

Monitoreo del tránsito vehicular basado en *Mobile Phone Sensing*

J. Vargas-Ubera

UACM-Campus Cuauhtepc (Colegio de Ciencia y Tecnología)

Calle La Corona No. 330 Col. Loma La Palma

Del. Gustavo A. Madero, 07160, México, DF

y

G. Rodríguez-Gómez y S. E. Pomares-Hernández

INAOE (Coordinación de Ciencias Computacionales)

Luis E. Erro No. 1 Sta. Ma. Tonantzintla, 72000, Puebla, México

RESUMEN

Se discute la factibilidad y potencial de los teléfonos inteligentes para incorporar información útil a la solución de problemas de tránsito vehicular. Proponemos como primera etapa, determinar el estado de pavimentación de las calles; identificando anomalías como topes y baches que afectan el flujo, densidad y velocidad media vehicular. Toda esta información se vaciará a un mapa de datos que será actualizado mediante diversos protocolos estándar afines; tales como: API, AVI, GIS, GTFS, GTFSRT y WAP. Con lo anterior, se propone desarrollar una solución orientada a semáforos inteligentes, que adapten y sincronicen en tiempo real sus tiempos de ejecución, en función del modelo de tránsito vehicular propuesto ex profeso.

Palabras Claves: Phone Sensing, Monitoreo, Modelado Macroscópico y Microscópico, Simulación del Tránsito Vehicular, Estándares Internacionales.

1. INTRODUCCIÓN

En la optimización y el control del flujo del tránsito vehicular en una red de carreteras, confluyen las matemáticas y las ciencias aplicadas. Motivaciones sociales, ambientales y económicas reclaman minimizar el tiempo de permanencia en vehículos de transporte. Se cuenta con una gran cantidad de información que permiten analizar y entender el problema y diseñar estrategias de solución [1]. No obstante, aun cuando parece muy simple, las cantidades físicas que se necesitan para modelar el problema no bastan con medir sus aforos. Esta anotación se hace en vista de que resulta muy sencillo pensar en obtener datos y entonces realizar una modelación a modo. Sin embargo, una búsqueda (quizá no muy extensa) de este tipo de información arroja resultados negativos. Por ejemplo, los datos que reporta el Instituto Mexicano del Transporte [2] se refieren simplemente a aforos vehiculares medidos en las casetas de autopistas, o a matrices origen-destino en algunas redes regionales. Esto significa que no están al alcance los datos de velocidad, distancia entre vehículos, densidad, etc., que se utilizan en la modelación del problema [3].

La reciente aparición de nuevas tecnologías (redes de sensores, teléfonos inteligentes y nuevos paradigmas tales como, redes sociales), han provocado profundas transformaciones en la gestión del tránsito vehicular y la manera en cómo se hará en el futuro [4]-[6]. Las redes de sensores han permitido vigilar y robustecer la columna vertebral de la gestión del tránsito vehicular en ciudades importantes. Los teléfonos inteligentes proporcionan cobertura ubicua, pero con datos impredecibles y a veces poco confiables, que requiere una cantidad significativa de trabajo para "filtrarlos". Asimismo, la aparición de las redes sociales ha permitido acceso directo a patrones de movilidad de las personas, y la capacidad de interactuar con ellas, abriendo así una oportunidad para incentivar cambios de comportamiento (ya sea como parte de un grupo social o a través de la red social) [7]. Todos estos avances han creado la necesidad de nuevos enfoques de modelado (en particular, para abarcar los nuevos datos), nueva

estimación, métodos de inferencia y filtrado, dando lugar al desarrollo de nuevos paradigmas para el control.

Este resurgimiento de la ingeniería del tránsito en la era de la web 2.0 y redes sociales ha sido particularmente rápido, debido al crecimiento prolífico de los teléfonos móviles y los conjuntos de datos que generan, por lo que el problema correspondiente es todo un reto [8]. Es necesario en primer lugar, regresar a los fundamentos matemáticos en el que el control de los sistemas de tránsito confía. Otro tema es la estimación, control u optimización sobre redes de carreteras. Para finalmente abordar los problemas que surgen en el tránsito futuro debido a la introducción de una serie de AVCS (sistemas de comunicación y automatización de vehículos) [9].

