo de seguimiento vehicular

Este modelo describe cómo un vehículo sigue los vehículos precedentes y reacciona en función de lo observado, por ejemplo, la forma en que un conductor mantiene la distancia de

seguimiento entre si y el vehículo que le precede, o cómo el conductor reacciona a aceleración o la desaceleración de dicho vehículo.

El modelo de seguimiento vehicular utiliza parámetros específicos del vehículo y de la vialidad, como la capacidad de aceleración, la agresividad del conductor o la masa del vehículo. El límite de velocidad y el número de carriles son parámetros específicos de la vía que influyen en la forma en que un vehículo sigue a otro.

De acuerdo con Menneni S. et al (2009), el fundamento del modelo de seguimiento es la división del comportamiento de conducción en cuatro estados diferentes: estado de conducción libre, estado de aproximación a un vehículo más lento con adaptación de la propia velocidad, estado de seguimiento manteniendo la distancia de seguridad, y estado de emergencia por debajo de los límites de seguridad. El conductor cambia de un estado a otro según los umbrales de percepción establecidos, los cuales están definidos en función de la separación y de la diferencia de velocidad con el vehículo precedente

En la simulación, el espaciado deseado se promedia cerca de un segundo, pero varía de conductor a conductor y de vehículo a vehículo tal y como sucede en el mundo real, en donde los conductores más agresivos siguen a los vehículos de manera más cercana que los conductores cautelosos. El acercamiento mismo que el conductor mantiene depende de su propia agresividad, sus características vehiculares, y las características de los que se encuentran a su alrededor.

Brecha de Aceptación

En el trabajo de Jones, Steven L. et al (2004) se menciona que los algoritmos de brecha de aceptación controlan como los vehículos simulados interactúan dentro o a través de las corrientes de tránsito conflictivas. Un ejemplo es un vehículo esperando a girar a una calle principal desde una calle secundaria, o un vehículo esperando en la línea central para hacer un giro izquierdo a través de un tránsito conflictivo.

Por ejemplo, la simulación en CORSIM asume que los conductores que desean hacer un giro esperaran una brecha mínima (medida en segundos) en la corriente de tránsito opuesta o conflictiva antes de que ellos inicien la maniobra de giro. Cualquier tiempo menor la brecha mínima será considerada insegura y será rechazada.

Estas brechas mínimas aceptables son diferentes para distintas maniobras (ej. mayores para giros izquierdos que para movimientos de frente) y además variadas para los tipos de conductores (los conductores agresivos típicamente aceptarán brechas más pequeñas). El qué tan largas o qué tan cortas sean asumidas estas brechas, pueden influenciar significativamente el realismo de la simulación. Los requerimientos de brecha muy altos pueden plantear colas largas irreales debido a que los conductores esperan irrazonablemente brechas amplias en el tránsito antes de hacer los giros. Brechas muy cortas pueden producir comportamientos de conducción agresivos (e inseguros) irreales y subestimar demoras de giro en intersecciones.

Una debilidad de los parámetros de la brecha de aceptación en CORSIM es que es estática, lo que significa que los conductores insistirán en la brecha mínima “ideal” en el tránsito sin importar cuánto tiempo llevan esperando. En la realidad, muchos conductores considerarán brechas menores conforme su tiempo de espera aumente.

Cambio de Carril

De acuerdo con lo expresado por Jones, Steven L. et al (2004), los algoritmos de cambio de carril controlan cómo los vehículos se combinan, mezclan y hacen cambio de carril dentro de la corriente de tránsito. Los cambios de carril son maniobras complicadas que involucran el comportamiento de los conductores, desempeños vehiculares y condiciones hacia adentro de la corriente de tránsito.

Los conductores pueden elegir cambiar de carril por diferentes razones las cuales comúnmente incluyen cambios de carril obligatorios (ej. un carril esta obstruido, se termina o se convierte un carril de giro), cambios de carril de posicionamiento (ej. poniéndose ellos mismos en un carril correcto para dar una vuelta) y cambios de carril discrecionales (ej. cambiando de carril para pasar a un vehículo de menor velocidad). Una vez que han decidido hacer un cambio de carril, los conductores deben encontrar una brecha grande aceptable en la corriente de tránsito adyacente y asegurarse de que no hay diferencias en velocidades entre los vehículos que harán la maniobra peligrosa (por ejemplo, un vehículo más despacio saliendo en frente de un vehículo mucho más rápido).

Es por esta complejidad que el comportamiento de cambio de carril es de lo más difícil de modelar y por lo que es comúnmente la fuente de irregularidades en la simulación. Estas irregularidades pueden no ser notorias en condiciones de tránsito en donde solo cambios de carril escasos o moderados se llevan a cabo, pero en situaciones en donde la combinación o mezcla de movimientos es considerable puede haber grandes variaciones entre lo que se modela y lo que en realidad se observa en campo.

Considerando el impacto significativo que tiene el cambio de carril en la micro simulación de tránsito, Ben-Akiva et al establecieron un estado del arte sobre avances logrados hasta el año 2006, en los modelos básicos utilizados y sus variaciones. Allí se presentan los desarrollos y mejoras en los siguientes aspectos:

- La integración de modelos de cambio de dos tipos: obligados (Mandatory Lane Change - MLC) y discrecionales (Discretionary Lane Change - DLC) en un solo marco. En este caso, se incorporan variables como la necesidad de estar en el carril correcto y de evadir obstáculos, la velocidad relativa y la facilidad de circular en el carril o en los alrededores. Los modelos revelan las grandes ventajas de integración de MLC y DLC en cuanto a la simulación de condiciones más realistas, evitando las limitaciones que se tenían al usar modelos de análisis independientes.
- La inclusión de la selección explícita de un carril preferente de circulación, percibido por un conductor, como el mejor para tomar en cuenta múltiples factores en el proceso de decisión. Existen factores importantes que afectan el proceso: las características micro y macroscópicas del flujo vehicular en el carril (vehículos

pesados, velocidad media y densidad), el impacto del plan de trayectoria y el factor de inercia, además de las características del conductor (agresividad, por ejemplo).

