

# **Influencia de la ubicación de detectores en la estimación de indicadores de evaluación del funcionamiento de vías de alta capacidad**

**Rafael Bojórquez Manzo**

Profesor Titular, Depto. de Ing. Civil y Minas, Universidad de Sonora, México  
Doctorando, Depto. de Ing. Civil: Transportes, Universidad Politécnica de Madrid

**José María Pardillo Mayora**

**Rafael Jurado Piña**

Profesores Titulares de Universidad, Departamento de Ingeniería Civil: Transportes,  
Universidad Politécnica de Madrid, España

## **RESUMEN**

En años recientes las administraciones de carreteras vienen adquiriendo mayor compromiso en establecer procesos de evaluación e informar sobre resultados alcanzados por los distintos programas que desarrollan bajo su responsabilidad. En particular, en el contexto de la explotación de vías de alta capacidad este proceso ha cobrado especial énfasis, ya que además posibilita identificar puntos o tramos con problemas de circulación y valorar el efecto de las distintas actuaciones de gestión de tráfico que suelen aplicarse. La evaluación demanda ser sistemática, próxima al tiempo real e incorporar un grupo de indicadores apropiados. A su vez, la estimación de indicadores exige rigor estadístico y de forma relevante datos abundantes y continuos. Los datos recogidos por los detectores de tráfico inicialmente para otros propósitos representan una alternativa atractiva para este proceso. No obstante, los detectores caracterizan un punto de la infraestructura por lo que los datos recogidos requieren extrapolarse a extensiones lineales de una vía. Para contrastar este efecto, es necesario el estudio de tramos con alta densidad de detectores y resultados de recorridos abundantes bajo la técnica del vehículo flotante. Combinación que puede ser difícil de lograr debido a la baja disponibilidad de tramos con esta característica, dificultades para implantar detectores adicionales y limitación de recursos para el desarrollo de esos estudios *in situ*.

Esta comunicación resume el planteamiento de estudio de una investigación iniciada en el Departamento de Ingeniería Civil: Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid. El problema presentado es abordado a través del análisis de diagramas espacio – tiempo de trayectorias vehiculares recuperadas del post-procesamiento de resultados de un programa de micro-simulación de tráfico. Se consigue generar datos para detectores con espaciamiento reducido, estimar indicadores y valorar la influencia con el contraste de magnitudes obtenidas. El proceso seguido sugiere facilitar el estudio de la influencia de ubicación de detectores. Se considera que puede resultar conveniente para otros alcances de iniciativas ATMS y ATIS.

## **1. EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO**

### **1.1 Evaluación bajo contexto sistemático**

La evaluación del funcionamiento en vías de alta capacidad no es un tema novedoso. Esta actividad cuenta con algunas décadas de desarrollo y su ámbito de aplicación más habitual se ha centrado en el análisis puntual de diferentes tipos de emplazamientos. Este tipo de análisis se limita en alcance espacial y sobretodo temporal. Los periodos que aborda suelen ser cortos, discontinuos y con frecuencia para un rango limitado del comportamiento de la circulación. Metodologías contenidas en el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM) suelen ser un referente (TRB, 2000). En años recientes el desarrollo de proceso de evaluación del funcionamiento ha cobrado especial exigencia y a diferencia del ámbito anterior requiere desarrollarse de forma sistemática y permanente. Bajo este contexto toma relevancia en el marco del nuevo énfasis de la estrategia de explotación de redes viarias, misma que lleva por objeto maximizar el uso de la capacidad instalada para preservar la movilidad, reducir la congestión, elevar el nivel de seguridad y disminuir el impacto en el ambiente (Neudorff et al., 2003; PIARC, 2003; Harbor y Coopmans, 2004). El desarrollo de la evaluación no se limita al ámbito de la explotación sino también se exige en otras áreas y programas que desarrollan las administraciones de carreteras. Esto con el objeto de medir la eficacia de resultados alcanzados bajo contraste con metas y objetivos preestablecidos. En ello resulta fundamental un conjunto de indicadores de evaluación y los datos requeridos para su estimación. En el contexto internacional las propuestas y experiencias que avalan lo expuesto son diversas (OECD, 1997; PIARC, 1998; AUSTROADS, 2003; Shaw, 2003; TAC, 2006)