En la sección 2 se presenta una revisión básica de los dos modelos matemáticos con los que trabajaremos. En la sección 3 se plantean brevemente las premisas y metodología para llevar a cabo el proyecto. En la sección 4 se discute el estado actual y las expectativas del trabajo pendiente. En la sección 5, enumeramos algunas conclusiones preliminares. En el glosario al final, se hace una síntesis de las abreviaturas utilizadas. Finalizando el documento con la bibliografía general.

2. MODELOS MATEMÁTICOS

Son muchos los enfoques reportados para entender las características del tránsito en carreteras [10]-[12]. Sin embargo para acotar el problema, centraremos nuestra atención en los dos marcos matemáticos más representativos en la descripción del flujo vehicular. Modelos macroscópicos y microscópicos, con la intención de incorporar un enfoque matemático conjunto.

Modelos macroscópicos

Este enfoque considera una analogía entre la dinámica de un fluido y una línea de vehículos en movimiento, plantea modelos con un número limitado de ecuaciones que son relativamente fáciles de manipular. Generalmente se refieren a estructuras matemáticas de sistemas bidimensionales de ecuaciones diferenciales parciales de tipo hiperbólico, que describen la evolución en el tiempo y el espacio de las variables macroscópicas del tránsito vehicular (densidad, flujo y rapidez promedio). Se basan en principios de conservación del número de autos, evolución de la rapidez promedio y tantas ecuaciones como variables estemos interesados en medir, y se complementa con una ley constitutiva que permite cerrar el sistema de ecuaciones. Debido a que los modelos macroscópicos están restringidos a la descripción de variables colectivas, no se distingue la individualidad de los vehículos reflejando únicamente cantidades macroscópicas promediadas. No obstante hay que mencionar, que la única ley física determinista en estos modelos es la conservación de vehículos.

De manera general, haciendo analogía con la hidrodinámica (Considerando fuentes y sumideros. Es decir, si hay más de un carril en la carretera y un vehículo rebasa integrándose al carril bajo estudio, éste efecto se puede ver como una fuente de vehículos. Asimismo podemos considerar la salida de vehículos a

otro carril o bien, la contribución de rampas de entrada y salida al afluyente), la ecuación que gobierna el modelo es una ecuación de continuidad denotada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (V\rho)}{\partial x} = \Phi_e - \Phi_s \quad (1)$$

Donde en general, $Q = \rho V$, representa el flujo vehicular, también conocido como “la relación fundamental del tránsito vehicular”; ρ es la densidad de vehículos, V es la rapidez promedio, y Φ_e y Φ_s corresponden al número de vehículos que entran y salen del carril por unidad de tiempo, respectivamente.

Si se quiere una descripción que solamente contenga términos en la densidad es necesaria una ecuación adicional que diga como varía la rapidez promedio con la densidad, es decir, se requiere de una ecuación constitutiva de cerradura para la Ec. (1). Obteniéndose una ecuación en derivadas parciales donde la densidad es la única función a determinar. Otra opción es considerar que la rapidez promedio de los vehículos es también una de las variables relevantes, por lo que es necesario introducir una ecuación adicional para ella. Por lo general, la ecuación para la rapidez necesitará de información adicional para cerrar el conjunto. Por ende, se genera una jerarquía de ecuaciones que en cada paso requiere de una hipótesis de cerradura que permita resolver el problema.

Los modelos que sólo consideran a la densidad como variable relevante se conocen como *modelos de primer orden* y los que consideran a la densidad y la rapidez promedio como variables relevantes se les llaman *modelos de segundo orden*. Asimismo, los modelos que consideran un número mayor de variables son *modelos de orden superior*.

El modelo LWR: es de primer orden ya que únicamente considera a la densidad como variable relevante. Postula como cerradura una ecuación constitutiva para el flujo vehicular, conocida como la ecuación de Greenshields

$$Q(\rho) = \rho V_{max} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right). \quad (2)$$

Donde, V_{max} es la máxima rapidez permitida y ρ_{max} la máxima densidad que soporta la vialidad. Esta ecuación constitutiva representa observaciones cualitativas del flujo vehicular: flujos grandes a densidades bajas o, flujos mínimos a densidades altas.