- La incorporación de varios tipos de mecanismos para el cambio, como ceder el paso o carriles cooperativos (de salida a paralela) y de incorporación. Para este último caso, la decisión se modela mediante el criterio de intervalo aceptable. En estas decisiones juega un papel importante la velocidad y la aceleración

En todos los casos revisados se utilizó la herramienta MITSIMLab desarrollada por Yang y Koutsopoulos en 1996.

Es de resaltar que los parámetros de cambio de carril deben ser cuidadosamente codificados en todos los modelos de simulación, ya que tienen un gran impacto en el desempeño de la red. Comportamientos de cambio de carril irreales pueden crear demoras excesivas en donde no existen. Alternativamente, puede sugerir mejores condiciones que las observadas, causando que el usuario pase por alto puntos potenciales de estrangulamiento. Nuevamente, los impactos de cambio de carril serán menos aparentes bajo condiciones de baja densidad, pero conforme las condiciones se acerquen a la capacidad, los impactos pueden ser substanciales.

El modelo de adelantamiento

Este modelo describe cómo un conductor decide o no rebasar a su predecesor, quien avanza más lento; la condición más sencilla para el adelantamiento ocurre cuando la vía es de un único sentido y el vehículo que adelanta realiza dos maniobras consecutivas de cambio de carril, primero al de la izquierda y posteriormente de regreso al carril derecho. La condición descrita se torna compleja cuando la maniobra implica el uso de un carril adyacente que tiene sentido de circulación contraria al del desplazamiento del vehículo que se desea adelantar.

En cualquiera de los casos mencionados la característica importante del modelo es la velocidad deseada por el conductor, la cual está en función de sus capacidades y de la aceleración del vehículo, además del número de carriles y la direccionalidad de la vialidad, condición que influencia la forma de lograr este comportamiento. La interacción entre vehículos también es importante, dado que un conductor se decidirá a adelantar o no a otro, basado en la diferencia de velocidades de su carril y la del carril adyacente (en el caso de circulación en un solo sentido), así como en el espaciamiento disponible entre los vehículos que circulan por el carril adyacente.

Autómatas Celulares

La modelación microscópica también puede ser implementada a partir de los modelos autómatas celulares. Nagel, K. (1996) indica que este modelo describe la vialidad como una red de células conectadas dentro de la cual el comportamiento de un vehículo se describe a en función de su posición en cada celda y en relación con la celda adyacente. Cada célula está dimensionada en función de la longitud media de un vehículo y puede estar vacía o

contener exactamente un vehículo. El modelo microscópico se basa en un sistema de reglas que describen cómo los vehículos saltan de una célula a otra, en función de la influencia de las celdas adyacentes; por ejemplo, ningún vehículo puede saltar de una célula a la siguiente si ésta se encuentra ocupada (una célula puede contener solamente un vehículo).

De acuerdo con J. Esser y M. Schreckenberg (1997), el modelo de Autómatas Celulares fue inicialmente definido para vías de un solo carril, las cuales se subdividen en celdas que pueden estar libres u ocupadas por un vehículo, cada uno de los cuales posee velocidad integral positiva. Para cada actualización de la vía, se ejecutan 4 pasos simultáneos para todos los vehículos:

- Definición de la aceleración en función de la velocidad máxima
- Evitar choques en función de la distancia entre vehículos dada por el número de celdas vacías frente a cada vehículo
- La aleatoriedad, para tener en cuenta que el comportamiento individual del conductor representa la dinámica no-determinista del movimiento vehicular.
- Actualización, donde cada vehículo avanza un determinado número de celdas

Cada celda típicamente tiene 7.5m de longitud para representar el espacio promedio que un vehículo toma en un conflicto, valor que se puede ajustar para cada problema específico. Cada paso de tiempo en la simulación, corresponde a un segundo en la realidad. Para modelar vías multicarril, se adicionan reglas para cambios de carril verificando si las celdas adyacentes están libres o no tanto en el momento de la decisión como en el instante siguiente.

Esser y Schreckenberg (1997), desarrollaron una herramienta de microsimulación de tráfico urbano en redes a gran escala, usando autómatas celulares basados en el modelo de Nagel-Schreckenberg. Este modelo de microsimulación permite considerar diferentes tipos de vías e intersecciones, capacidad de estacionamiento, dispositivos de control de tránsito y circulación de transporte público; a pesar de esta complejidad, se han obtenido desempeños eficientes en términos de costo computacional, como por ejemplo lograr que en 20 minutos de tiempo real se modele todo un día bajo condiciones típicas de tránsito. Este tipo de simulaciones, resulta aplicable en la planeación de tráfico y en simulaciones en línea a partir de datos de tráfico en tiempo real, para sistemas dinámicos de administración de tránsito.

Los elementos a considerar para la simulación son:

- Representación de la red, conformada por nodos (intersecciones) y tramos / enlaces.
- Controles de tránsito, principalmente semáforos e intersecciones de prioridad.
- Rutas de los vehículos, a través de la intersección, definidos con aforos direccionales.
- Tipos de vehículo, caracterizados según velocidad máxima, longitud (número de celdas que ocupa) y la probabilidad de realizar cambios riesgosos de carril.
- Entradas y salidas a la red, verificadas mediante conteos vehiculares para verificar los volúmenes.
- Instrumentos de medición y el control de simulación para la calibración del modelo.
- Control de simulación.

VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA MICROSIMULACIÓN

Los modelos empleados en la microsimulación son del tipo estocástico y generan el tráfico, así como las características del binomio vehículo – conductor, a partir de distribuciones estadísticas que emplean números aleatorios; una vez el vehículo es generado e ingresado a la red, el modelo le asigna las características del conductor, estos dos elementos generales (vehículo – conductor) constituyen las variables que inciden en los resultados de la simulación.

Dentro del análisis de los programas de microsimulación de tránsito tradicionalmente se han considerado como las principales variables, más no las únicas, las siguientes: el tipo de flujo, el esquema de seguimiento de vehículos, el esquema de cambio del carril, y la incidencia de fenómenos externos.

Sobre estos elementos es necesario considerar como parámetros fundamentales, o “indicadores de prestación”, los siguientes: la velocidad de circulación (tanto en vehículos como peatones), tipo de vehículo (composición y características físicas), condiciones de aceleración y desaceleración, trayectorias definidas para el movimiento (en secciones continuas y/o a través de intersecciones), distancias mínimas aceptables (espaciamiento y separación lateral), condiciones de visibilidad y tiempos de reacción, flujos de saturación y capacidad vial, tiempos de viaje y demoras. Es importante tomar en cuenta que estos elementos pueden ser considerados de manera individual, pero no se debe olvidar que generalmente funcionan de manera combinada.

Tampoco se debe dejar de lado que el modelo, así como los resultados obtenidos con la simulación realizada a partir de éste, son una representación de la realidad que obliga a plantearse dos preguntas fundamentales, ¿qué certifica que ésta (la simulación) sea aceptablemente válida?, ¿cuál es el error que se está dispuesto a aceptar y que tan grande será la desviación del resultado de la simulación? Las respuestas se centran en la diferencia entre los resultados obtenidos (simulación) y los observados (información de campo), como por ejemplo la longitud de las colas o el volumen movilizado en la red de simulación; es lógico suponer que entre más pequeña sea esta diferencia mayor aceptación tendrá nuestro modelo, por lo que la verificación se apoya en análisis estadísticos que proporcionan los rangos mínimos de aceptación en función del porcentaje de error (% e), calculado como:

$$\% e = \frac{\sum_i |x_i - \hat{x}_i|}{\sum_i x_i} \times 100$$

Independiente de cuál sea el paquete computacional empleado para la simulación, los modelos considerados por éstos ofrecen la posibilidad de “alimentar” los valores para los diferentes variables que inciden en la interacción entre los elementos del tránsito (infraestructura, vehículo y usuario), partiendo de uno que por defecto ya está involucrado en el análisis y que es producto de la calibración realizada por cada desarrollador a partir de las condiciones locales en las cuales haya evolucionado el software, que para el caso latinoamericano son siempre foráneas y basadas en condiciones físico-culturales de Europa y/o Norteamérica principalmente.

En función del software empleado, el analista encontrará diferentes formas y límites dentro de los cuales puede modificar los valores de las variables comentadas, sin embargo es importante destacar que los valores a seleccionar no son a “gusto” o criterio del analista, su fuente está en la observación, recopilación y medición directa en campo de las condiciones de operación de la vía o intersección a estudiar, o sobre una infraestructura de condiciones similares a las que se pretende estudiar (en el caso de simulaciones sobre diseños que aún no se han implementado); para el caso de la tesis que soporta este artículo las Figuras 3 a 5 ilustran algunas de las interfaces más relevantes para la selección de los valores en los software Synchro-Simtraffic, Lisa+ y S-Params.

Para los tres casos contemplados se tomó como base una intersección compleja en el norte de Ciudad de México compuesta por 6 brazos (5 accesos - 6 salidas), con volumen de máxima demanda cercano a 8,000 Veh/h y controlada con semáforos cuya programación contempla cuatro fases, una de las cuales permite izquierdos simultáneos sobre la vía principal. La composición vehicular de la intersección es de 89% de automóviles, 5% de autobuses y 6% de camiones de carga; este volumen arriba de forma casi constante a la intersección lo que se refleja en un factor de hora pico de 0.99 y flujos de saturación cercanos a los 1,900 veh/h – carril.

Las características comentadas y las variables que determinan el esquema operativo de la intersección se alimentaron en los tres paquetes computacionales empleados, para poder identificar las diferencias entre ellos y su incidencia en los resultados de la simulación.