En el ámbito de la explotación la valoración del funcionamiento bajo un enfoque sistemático lo demanda el propio carácter dinámico de esta estrategia. Con ello se permite identificar etapas de la gestión y emplazamientos que presenten deficiencias. También posibilita valorar cuantitativamente el resultado y avance de actuaciones implantadas, facilita la retroalimentación y toma de decisiones. También favorece el ajuste de las actividades para lograr metas y objetivos preestablecidos. En todo caso, el proceso de evaluación del funcionamiento sistemático y continuo es el instrumento que permite documentar científica y estadísticamente el resultado del trabajo realizado (Neudorff et al., 2003; PIARC, 2003; Harbor y Coopmans, 2004).

### **1.2 Metas, objetivos e indicadores**

Entre las metas a las que han venido convergiendo la experiencia en materia de valoración del funcionamiento de vías de alta capacidad destaca la movilidad. Acompañan a ésta otras relacionadas con aspectos ambientales, seguridad, accesibilidad, conservación del sistema y desarrollo económico. Los objetivos pueden ser varios al interior de cada meta y expresan elementos más específicos y cuantificables. Por citar algún ejemplo, para el caso de movilidad, un objetivo específico en un programa de explotación podría consistir en “*reducir la demora total en X%*” o “*reducir el tiempo de viaje en X% respecto del realizado en flujo libre*”. Para

ello es necesario definir indicadores y contar con datos para su estimación. Meyer (2001) y Shaw (2003) exponen que los indicadores para la evaluación sistemática del funcionamiento guardan similitud a los contemplados en procesos convencionales. La diferencia principal lo hace la forma de cálculo sistemática y continua. Indicadores típicos abordados en la experiencia destacan: volumen, intensidad, velocidad, demora total, tiempo de viaje, etc. De estas magnitudes se desprenden indicadores adicionales al referirlos en distintos espacios temporales o al presentarlos como índices respecto de una magnitud de referencia. En todo caso se busca que se asocien al resultado final e incorporen la percepción del cliente-usuario. Se coincide en que indicadores del HCM como el ratio I/C (intensidad/capacidad) y el Nivel de Servicio, no deben contemplarse medulares en la evaluación del funcionamiento.

El tiempo de viaje o magnitudes asociadas vienen destacando entre los indicadores medulares para la evaluación del funcionamiento. Supone ser de fácil entendimiento y representa de forma sencilla la condición del funcionamiento a nivel técnico y de parte del usuario. Asimismo conviene destacar el progreso de indicadores relacionados con la fiabilidad que presta un servicio de transporte. La explotación de carreteras no es ajena a ello y reconoce que dada la dificultad en reducir la demora o el tiempo de viaje, debe buscarse ofrecer un servicio fiable reduciendo la variabilidad en su prestación. En ello conviene observar la dispersión de algunas magnitudes en lugar de valores típicos.

### **1.3 Datos para estimación de indicadores**

Un aspecto medular en el proceso de valoración lo representa la disponibilidad de datos para estimación de indicadores. Esta situación suele representar un esfuerzo mayúsculo y en la mayoría de los casos ser el obstáculo principal para la ejecución del proceso. Diversas experiencias acusan ausencia de recursos su recogida, sobretodo cuando el contexto sistemático exige se realice en forma continua y próxima al tiempo real. Se sugiere utilizar datos que existan en las agencias. La Figura 1 muestra una síntesis de alternativas disponibles de recogida de datos para estimar indicadores de valoración (énfasis en movilidad). De acuerdo con los elementos mostrados el cálculo de indicadores requiere datos dinámicos, relacionados con la demanda a través del tiempo, y datos estáticos relacionados con aspectos físicos de la infraestructura. De ellos el primer grupo puede representar mayor dificultad para su recogida. La procedencia de los datos dinámicos puede tener como origen resultados de la aplicación de técnicas de análisis de tráfico basadas en la aplicación de modelos de simulación o modelos empíricos; este tipo de datos se hacen distinguir como datos sintéticos. En este caso se tendrían resultados referidos a espacios temporales cortos y sobre algunas situaciones típicas de circulación. Alternativamente se prevé que el origen también puede basarse en estudios o mediciones realizadas directamente sobre la infraestructura viaria. Aquí puede optarse por ejecutar mediciones *in situ* mediante estudios convencionales de campo con presencia de personal y algunos equipos automáticos que faciliten el proceso. En este caso el alcance temporal y espacial es limitado ya que este proceso proporciona sólo muestras de datos además de que el plazo de ejecución supone ser dilatado y costoso. Los datos

resultantes bajo este contexto atienden a un proceso de recogida activa. Alternativamente puede acudirse a recuperar datos que inicialmente fueron recogidos para otros propósitos, por ejemplo, para la gestión de tráfico en tiempo real mediante dispositivos de detección de tráfico. Esta forma de recolección se contempla como recogida pasiva de datos.