De las Ecs. (1) y (2), para Φ_e y Φ_s nulos. Es decir, una carretera con un solo carril sin rampas de entrada y salida, se obtiene la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + V_{max} \left(1 - \frac{2\rho}{\rho_{max}}\right) \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

La solución explícita de esta ecuación requiere de condiciones de frontera para x y lo que por el momento podemos adelantar es que presenta ondas de choque. Es decir, un aumento considerable de la densidad en un intervalo muy corto de longitud. Esta característica no es deseable en los modelos de tránsito, sobre todo porque las observaciones experimentales no muestran ese comportamiento. En la realidad se observan la formación de cúmulos y embotellamientos, pero no ocurren de manera espontánea. Esto significa que el modelo no arroja resultados realistas y por lo tanto no es una buena representación del problema. Sin embargo representa un primer punto de partida para el objetivo general que se persigue.

El modelo LWD: también es un modelo de primer orden equivalente al modelo LWR sólo que con difusión. Es decir, para modificar la aparición de la onda de choque que aparece en el modelo LWR, se considera una modificación postulando una ecuación constitutiva diferente

$$Q(\rho) = \rho V_{max} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right) - D \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (4)$$

Donde D es una constante positiva llamada coeficiente de difusión. La sustitución directa de esta nueva ecuación constitutiva (también para una carretera de un solo carril sin rampas de entrada y salida) nos lleva a la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + V_{max} \left(1 - \frac{2\rho}{\rho_{max}}\right) \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} = 0. \quad (5)$$

Donde podemos ver que la estructura no lineal de la ecuación constitutiva persiste, pero ahora hay un término en segundas derivadas de la densidad, que se asemeja a un término de difusión de la mecánica de fluidos. De manera somera podemos adelantar que el coeficiente de difusión juega un papel importante, dando lugar a una solución que no presenta ondas de choque. Sin embargo, es necesaria una amplia comparación de las distintas soluciones que acepta esta ecuación con el modelo que le precede.

Los modelos de segundo orden: consideran tanto a la densidad ρ como a la rapidez V entre las variables relevantes en la descripción. Sin embargo, a diferencia de los modelos de primer orden, ahora es necesaria una ecuación diferencial adicional que permita describir la dinámica de ambas variables. Esto significa que además de la ecuación de continuidad Ec (1) tendremos una ecuación para la rapidez y ésta debe proponerse, o bien deducirla a partir de un modelo cinético que comparta una similitud con la ecuación de Navier-Stokes en la dinámica de fluidos en régimen compresible. En general los modelos de segundo orden se han propuesto de manera fenomenológica. Como ya se ha hecho notar, las ecuaciones dinámicas generalmente no están cerradas y es necesario tener una ecuación constitutiva que permita cerrar. El problema principal de dicho enfoque consiste en partir de una ecuación cinética apropiada que en realidad describa de manera cualitativa el comportamiento del tránsito vehicular.

En la etapa en que se encuentra el trabajo no es factible utilizar modelos de segundo orden, debido a que representa un objetivo bastante ambicioso que por el momento rebasa nuestras perspectivas. Por lo tanto, sólo implementaremos los primeros dos modelos; el LWR y el LWD para el caso de un modelo macroscópico, por lo que proseguiremos con la descripción del enfoque microscópico.

Modelos microscópicos

Un modelo microscópico describe el tránsito en términos del comportamiento individual de los conductores en diferentes situaciones de conducción. Se basa principalmente en leyes de estímulo-respuesta, donde la respuesta al cambio de rapidez se mide por la aceleración del vehículo, como resultado de las acciones de los vehículos circundantes. El estímulo puede tener diversos orígenes, dando con ello distintos modelos. El más común supone una relación lineal entre la rapidez y el espaciado; o bien, entre la aceleración y la diferencia de rapidez entre vehículos consecutivos.