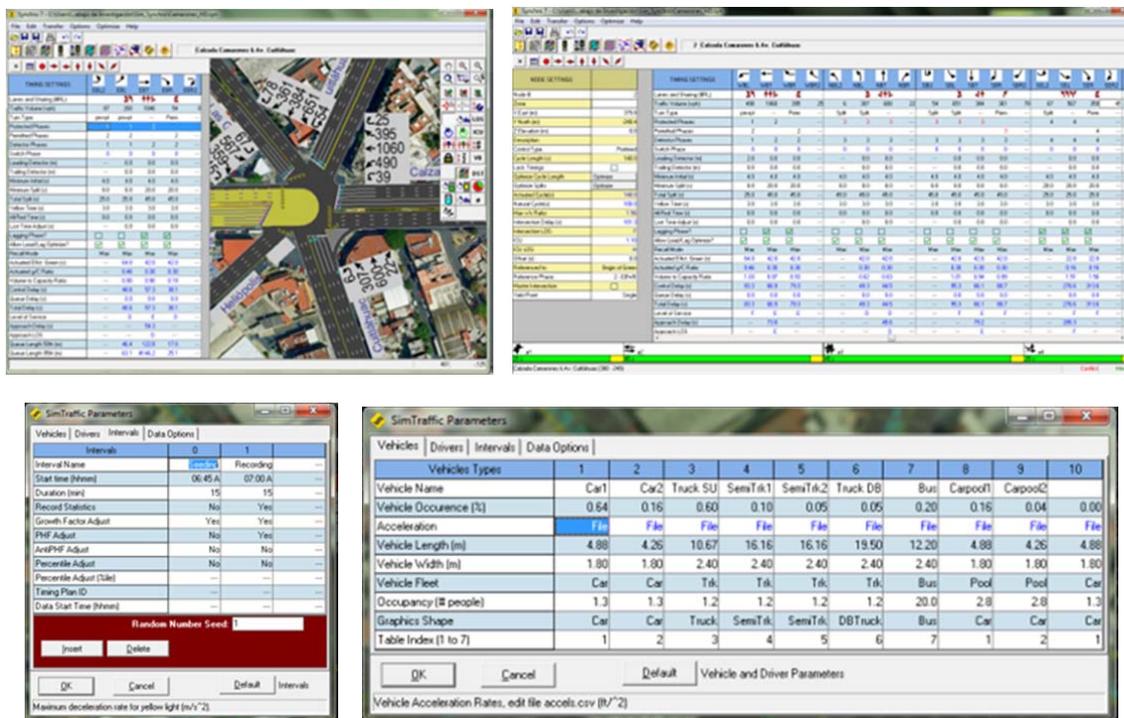


Figura 3. Interface para la selección de valores en variables del software Synchro-Simtraffic