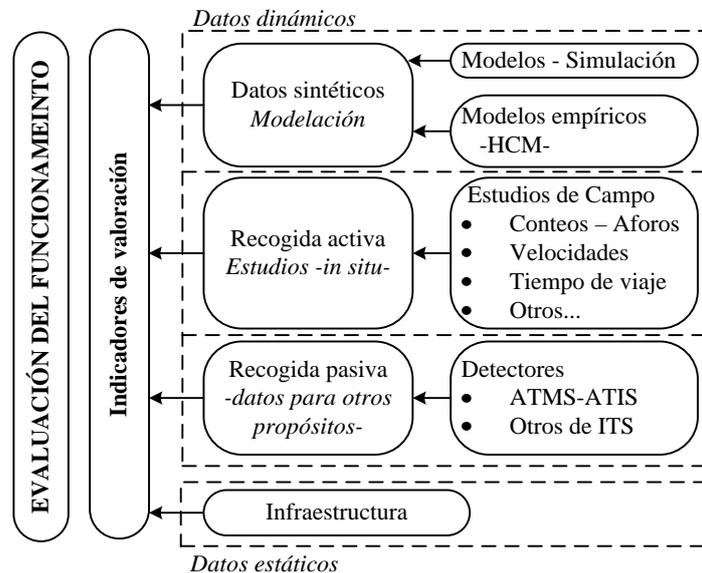


Fig. 1 - Alternativas de recogida de datos para estimación de indicadores

La evaluación del funcionamiento intenta valorar lo “que ha sucedido o esta sucediendo”. Por ello, la experiencia insiste en “medir donde sea posible, modelar en cualquier otra situación”. Luego el contexto sistemático y continuo exige recogida permanente. Aquí cabe reiterar que uno de los principales obstáculos para establecer procesos de evaluación es la escasez de recursos para actividades de recogida de datos, por lo que se recomienda utilizar datos que ya existan (Neudorff et al., 2003; PIARC, 2003; Shaw, 2003; Turner et al., 2004). Ante las condiciones citadas los datos que proporcionan los detectores de tráfico inicialmente recogidos para otros propósitos resultan con ventaja. El proceso de recolección suele ser continuo y la información suele agruparse en intervalos cortos. Esta característica posibilita el desarrollo sistemático lo que permite el seguimiento del funcionamiento a través del tiempo. La condición de continuidad también permite el estudio de variabilidad de algunos indicadores, como una referencia de la fiabilidad en el funcionamiento de la infraestructura. Es evidente que este escenario se propicia por la implantación de sistemas de detección y vigilancia de ITS fundamentales en el marco del desarrollo de la gestión y explotación el tráfico. Se estima que la implantación de esta tecnología vaya en aumento.

En contrapeso a las ventajas arriba citadas, experiencias recientes han plasmado una serie de preocupaciones que requieren de estudio. Entre ellas destaca la que hace referencia a la relación intrínseca que tienen las estaciones de detección sobre un punto o sección de una vía. Por tanto, para utilizar estos datos en la evaluación del funcionamiento requiere realizar una extrapolación de punto a extensión lineal. Aspectos de posición y espaciamiento de equipos

de detección pueden resultar sensibles en este supuesto. Se sigue demandando su estudio para incorporar estos datos a procesos de evaluación (Turner et al., 2004; Margiotta et al., 2006).