La teoría anterior se le conoce genéricamente como “Car-Following”, la cual tiene una estructura matemática basada en la Dinámica Newtoniana. Por lo que para el flujo en un carril, la estructura es de la forma

$$\frac{dx_n}{dt} = u_n \quad \text{y} \quad \frac{du_n}{dt} = F_n(x_n, \dots, x_N, u_n, \dots, u_N). \quad (6)$$

Donde $n = 1, 2, \dots, N$; y F_n es la aceleración que actúa sobre el n -ésimo vehículo y que depende de la posición y rapidez de todos los vehículos restantes.

La solución de la Ec. (6) representa la evolución en el tiempo de la posición y la rapidez de los vehículos; sin embargo, debido a la complejidad matemática que representa F_n , la mayoría de los modelos únicamente relacionan la aceleración con el líder (el vehículo que adelanta al vehículo de prueba). La dificultad de tratar con sistemas grandes de ecuaciones diferenciales, obliga a reducir la complejidad de la dinámica de cada vehículo. Es decir, reducir el tamaño de la Ec. (6); significa seleccionar un número

apropiado de vehículos representativos, y un número limitado de parámetros a ser identificados por datos empíricos convenientes. Se acostumbra en esta teoría que las posiciones de los vehículos se denoten de derecha a izquierda, comenzando con el líder. Así, $x_0(t)$, es la posición del líder y $n = 1, 2, \dots, N$, etiquetan las posiciones de los seguidores en la caravana (ver Figura 1).

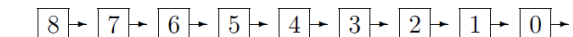


Figura 1: Convención de seguimiento de vehículos.

Para el flujo en un solo carril, se supone que existe una alta correlación entre vehículos en un rango de separación y tiene una forma explícita para ello. Asume que el conductor es un agente activo que responde a estímulos sensoriales mediante aceleración-desaceleración del vehículo, dependiendo de sus propias habilidades psicomotoras y condiciones físicas del camino y del vehículo. Bajo la premisa de que el conductor intenta evitar colisiones y rebasar al vehículo de enfrente, la función de respuesta se toma como la aceleración; debido a que el conductor tiene control directo de esta cantidad, mediante el acelerador y el freno y, porque obtiene retroalimentación directa de esta variable mediante fuerzas inerciales. Así, el mecanismo de conducir se resume en tres tipos de tareas que en realidad son interdependientes (percepción, decisión y control), las cuales se traducen en expresiones matemáticas explícitas. El resultado final después de “aligerar” la notación (usamos x_f para el seguidor, x_l para el líder, así como: u_f , u_l , a_f y a_l , como las velocidades y aceleraciones, finales y del líder, respectivamente) es

$$\frac{du_f(t)}{dt} = \lambda [u_l(t) - u_f(t)]. \quad (7)$$

Con λ un coeficiente de sensibilidad constante e inversamente proporcional a un tiempo de relajación, donde además se supone que la respuesta es independiente del espaciamiento entre vehículos (la distancia relativa entre pares de vehículos, $x_l - x_f$). Es decir, para una rapidez media relativa, la respuesta es la misma si la separación es del orden de 5m, 10m o incluso del orden de 100m.

En un modelo más realista, la respuesta sería mayor cuando menor sea la distancia relativa. Por lo tanto, un modelo más sofisticado supone que la sensibilidad λ es inversamente proporcional al espaciamiento, que resulta en un modelo no lineal y λ cambia de unidades. Es decir,

$$\frac{du_f(t)}{dt} = \lambda [u_l(t) - u_f(t)] / [x_l - x_f] \quad (8)$$

Otra forma alternativa incluye el efecto de la distancia entre pares de vehículos, y además, supone que la sensibilidad es inversamente proporcional al tiempo de avance definido como

$$\Delta t_f = \frac{x_l - x_f}{u_f} \quad (9)$$

De donde la ecuación diferencial a resolver se expresa finalmente como

$$\frac{du_f(t)}{dt} = \lambda u_f(t) [u_l(t) - u_f(t)] / [x_l - x_f]^2 \quad (10)$$