SIMULACIÓN MICROSCÓPICA DEL TRÁNSITO
Montenegro, Juan Carlos; Lozano, Angélica

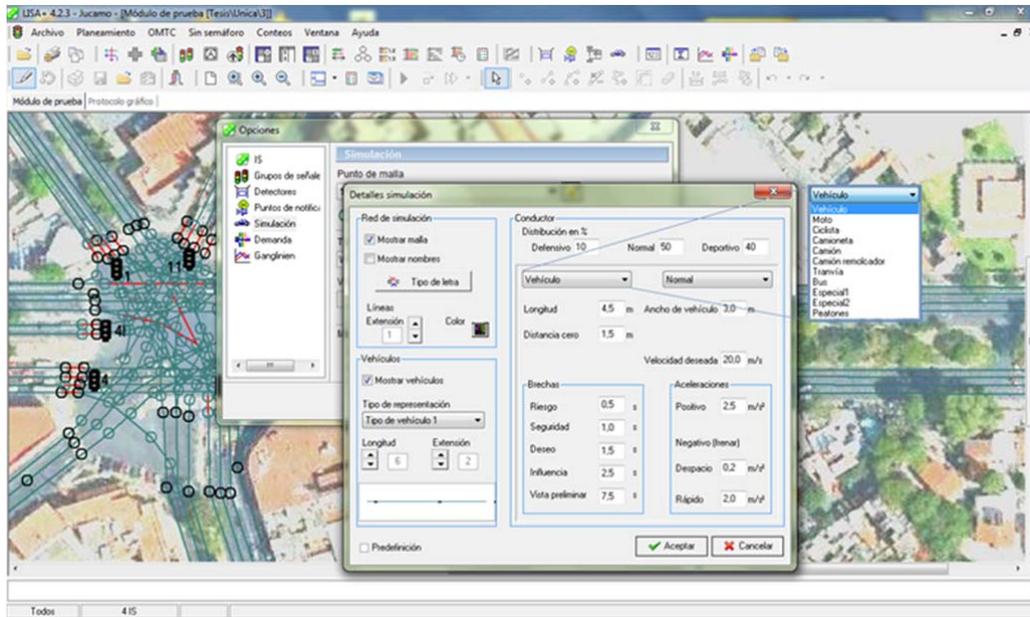


Figura 4. Interface para la selección de valores en variables del software LISA+

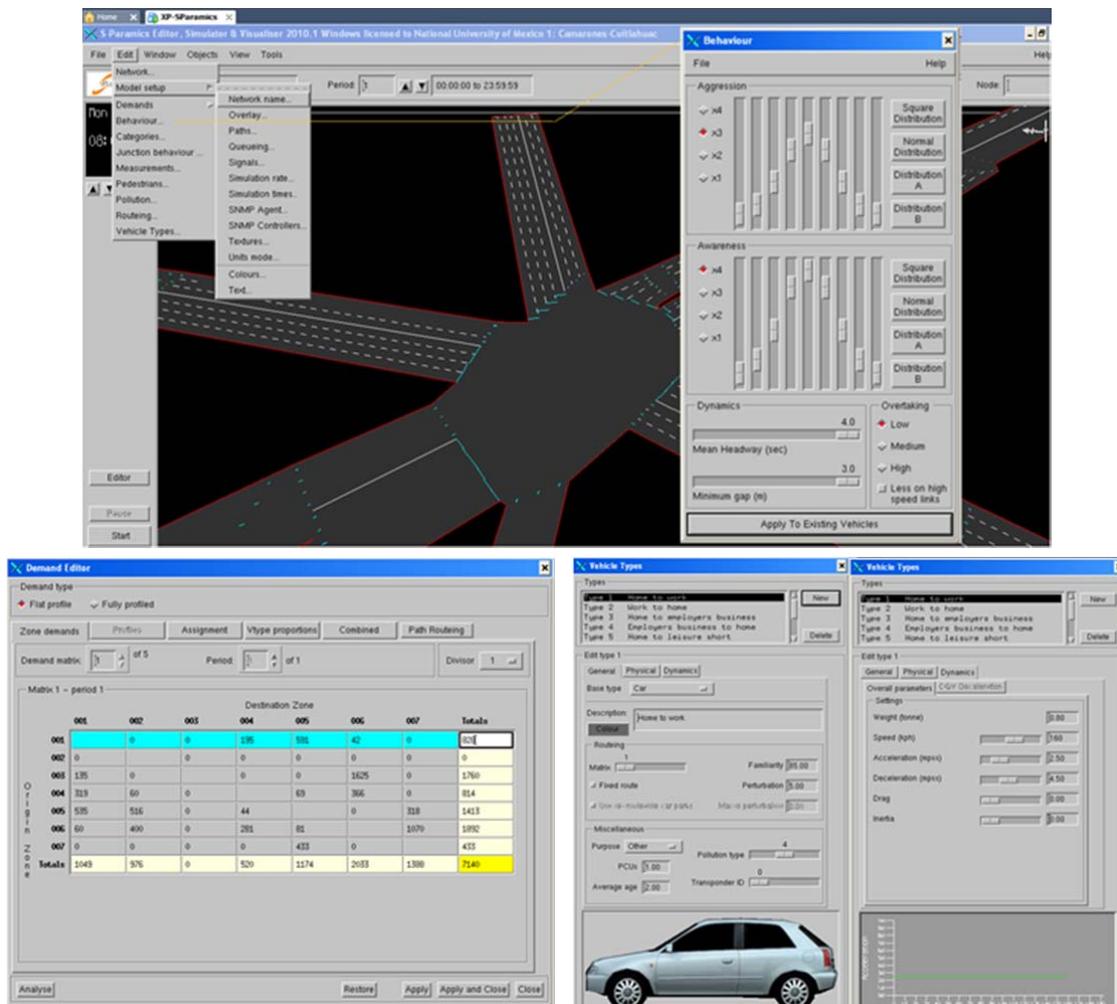


Figura 5. Interface para la selección de valores en variables del software S-Params

En los tres procesos de alimentación, una por cada paquete computacional, se consideraron los mismos valores de información: volúmenes horarios (direccionados y clasificados para la hora de máxima demanda); flujo de saturación (1900 veh/h), ancho de carril (3.5 m), características del conductor (80% del volumen medido se consideró agresivo) y se consideraron iguales, en todos los casos, las condiciones dinámicas del flujo (aceleración y desaceleración) y de control de tránsito (ciclo del semáforo y tiempos de cada fase).

El primer paso en la generación del modelo, independiente del paquete de computación, es la generación de la red sobre la cual se realizará el análisis, en este caso la intersección de Cuicilahuac y Camarones. Al ser una intersección compleja, las dificultades encontradas para la generación de la red se centraron en replicar la configuración geométrica de 5 accesos y 6 salidas, especialmente la consideración de los giros izquierdos simultáneos en dos carriles sobre la Calzada Camarones. Esta situación fue particularmente complicada de replicar en S-Paramics y la solución fue la de separar en enlaces diferentes las calzadas de movimiento directo y las de giro izquierdo, asignando zonas de generación y atracción independientes en cada una (para los demás vías se empleó un solo enlace y una sola zona para acceso y salida).

Sin embargo resultó un poco más difícil de replicar la condición operativa en la cual los vehículos se acumulan dentro de la intersección para los giros izquierdos, al iniciar el intervalo de verde en accesos contrarios, para posteriormente finalizar el movimiento dentro de intervalos de verde conflictivos; esta condición en Lisa+ exige un manejo detallado si se considera que al estructurar la red de modelación se asigna una trayectoria independiente para cada carril y se deben definir las reglas de prioridad en cada uno de los puntos de conflicto dentro de la intersección. En el caso de Synchro-Simtraffic no fue posible replicar esta condición operativa debido a la restricción que el software impone a que los vehículos ingresen a las zonas de conflicto si está ocupada por un flujo en sentido contrario, independiente de si el control semafórico permite el ingreso con la luz verde.

Lisa+ y S-Paramics son los programas que mayor detalle exigen para la conformación de la red y de las condiciones operativas, permitiendo definir de forma individual las condiciones de conflicto en la intersección para cada conexión y para cada tipo de vehículo, a los cuales se puede establecer en forma precisa las condiciones físicas y dinámicas de operación; como principal diferencia, en S-Paramics el tipo de vehículo debe signarse en función del "motivo del viaje" lo que permite establecer la proporción, por tipo de vehículo, de quienes van al trabajo, hogar, estudio u otro motivo de viaje; adicionalmente la matriz de flujo es tipo origen/destino, en función de las zonas de generación y atracción definidas para la red, y debe generarse una independiente para cada tipo de vehículo definido. En Synchro-Simtraffic esta definición se realiza de forma generalizada para el modelo y solo permite asignar vehículos livianos y pesados que son generados desde cada uno de los brazos que alimentan el flujo y se movilizarán en función de las maniobras permitidas para cada carril del acceso.

Lisa+ también estructura el flujo vehicular en la red de análisis a partir de una matriz origen/destino en la cual se alimenta el volumen total para cada par O/D y sobre éste se define la proporcionalidad por tipo de vehículo (dentro de los cuales el analista puede definir

desde peatones y bicicletas, hasta autobuses articulados y tranvías) y la distribución porcentual en cada carril de circulación del enlace de origen.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES PRELIMINARES

Los resultados obtenidos con el desarrollo de la tesis de maestría han permitido identificar las características propias de cada uno de los paquetes computacionales empleados en relación con: la forma en que los analistas deben estructurar las condiciones básicas de la red a analizar, las condiciones operativas necesarias para replicar lo observado en terreno en especial la información necesaria para alimentar el modelo, los parámetros esenciales para obtener un análisis y evaluación coherente con los objetivos de los modelos de simulación, y la identificación de las diferencias entre los resultados que pueden ser obtenidos en función de la variación de los valores que se definan para los parámetros que caracterizan la operación vehicular en los modelos de microsimulación.