## **2. METODOLOGÍA PROPUESTA**

Una alternativa que permitiría abordar el análisis plasmado sería el desarrollo del estudio sobre una vía con alta densidad de detectores y recoger de forma intensa datos de recorridos bajo técnica del vehículo flotante. Esto para valorar la influencia de la ubicación de detectores contrastando indicadores estimados con datos recabados por estos dispositivos y los obtenidos en los recorridos referidos. En algunos países con proyectos consolidados de gestión de tráfico en vías de alta capacidad se cuenta con itinerarios instrumentados con estaciones de detección con separaciones que inician de 0.5 a 0.8 km. No obstante ésta situación no es generalizada. En otros casos las estaciones suelen ubicarse a mayores espaciamientos o sólo próximas a algunas entradas o salidas de las vías. En otras ocasiones las estaciones de detección exhiben espaciamientos aparentemente aleatorios. Por tanto, encontrar tramos con la cobertura inicialmente descrita puede resultar difícil. Asimismo, la realización de estudios con técnica de vehículo flotante supone ser de alto coste, realizarse en plazos dilatados y centrarse el trato de muestras.

Ante ese escenario en una primera aproximación el trabajo propone abordar el estudio apoyándose en la técnica de microsimulación. Utilizar datos sintéticos resultantes de este tipo de herramientas para valorar la influencia de ubicación de detectores en la estimación de indicadores de evaluación del funcionamiento. Esto con base en una serie de escenarios o casos de estudio. No debe perderse de vista que el objeto final es definir condiciones que logren una mejora en la estimación de indicadores con datos obtenidos mediante recogida pasiva, es decir, los proporcionados de forma directa por detectores.

Entre las opciones disponibles de microsimulación se eligió el programa TSIS/CORSIM Versión 6.0. Éste incluye un conjunto de programas informáticos desarrollados para la FHWA mismo que permite el análisis del comportamiento del tráfico en distintos tipos de emplazamientos viarios, condiciones de circulación y bajo diversas actuaciones de gestión. El sistema modela la infraestructura basándose en una configuración de arcos (tramos) y nodos. Aplica un enfoque estocástico evaluando el estado de todos los componentes a través de pequeños intervalos de tiempo; suele ser típico 1 s (ITT Industries Inc., 2006). Entre los principales resultados que arroja el programa se distingue un conjunto de indicadores que guardan similitud con algunos de los referidos anteriormente. Complementariamente en el proceso se genera un archivo binario que contiene las trayectorias individuales de cada vehículo para visualizar de manera animada el proceso de simulación (módulo TRAFVU). En la Figura 2 puede observarse esta fase y distinguirse una ventana que con datos dinámicos del comportamiento vehicular en cada incremento de tiempo de la simulación.

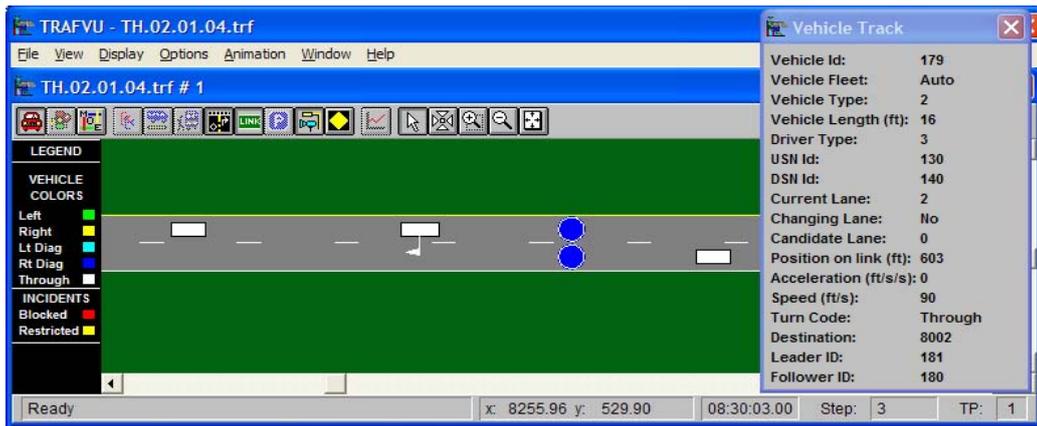


Fig. 2 - Datos de trayectorias vehiculares visualizadas en TRAFVU

La información de trayectorias individuales resulta relevante para el interés para el desarrollo de la metodología misma que se sintetiza en la Figura 3. Los indicadores utilizados en la realización de contrastes responden a algunos de los comentados previamente y tratan con aspectos de cantidad y calidad del funcionamiento. Conteo, intensidad, Distancia total recorrida por los vehículos, Tiempo total utilizado por los vehículos, Demora, Velocidad Global y variabilidad de algunos de ellos forman un primer grupo para contraste. De estos pueden desprenderse indicadores adicionales referidos a plazos temporales distintos.