Integrando las ecuaciones anteriores [(Ecs. (7), (8) y (10)], obtenemos

$$\begin{aligned} u_f &= \lambda [x_l - x_f] + \text{cte} \\ u_f &= \lambda \ln [x_l - x_f] + \text{cte} \\ u_f &= -\lambda [x_l - x_f]^{-1} + \text{cte}. \end{aligned} \quad (11)$$

Para determinar la forma funcional de la rapidez media con la densidad se considera una caravana de vehículos en equilibrio, donde la rapidez de cada vehículo es igual a una rapidez media u y, la densidad de vehículos k , es constante e igual a la unidad. Es

decir, $k = [x_l - x_f]^{-1}$, debido a que en la longitud $[x_f, x_l]$ hay exactamente un vehículo. Luego entonces, para cada modelo de las Ecs. (11)

$$u = \frac{\lambda}{k} + \text{cte}$$

$$u = -\lambda \ln(k) + \text{cte}$$

$$u = -\lambda k + \text{cte}. \quad (12)$$

Las constantes de las primeras dos Ecs. (12) se pueden determinar usando la condición $u = 0$, en la densidad de embotellamiento k_j . Por lo tanto, la relación fundamental del flujo vehicular $q = k u$ como función de la densidad k es

$$\begin{aligned} q &= \lambda k [1 - \frac{k}{k_j}] \\ q &= \lambda k \ln [\frac{k_j}{k}]. \end{aligned} \quad (13)$$

Mientras que para la tercera de las Ecs. (12) la condición anterior no se cumple. Por lo que es necesario partir de su forma original [tercera ecuación de las Ecs. (11)] para obtener

$$q = m k e^{-\lambda k} \quad (14)$$

Con m una constante arbitraria a determinar por condiciones de frontera heurísticas. La Figura 2 muestra gráficas con el comportamiento típico de estas relaciones fundamentales.

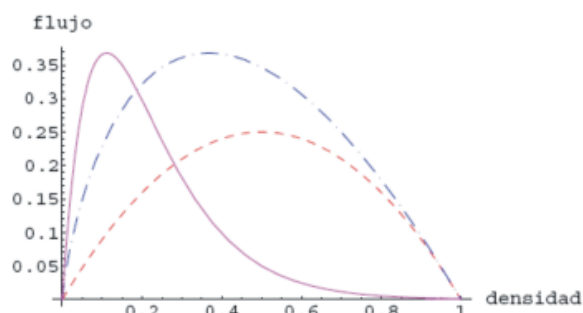


Figura 2: Curvas típicas de los modelos “Car-Following” La curva cortada en rojo es la primera de las Ecs. (13), mientras que la curva cortada en azul es la segunda de las Ecs. (13). Ambas con $\lambda = 1$ y $k_j = 1$. A su vez, la curva continua en magenta representa la Ec. (14) con $\lambda = 9$ y $m = 9$.

Los modelos microscópicos han sido trabajados desde los años 60's y recibido mejoras exhaustivas [13]. La principal dificultad técnica que persiste es que, resulta complicado aplicarlos en redes de carreteras por el número tan grande de ecuaciones diferenciales a resolver. El uso de autómatas celulares (por ejemplo) ayuda en parte a resolver estos problemas; ya que resultan ideales para simulaciones computacionales de alto rendimiento. Con este enfoque se puede proponer un modelo sin tiempo de reacción en el conductor; lo cual equivale a un modelo macroscópico de primer orden que hace posible predecir por lo menos de manera cualitativa, la relación fundamental de los modelos macroscópicos.

Por otro lado, si se considera una carretera con varios carriles, conlleva a utilizar enfoques heurísticos que se traducen en promedios “convenientemente” de las variables macroscópicas principales. Lo cual deriva en la tarea que realizan los modelos macroscópicos discutidos antes. Los modelos “Car-Following” no pretenden tomar en cuenta todo el proceso de conducir, sino lo sintetizan en una relación de tipo conductista. Difieren principalmente en cómo suponen la interacción y comportamiento de los vehículos. El objetivo principal es entender la naturaleza del estado estacionario del sistema basándose en el análisis detallado del comportamiento de los conductores. No profundizaremos más con una revisión exhaustiva, sino más bien, el objetivo es alentar la discusión y el análisis crítico que estimule perspectivas de investigación acordes al objeto central del presente trabajo. Por el momento,

únicamente abordaremos los modelos macroscópicos y microscópicos con sus dos variantes discutidas antes, con miras a incorporar un enfoque matemático conjunto afín.