Desde el punto de vista del usuario, las siguientes son las consideraciones relativas a la estructuración de la red de análisis y la alimentación de las características del tránsito a ella asociado.

Tabla 1. Aspectos operacionales de generación del modelo de microsimulación

ASPECTO CONSIDERADO	SYNCHRO-SIMTRAFFIC	LISA+	S-PARAMICS
Construcción de la red	En los tres se puede emplear una imagen de fondo (jpg, bmp, dxf o wmf) para “dibujar” la red a analizar; permite establecer la escala de la misma y ajustar las dimensiones de los enlaces Se define mediante enlaces y nodos. Los carriles y las maniobras de cada uno se definen en cada enlace de forma particular	Se define a partir de “brazos”, a los cuales se asocian los carriles de acceso y de salida de forma independiente; las maniobras dependen de cómo se unan los carriles de acceso y salida (no hay nodos)	Se definen enlaces a partir de nodos que conforman la intersección. Para cada enlace se definen zonas de generación o atracción e viajes
Características Físicas	El ancho de carril y la pendiente pueden ser alimentadas por cada enlace o para cada carril de forma individual	El ancho de carril y la pendiente pueden ser alimentadas por cada enlace o para cada carril de forma individual	Para los enlaces se establecen condiciones del número de carriles y direccionalidad
Demanda	El volumen vehicular se asigna en función de las maniobras permitidas desde los accesos, para cada grupo de carriles; solo acepta vehículos livianos y porcentaje de pesados. Los peatones y ciclistas se alimentan en función de los conflictos con los vehículos	Se requiere una matriz tipo O/D en función de los brazos generados, se pueden alimentar hasta 10 diferentes tipo de vehículo y distribuirse de forma individual en cada carril. Los peatones y ciclistas se alimentan de forma independiente y sobre trayectorias definidas para éstos	Se definen matrices O/D en función de las zonas establecidas en la parametrización general. Se requiere de una matriz por cada tipo de vehículo y éstos se pueden definir en función de los requerimientos de la simulación
Características del vehículo	En el módulo de simulación se pueden modificar las dimensiones de cada tipo de vehículo considerado	En el módulo de simulación se pueden modificar las dimensiones de cada tipo de vehículo considerado	Se establecen a través de las definiciones en el módulo de volúmenes, pudiendo especificar diferentes tipos

*SIMULACIÓN MICROSCÓPICA DEL TRÁNSITO
Montenegro, Juan Carlos; Lozano, Angélica*

ASPECTO CONSIDERADO	SYNCHRO-SIMTRAFFIC	LISA+	S-PARAMICS
Características operativas	En el módulo de simulación se pueden modificar las condiciones de velocidad, aceleración y brecha para cada tipo de vehículo considerado	En el módulo de simulación se pueden modificar las condiciones de velocidad, aceleración y brecha para cada tipo de vehículo considerado	Se establecen a través de las definiciones en el módulo de volúmenes, pudiendo asociar a cada tipo de vehículo un tipo de conductor y condiciones de aceleración, brechas y comportamiento
Zona de conflicto	Claramente definida entre las líneas de detención de los accesos, solo puede ser utilizada por un flujo o grupo de flujos no conflictivos entre si	Se definen puntos de conflicto entre trayectorias, los cuales pueden tener sus propias reglas de prelación y derecho de paso asociadas al control semafórico o a reglas de prioridad en función de distancias y espacio disponible	La zona de conflicto es ocupada por los vehículos que tienen el derecho de paso (en función de los semáforos) o dependiendo de las reglas asignadas a cada trayectoria definida por la matriz O/D
Esquema de control (con o sin semáforos)	Asociado al nodo que conforma la intersección, permite la definición de fases en tiempos fijos o tráfico actuado (asociado a detectores) para grupos de movimientos no conflictivos desde los accesos. Optimiza los tiempos de las fases diseñadas y los desfasajes entre intersecciones	Se define para cada brazo o carril de forma independiente. Permite el diseño y/o evaluación completa del plan de señales de la red analizada y la coordinación entre intersecciones, a partir de la definición de tiempos intermedios y verdes mínimos. Permite el diseño de los tiempos del control y el esquema de fases, a partir de tres métodos diferentes, optimizando la operación de la intersección y la coordinación de olas verdes.	El control se asocia a cada enlace que llega a la intersección. Se definen tiempos de verde, las y condiciones de las fases y la secuencia de las mismas.
Salida gráfica	2D y 3D	2D	2D y 3D

Los resultados de evaluación que pueden obtenerse en cualquiera de estos tres paquetes computacionales, una vez estructurada la red de análisis junto con sus correspondientes datos de volúmenes y los valores característicos de su operación, pueden considerarse de dos formas: una “Evaluación Estática” que se obtiene a partir de los datos ingresados y con base en las fórmulas matemáticas para el análisis de capacidad y niveles de servicio básicamente, definidos a partir de parámetros como la demora media, volumen movilizado y longitud de cola. El segundo esquema de evaluación es precisamente la microsimulación o “Evaluación Dinámica”, la cual toma en consideración los resultados que se generen por la interacción entre los diferentes elementos del flujo (vehicular y/o peatonal) al transitar por la red considerada; los resultados se definen a partir de los algoritmos que conforman los modelos de simulación propios de cada programa de cómputo y generalmente se requieren de varias corridas para definir los valores finales, los cuales tradicionalmente también apuntan a la definición de la capacidad y los niveles de servicio de la infraestructura analizada, además de ofrecer indicadores adicionales como consumo de combustible y emisión de partículas contaminantes.