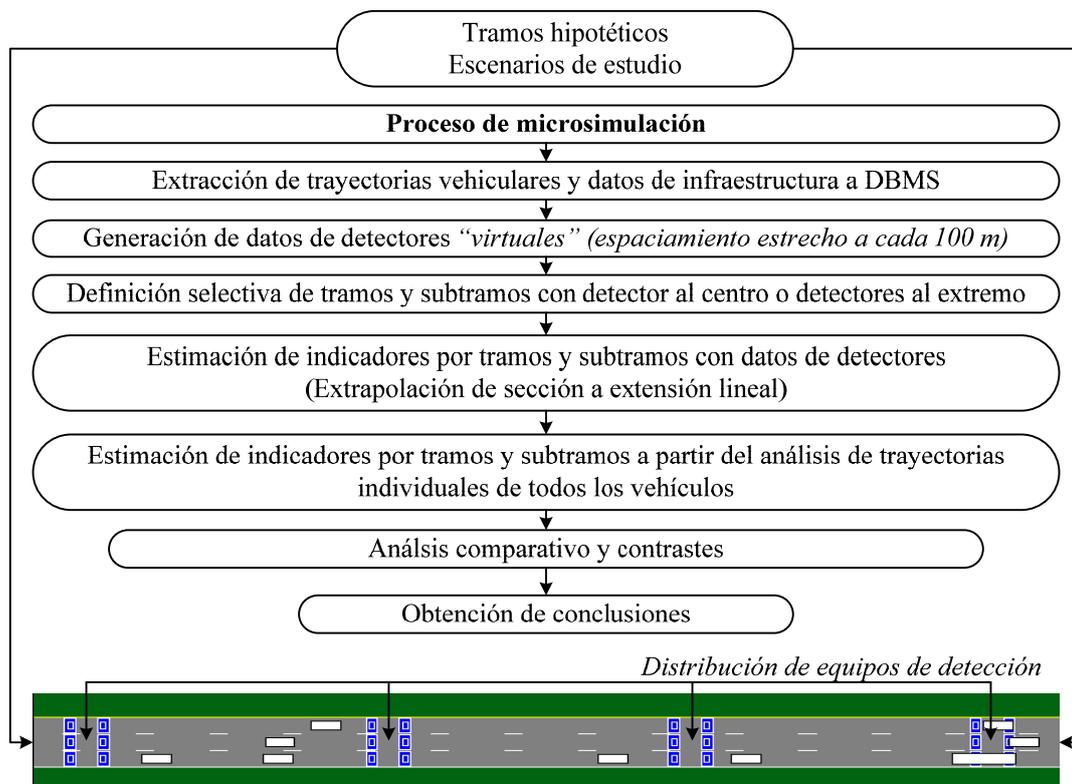


Fig. 3 - Síntesis esquemática de la metodología propuesta

Los escenarios de estudio consisten en itinerarios unidireccionales de autopistas de extensión no mayor a 15 km configurados en distintas topologías arco (tramo) - nodo. Algunos se

diferencian por presencia de ramales de entrada y salida en diversas configuraciones. También se sujetan a distintas intensidades y repartos direccionales de tráfico. La información de entrada de cada escenario es suministrada al programa mediante un archivo TRF (tipo ASCII). Una vez ejecutada la simulación se procede a la extracción de la información. En principio se rescatan datos sobre la configuración física de la infraestructura y en seguida datos de trayectorias individuales contenidos en un archivo binario. Para ello se hizo necesario el desarrollo de software adicional bajo el entorno de MATLAB. La información extraída es abundante y se guarda en una base de datos gestionada en SQLServer.