3. METODOLOGÍA

Existen soluciones que están basadas en equipo dedicado y fijo (video cámaras, radares, sensores infrarrojos, y sensores piezoeléctricos) que determinan el flujo y densidad vehicular. Sabiendo que dicha información es necesaria pero no suficiente para determinar si existe o no congestión, consideramos que para atacar el problema del congestionamiento se requiere de soluciones de monitoreo de tránsito más eficientes e “inteligentes”, que no sólo determinen si hay o no congestión sino que den información acerca del porqué en lo que se refiere a la información contextual del vehículo y de las calles.

En esta primera etapa, proponemos una solución para el monitoreo del tránsito vehicular en tiempo-real (TR) basado en “mobile phone sensing” (ver Fig. 3), específicamente en los sensores embebidos en los teléfonos celulares tipo smartphone.

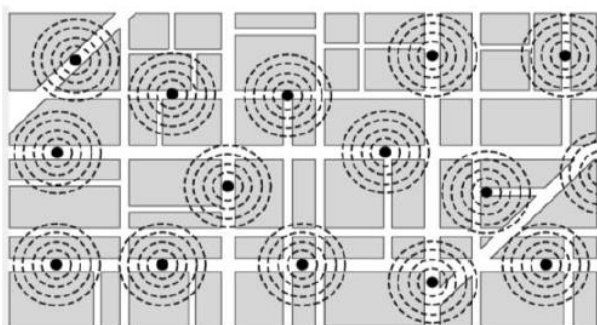


Figura 3: Sistema de monitoreo vehicular.

Para el monitoreo se determinará el estado de pavimentación, identificando anomalías específicas como topes, baches y bloqueo de calles. Se calculará el flujo y densidad vehicular así como la velocidad media, posición, dirección y estado del vehículo, entre otros. Toda esta información se vaciará a un mapa que será actualizado continuamente. Con base en la información anterior se procederá a modelar el tránsito en TR con el cual se podrá determinar con mayor certeza diferentes estados de la congestión vehicular actual. El modelo será alimentado periódicamente con la información contextual determinada de las calles y de los vehículos.

Para lo anterior, Es necesario contar con un sistema de “comunicación” para almacenar, transportar y extraer información. Es decir, implementar un sistema de recepción, procesamiento y organización de datos, basados en sistemas abiertos y estándares internacionales, el cual recibe la posición geográfica de un defecto en la vialidad y lo guarde en una base de datos de acceso abierto. Un sistema centralizado de esta naturaleza, reducirá la complejidad del manejo de la información y permitirá la sincronización entre dispositivos. Por lo que, dicha información almacenada permitirá accederse en TR y aplicarse a la gestión en general de una vialidad. El sistema consistirá en un servidor y una base de datos donde se permita guardar y publicar información en GTFS, así como, importar de fuentes externas a la base de datos y exportar de la base de datos hacia fuentes externas a través del estándar GTFSRT. Se visualiza, al término de esta primera etapa, un sistema que concentrará información organizada en capas sobre mapas de calles geo-referenciados que serán fácilmente consultados por instituciones de gobierno y público en general.

4. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Actualmente estamos trabajando en la implementación de un enfoque matemático conjunto macroscópico y microscópico, con la intención de incorporarle la información de la base de datos en

un formato afín y determinar cuál es la mejor opción en cuanto al modelo matemático.

Por otro lado, se planea continuar con el desarrollo de una solución orientada a la construcción de semáforos inteligentes. Dichos semáforos adaptarán y sincronizarán en TR sus tiempos de ejecución dentro de un circuito de calles entre cruzadas, en función del modelo de tránsito vehicular desarrollado en esta primera etapa. Actualmente existen soluciones de serialización y/o sincronización de semáforos con la limitante de que sólo consideran de manera individual vías de circulación y la desventaja que no adaptan sus tiempos a posibles eventualidades del tránsito.