*SIMULACIÓN MICROSCÓPICA DEL TRÁNSITO
Montenegro, Juan Carlos; Lozano, Angélica*

En relación con los resultados obtenidos de forma particular en los tres paquetes considerados para la evaluación de la intersección empleada como caso de estudio, el resumen general es el siguiente.

Tabla 2. Aspectos identificados en relación con los resultados obtenidos a partir de la microsimulación

ASPECTO CONSIDERADO	SYNCHRO-SIMTRAFFIC	LISA+	S-PARAMICS
Evaluación Estática	Reporta los tiempos de demora y a partir de ellos califica los niveles de servicio para cada nodo de la red de forma individual. Ofrece datos de capacidad y relación V/C	Evalúa los planes de señales de la intersección a partir de tres metodologías diferentes, generando resultados de saturación, demoras, tiempos perdidos, capacidad, longitudes de cola, consumo de combustible y emisión de contaminantes	
Evaluación Dinámica (microsimulación)	Evalúan a partir del movimiento de los vehículos a través de la red, verificando sobre las condiciones operativas los resultados de volumen movillizado, demoras, longitudes de cola y flujos de saturación básicamente La simulación se realiza a través del aplicativo Simtraffic, en periodos de simulación que pueden variar entre los 15 y 60 minutos típicamente, aunque pueden definirse fuera de estos límites. Requiere un periodo de precarga de la red definido por el analista. Los resultados se obtienen para cada nodo y un promedio para la red	Generalmente se simulan 60 minutos en la red, pero pueden definirse periodos más amplios en los cuales los resultados se obtienen de forma individual para cada periodo de 60 minutos y el promedio del total de periodos considerados. Se recomienda una precarga de 15 minutos. La evaluación se hace sobre cada movimiento vehicular y determina el flujo movillizado en cada trayectoria definida, así como el tiempo de recorrido real, ideal y los tiempos perdidos por demoras	

En los tres paquetes de cómputo se observó que los resultados de la evaluación dinámica arrojaron demoras mayores a las obtenidas por el análisis estático, y por ende niveles de servicio que en ocasiones resultaron mayores para la simulación en comparación con evaluación estática.

La sensibilidad a las variaciones de los parámetros reflejó un flujo más cercano a lo aforado en las condiciones estáticas que en las dinámicas, ara los tres programas, sin embargo Synchro-Simtraffic generalmente mantuvo valores muy cercanos entre la simulación y el aforo real, mientras que para lograr buenos niveles de calibración en Lisa+ y Paramics fue necesario revisar y ajustar las condiciones operativas de los vehículos, las normas en las zonas de conflicto y la condición del conductor; en estos casos niveles de conducción agresiva permitieron mejores ajuste en la calibración.

La influencia del grado de saturación, que por defecto en los tres paquetes es de 1,800 veh/hora, es el que mayor influencia tiene en los resultados y un valor entre 1,900 y 2,100 veh/hora arrojó los mejores ajustes de calibración.

Los parámetros que definen el comportamiento del conductor como son, distancia de seguridad, aceleración – desaceleración, brecha mínima para incorporación y cambio de carril, también tienen influencia en los resultados, siendo éstos más cercanos a lo observado cuando el conductor es más agresivo.

La Generación de los volúmenes y su asignación a la malla de simulación se realiza de manera estocástica, sin embargo en Lisa+ es posible establecer el esquema de arribos en función de si existe o no un control de tráfico antes del punto de acceso del flujo a la red considerada, sin embargo el intercambio entre carriles debe ser claramente definido por trayectorias adicionales entre los carriles de la calzada y las reglas de incorporación detalladamente asignadas; si esta operación o se realiza, el flujo es asignado de forma uniforme para los diferentes carriles o el analista deberá conocer la carga de cada carril para asignarle de forma manual.

Esta situación no se observó en Synchro-SimTraffic ni en Paramics, en donde el flujo se asigna a los enlaces de alimentación de la red de forma general y el volumen vehicular puede emplear cualquiera de los carriles definidos para el enlace, haciendo el esquema de intercambio de carril algo “más natural” para la simulación de acuerdo con el esquema de movimientos direccionales definidos en la matriz de volúmenes.

REFERENCIAS

- Agosta, R. et al. “Experiencia de aplicación de modelos de transporte: simulación de tránsito urbano”. Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, Universidad Católica Argentina
- Algers, S. et al (1997). “Review of Micro-Simulation Models”. 3a entrega del proyecto SMARTTEST - <http://www.its.leeds.ac.uk/smartest>
- Barceló, J. (2010). “Fundamentals of Traffic Simulation”. International series in operations research and management science. Ed. Springer
- Barceló, J. “Microscopic traffic simulation: a tool for the analysis and assessment of ITS systems”. Disponible en http://www.aimsun.com/microsimulation_for_itsbis.pdf.
Página consultada en octubre de 2009
- Bellemans, T. et al. (2002) “Models for traffic control,” Journal A, vol. 43, N° 3–4, pp. 13–22.
- Ben-Akiva, M., Choudhury, C. y Toledo, T. (2006). “Lane changing models”, Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation, Lausanne, Switzerland.
- Bham, G. & Benekohal, R. (2004) "A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata and car-following concepts". Elsevier / Transportation Research Part C 12, pp. 1–32
- Buira C. (2008). “Estrategias para la optimización de intersecciones con semáforos. microsimulación y modelos analíticos”. VIII Congreso Español sobre Sistemas Inteligentes del Transporte.