La generación de datos de detectores parte del post-procesamiento de diagramas espacio-tiempo rescatados de trayectorias vehiculares. Para ello se ha desarrollado un programa que incluye algoritmos de funcionamiento de detectores doble lazo y tipo radar. Los datos estimados se agregan en intervalos que parten de 30 s resumiendo información de conteo, magnitudes parciales que permiten obtener la velocidad media aritmética, media armónica y varianza. Suele ser habitual que en detectores convencionales únicamente se registre la media aritmética de la velocidad. Adicionalmente se calcula y registra la aceleración media así como su varianza en la sección de detección. Esta magnitud cobra un sentido relevante y aparece como un valor de “ruido de la aceleración” mismo que coadyuva en la definición de extensiones de la infraestructura donde es necesario una separación más estrecha de estaciones de detección. A mayor “ruido” se supone una mayor variación en el comportamiento de la circulación. La separación inicial de detectores parte de los 100 m. La extensión lineal total de un itinerario se procede a dividirla en tramos o subtramos definidos acorde a una configuración elegida de estaciones de detección. Con ello y usando datos agrupados por cada estación de detección se obtienen los indicadores referidos a una extensión lineal de la vía.

De forma alternativa y con base a la definición previa de tramos se estiman los mismos indicadores cuyo cálculo se basa en el mismo diagrama espacio – tiempo de cada trayectoria individual. Esta información supone ser la base de referencia ya que cuenta con la totalidad de los recorridos que se presentan sobre el itinerario y cada tramo. El contraste de indicadores realiza con el Error Cuadrático Medio y el Coeficiente de Determinación  $R^2$ .

### **3. CONCLUSIONES**

Resultados preliminares sugieren que la metodología desarrollada permite establecer de forma racional configuraciones básicas de sistemas de detección de tráfico que permitan una mejora en la estimación de indicadores de evaluación del funcionamiento. Con ello se lograría una mayor fiabilidad en los resultados de un programa permanente y sistemático de evaluación del funcionamiento. El proceso desarrollado supone facilitar la definición de ubicación de estaciones de detección en otras iniciativas que se ven incluidas en los sistemas de gestión de tráfico en vías de alta capacidad. No debe descuidarse que el resultado alcanzado responde a una condición de modelación, por lo que en la medida de lo posible deberá contrastarse con

estudios sobre itinerarios con alta densidad de detectores y datos abundantes resultantes de estudios bajo técnica del vehículo flotante.

## REFERENCIAS

AUSTROADS. (2003). National Performance Indicators in Australasia. *Routes/Roads*, 320, 28-34.

Harbor, B. y Coopmans, J. (2004). *The Move of the European Road Administrations. Towards Network Operations*. Paris, France: Subgroup Telematics - Conference of European Directors of Roads.

ITT Industries Inc. (2006). *CORSIM User's Guide V6.0*. McLean, VA: ITT Industries, Inc. - Federal Highway Administration - Turner-Fairbank Highway Research Center.

Margiotta, R., Lomax, T. J., Hallenbeck, M. E., Turner, S. M., Skabardonis, A., Ferrell, C., et al. (2006). *Guide to Effective Freeway Performance Measurement* (Final Report and Guidebook: NCHRP Web Document 97). Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program.

Meyer, M. (2001). *Measuring That Which Cannot Be Measured -- At Least According to Conventional Wisdom*. Paper presented at the Performance Measures to Improve Transportation Systems and Agency Operations, Irving, CA.

Neudorff, L., Randall, J., Reiss, R. y Gordon, R. (2003). *Freeway Management and Operations Handbook* (Report No. FHWA-OP-04-003). Washington, DC: Federal Highway Administration.

OECD. (1997). *Performance Indicators for the Road Sector*. Paris, France: Organisation for Economic Cooperation and Development.

PIARC. (1998). *Development of Tools for Performance Measurement* (Final Report No. 15.02.B ). Paris, France: C15 PIARC Committee - Association mondiale de la Route / World Road Association.

PIARC. (2003). *Road Network Operations Handbook* (No. 16.02.B ). Paris, France: C16 PIARC Committee - Association Mondiale de la Route / World Road Association.

Shaw, T. (2003). *Performance Measures of Operational Effectiveness for Highway Segments and Systems* (NCHRP Synthesis of Highway Practice No. 311). Washington, DC: Transportation Research Board.

TAC. (2006). *Performance Measures for Road Networks: A Survey of Canadian Use* (Final Report). Ottawa: Transportation Association of Canada.

TRB. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Turner, S., Margiotta, R. y Lomax, T. (2004). *Lessons Learned: Monitoring Highway Congestion and Reliability Using Archived Traffic Detector Data* (Final Report No. FHWA-OP-05-003). Washington, DC: Federal Highway Administration.