Cabe mencionar que, aun cuando el objetivo final del proyecto es contar con un modelo de tránsito alimentado con datos en TR para posteriormente proceder al diseño de una solución para semáforos inteligentes, la información inferida a partir de los datos de la primera etapa será altamente rica y útil por sí misma. Por ejemplo, la información acerca del estado de pavimentación y baches puede ser utilizada por los municipios para mantenimiento preventivo y en su caso correctivo de las calles. El reporte en TR del monitoreo del tránsito puede ser utilizado por los servicios de emergencia y público en general para la selección de la mejor ruta. Para este punto se pretende usar la información inferida contextual del “estado” de la calle (topes, baches, peralte, estado de la pavimentación, nivel de congestión, velocidad media, etc.) para la asignación de un factor denominado “peso”, donde el peso será un indicador del grado de viabilidad de la calle.

Para su puesta en marcha contamos con la siguiente estrategia de implantación. Se contactó con algunos concesionarios del transporte público, en cuyas unidades se instalarán los smartphones. Para hacer atractiva su participación se les proporcionará de manera gratuita el equipo (en forma de comodato) y el servicio de *tracking* (seguimiento) de sus unidades. Con el servicio de tracking podrán saber la posición actual de sus unidades y verificar su distribución. La anterior estrategia tiene varias ventajas en diferentes ámbitos, por un lado, económicamente es muy “barata” su implantación, segundo la cobertura de sensado sería muy amplia y por lo tanto tendríamos una gran riqueza en los datos recabados. Desde el punto de vista técnico no tendríamos limitantes en el uso de energía, ni problemas de acceso/uso a los recursos (sensores, memoria, etc.) de los smartphones.

5. CONCLUSIONES

Como conclusiones preliminares podemos mencionar las siguientes tres:

- 1.- Es claro que este problema está siendo estudiado ampliamente desde diferentes puntos de vista. Ciertamente, los modelos abordados corresponden a nuestros objetivos particulares en el tema; sin embargo, no son ni con mucho, los únicos posibles en el campo del flujo vehicular. Se puede profundizar, tanto como se desee; es decir, el estudio formal del flujo vehicular es un campo abierto a la investigación tanto teórica, como práctica.
- 2.- Con respecto a la modelación y el embotellamiento se requiere de un estudio detallado de los parámetros del modelo, los cuales están relacionados con el comportamiento de los conductores, que al tomar en cuenta el estado de la carretera (el peralte, baches, topes y cambios de pendiente, entre otros), conducen a la necesidad de cambios en la modelación. Asimismo, la presencia de tipos diferentes de vehículos en un carril produce efectos que deben y pueden considerarse (presencia de autos y autobuses, entre otros).
- 3.- Otro panorama es que el avance en la solución de los problemas del tránsito vehicular, depende fuertemente de la capacidad de cómputo. En la literatura y en los medios existen simulaciones para demostración, en los cuales el lector puede cambiar el valor de algunos parámetros y darse cuenta del efecto

producido en el tránsito; ello permite familiarizarse un poco con la modelación. Sin embargo, los resultados de dichos modelos están adaptados a situaciones particulares que cualitativamente representan sólo algunas propiedades comunes. Ciertamente esto es valioso en el sentido de que para aplicaciones particulares ese es uno de los caminos a seguir.

6. GLOSARIO

En este anexo se hace una síntesis de los términos abreviados en el trabajo. Dado que la tecnología emplea como lengua de comunicación esencialmente el inglés, la casi totalidad de los términos y sus correspondientes acrónimos son en esta lengua. En muchos casos, ni siquiera se llegan a emplear las traducciones al español.

API Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicaciones): serie de rutinas, protocolos y herramientas que establecen cómo interactúa un sistema con sistemas externos.

AVCS Advanced Vehicle Control Systems (Sistemas Avanzados de Control de Vehículos): conjunto de sistemas y tecnologías que actúan sobre el vehículo, ayudando al conductor en momentos comprometidos o de confort.

AVI Automatic Vehicle Identification (Identificación Automática del Vehículo): todo aquel sistema que permite conocer su posición en tiempo real, generalmente usando un GPS y un sistema de transmisión a través de un módem inalámbrico.

GIS Geographic Information Systems (Sistemas de Información Geográfica): todo aquel sistema que permite crear, ordenar, organizar, analizar y manejar información espacial y sus atributos.

GPS Global Position Systems (Sistemas de Posicionamiento Global): sistema de navegación por satélite que permite saber la posición y la hora en todas las condiciones climáticas en cualquier lugar de la tierra en donde no exista una obstrucción de la señal de al menos tres o más satélites.

GTFS General Transit Feed Specification (Alimentación de Especificaciones de Tránsito en General): recopila datos del tránsito y los publica en un formato común a través de diferentes servidores remotos. Asimismo, es posible a través de este estándar acceder a información abierta diversa que pueda ser de utilidad a la gestión del tránsito.

GTFSRT: GTFS en tiempo real.

TRACKING (Rastreo mediante monitores): Aplicaciones que permiten el seguimiento de flotillas mediante pantallas en tiempo real.

WAP Wireless Applications Protocol (Protocolo de Aplicaciones Inalámbricas): es una especificación segura que permite a los usuarios acceder instantáneamente a la información a través de dispositivos manuales inalámbricos tales como teléfonos móviles. Soporta la mayoría de redes inalámbricas.

8 AGRADECIMIENTOS

Javier Vargas Ubera: agradece el permiso de estancia sabática por un año de la **UACM**. También agradece las facilidades de infraestructura que le brinda el **INAOE** para desarrollar su estancia sabática. Este trabajo es financiado por el **Proyecto Conacyt No. De Ref. 215421**.

9 BIBLIOGRAFÍA

[1] *Traffic Control Systems Handbook*. Dunn Engineering Associates, in association with Siemens Intelligent Transportation Systems, Publication FHWA-SA-96-032, Federal Highway Administration, 2005.

[2] V. M. Islas Rivera y M. Lelis Zaragoza, *Análisis de los Sistemas de Transporte. Vol I: Conceptos básicos*, (Publicación Técnica No 307, Sanfandila, Qro. México, 2007).

[3] R. Haberman, *Mathematical Models: Mechanical Vibrations, Population Dynamics, and Traffic Flow*, First Edition, (Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, New Jersey, 1998).

[4] *Traffic Detector Handbook, (Vol. I and II)*, Third Edition, L. A. Klein. Publication No. FHWA-HRT-06-108, Federal Highway Administration, 2006.

[5] Evaluation of Non-Intrusive Technologies for Traffic Detection, E. Minge, Publication No. MN/RC 2010-36, Federal Highway Administration, 2010.

[6] A Survey of Mobile Phone Sensing, Nicholas D. Lane, Emiliano Miluzzo, Hong Lu, Daniel Peebles, Tanzeem Choudhury, and Andrew T. Campbell, *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, pp. 140–150, September 2010.

[7] J. Fernández González, *Introducción a las Metodologías Ágiles*, Primera Edición, (Editorial UOC, España, 2011).

[8] United Nations Global Pulse (October 2013), Mobile Phone Network Data for Development. Consultar también: *Proceedings of the Conference on the Analysis of Mobile Phone Datasets*, (NetMob 2013) y (NetMob 2015).

[9] *El Libro Verde de los Sistemas Inteligentes de Transporte Terrestre*, (Comisión de Transportes del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España, 2003).

[10] N. Bellomo and C. Dogbe, On the modeling of traffic and crowds: A survey of models, speculations, and perspectives, *SIAM Review*, 53 (3), pp. 409-463 (2011).

[11] N.J. Garber and L.A. Hoel, *Traffic & Highway Engineering*, Third Edition, (Thomson Learning, California, 2002).

[12] S.P. Hoogendoorn and P.H.L. Bovy, State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling: in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I*: in Journal of Systems and Control Engineering, 215, pp. 283-303 (2001).

[13] P. Berg, A. Mason, and A. Woods, Continuum approach to car-following models, *Phys. Rev. E*, 61 pp. 1056-1066 (2000).