- Cameron, G. et al (1994). "PARAMICS — Moving Vehicles on the Connection Machine". Proceedings of Supercomputing '94, IEEE Computer Society Press, pp. 291-300.
- Choudhury, Ch., Ramanujam, V. y Ben-Akiva, M. (2008). "A lane changing model for urban arterials". 3rd international symposium of transport simulation, Gold Coast, Australia.
- Dowling et al. (2002). "Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software". Reporte Final para el Departamento de Transporte de California.
- Duncan, G. of Quadstone and Dave McArthur of SIAS (1997). "Paramics Technical Report Car-Following, Lane Changing and Junction Modelling"
- Fellendorf M. & Vortisch P. (2000) "Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations"
- Fox, K. "Introduction to Micro-simulation". Disponible en <http://www.microsimulation.drfox.org.uk/index.html>. Página consultada en octubre 2010
- Halcrow Grup (2009) "Microscopic Traffic Simulation" www.halcrow.com. Página consultada en septiembre de 2009
- Hoogendoorn S.P. & Bovy P.H.L. (2000). "State of the art of vehicular traffic flow modelling." Reporte especial de modelación y control del tráfico vial del Journal of Systems and Control Engineering — Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I.
- ITS, University of Leeds (1997). "Final Report SMARTTEST" - Project part funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme
- J. Esser y M. Schreckenberg (1997). "Microscopic simulation of urban traffic based on cellular automata". International Journal of Modern Physics, Vol. 8, N° 5, pp. 1025-1036
- Jones, Steven L. et al (2004), "Traffic Simulation Software Comparison Study". University Transportation Center for Alabama (UTCA) Report 02217
- Kokkinogenis, Z. et al (2011). "Towards the next-generation traffic simulation tools: a first evaluation". Proceedings of the 6th Doctoral Symposium In Informatics Engineering. FEUP, University of Porto, Portugal, pp. 77-90
- Lei, S. et al (2005). "Research of urban microscopic traffic simulation system". Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, pp. 1610-1614.
- Luk, J. & Tay, J. - ARRB Group (2006). "The use and application of microsimulation traffic models". National Library of Australia Cataloguing-in-Publication data: ISBN 1 921139 34 X. Austroads Project No. NS1016. Austroads Publication No. AP-R286/06.
- López, E. et al (2010). "A modeling framework for urban traffic systems microscopic simulation", Elsevier / Simulation Modelling Practice and Theory 18, pp. 1145–1161.
- Menneni S. et al (2009) "Calibración de parámetros de comportamiento con algoritmos evolutivos en la simulación microscópica de flujos de tránsito". Revista Andinatraffic, Edición N° 5, disponible en <http://www.andinatraffic.com/andinatraffic/revista>
- Miller, E. et al (2004) "Microsimulating urban systems", Elsevier / Computers, Environment and Urban Systems 28, pp. 9–44
- Moreno E. (2006). "Calibración de factores de impedancia en el análisis de congestión urbana, aplicando un sistema de software integrado de tránsito (TSIS)". Revista Ciencia e Ingeniería, ISSN 1316-7081, Vol 21, N° 2, pp. 99-105
- Nagel, K. (1996). "Particle hopping models and traffic flow theory". Physical Review E, Vol 53, pp. 4655-4672

- Panwai, S. & Dia, H. (2005). "Comparative Evaluation of microscopic Car-Following Behavior". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 6, N° 3, pp. 314-325
- Ramsay, E.D. & Bunker, J.M. (2004). "Progression of Different Vehicle Types in a Signalised Urban Arterial Corridor – Model Development and Calibration". 26th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR)
- Ratrouf, N.T., Rahman, S.M. (2009). "A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software". The Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 34, N° 1B, pp. 121-133
- Roca, V. (2007), "Aplicación de modelos de micro-simulación en la ingeniería de tránsito", Revista Vial - Argentina, ISSN 0329-1146, N° 56, pp. 82-85
- Roca, V. (2009) "Análisis operacional de glorietas mediante simulación microscópica". Revista Andinatraffic, Edición N° 5, disponible en <http://www.andinatraffic.com/andinatraffic/revista>
- Sahraoui, A. et al (2001). "Calibration and path dynamics issues in microscopic simulation for advanced traffic management and information systems". Transport Research Record N° 1771, pp. 9-17
- Salvador, I. y F. Robusté (2000) "Principios para la micro-simulación del tráfico". Actas del I Congreso de Métodos Numéricos en las Ciencias Sociales (MENCIS), pp. 479-491. Barcelona
- Sbayti, H., Roden, D. (2010), "Best Practices in the Use of Micro Simulation Models". American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Standing Committee on Planning
- Suárez, L. (2010). "Análisis y evaluación operacional de intersecciones urbanas mediante simulación". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín
- Vanderschuren, M. (2007) "Calibrating microscopic simulation models". Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference (SATC 2007). ISBN 1-920-01702-X
- Wang, Y. & Prevedouros, P. (1996) "Synopsis of Traffic Simulation Models". Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Hawaii en Manoa
- Zhang, Y. et al (2007). "Modeling Mixed Traffic Flow at Crosswalks in Micro-Simulations Using Cellular Automata", TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY. ISSN 1007-0214 12/14 pp. 214–222. Volume 12, Number 2, April 2007
- Zúñiga, V., Aldea, A. (2010). "Uso de herramientas de microsimulación para la definición de estrategias de control de tránsito para la ciudad de Santiago". Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil