

Capacidad de un sistema de transporte público trolebús en base a sus parámetros de influencia

Transit capacity of a trolley public transport system based on influence parameters

Moreno González, Emilio*¹ y Romana García, Manuel²

¹Departamento de Vías, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
Mérida 5101, Venezuela

²Departamento de Ingeniería Civil, Transportes, Universidad Politécnica de Madrid. 28040
Madrid-España
*emilio@ula.ve

Resumen

El presente artículo propone una metodología que permite medir la capacidad de tránsito de un Sistema de Transporte Público Trolebús (STPT) en forma robusta. Dicho sistema representa una línea de transporte tipo troncal localizada en Mérida-Venezuela, inserta en viario central sobre el eje arterial más importante de la ciudad. Se analiza el tramo en fase operativa correspondiente a una longitud de 10,3 km con estaciones espaciadas a una distancia media de 731 m y que conecta distintos sectores, principalmente, el asentamiento urbano de Ejido y parte sur del área central metropolitana. El STPT está provisto de vehículos trolebús que circulan en plataforma reservada con interrupciones que se distinguen bajo dos modalidades: intersecciones a nivel y cambios de sentido. Ambas entidades se encuentran controladas por semáforo de tiempo prefijado al momento de medir. Se utiliza la metodología más difundida para el cálculo de capacidad y se realiza una evaluación exhaustiva de su parámetro principal (demora en parada) en conjunto con otros parámetros críticos, lo que permite obtener resultados satisfactorios sobre la variabilidad precisa de la capacidad que ofrece el citado sistema. Las mediciones fueron realizadas en días laborables y fines de semana mediante un muestreo diseñado en dos fases: una exploratoria, para precisar la dispersión de los parámetros medidos, y otra definitiva, con la finalidad de ampliar la muestra y disminuir el error típico cometido. La campaña de datos fue realizada entre los años 2007 y 2008, siendo esa la fecha de referencia de los resultados mostrados.

Palabras clave: Capacidad, transporte público, trolebús, plataforma reservada, demora en parada.

Abstract

The work proposes a methodology advised to measuring the transit capacity of a Trolley Public Transport System in robust form. The above mentioned system represents a main transport route located in Merida – Venezuela that circulates in central running way on an important arterial of the city. The analyzed street segment has a length of 10,3 km with average bus stop spacing of 731 m, connects the urban zone “Ejido” and the south of metropolitan area. The system is provided with trolleys on reserved running way and interruptions: grade intersections and reversals. Both entities are controlled by fixed time traffic signals. The methodology is the most widely know for the capacity calculation and the exhaustive parameters evaluation such as dwell time at bus stop and others, is realized, which allows obtaining satisfactory results in the precise capacity variability. The measurements were realized in working days and weekends by means of a sampling in two phases: an exploratory, for measuring the parameters dispersion, and other, for expanding the sample and reducing the typical error. The data capture was realized between 2007 and 2008, being the reference date of the showed results.

Key words: Transit capacity; public transport; trolley; reserved running way; dwell-time at bus stop.

1 Introducción

Los sistemas de transporte público urbano desempeñan

una función primordial en la movilidad de los ciudadanos, su funcionamiento debe ser conocido suficientemente para poder optimizar los recursos. En la caracterización se pue-

den emplear varios parámetros, pero el que resulta de mayor utilidad en la organización y seguimiento de los servicios, es la capacidad. En ella influyen aspectos como: número de viajeros que suben o bajan del vehículo, tipo de infraestructura y otras interferencias. Un modo de minimizarlas es dotar a la plataforma de un cierto grado de reserva que puede darse en distinta forma. El análisis estima este aspecto clave incorporado recientemente a rutas de transporte público urbano en distintos lugares del mundo. Se enfoca la capacidad en función de un mejor modelo de demora en paradas junto a otros parámetros de influencia, logrando ajustar la metodología más difundida.

En efecto, se selecciona un Sistema de Transporte Público Trolebús (STPT) implementado en la ciudad de Mérida-Venezuela, que garantiza los aspectos requeridos. Este sistema debe garantizar la movilidad de personas en una ciudad de tamaño medio a un coste razonable, ya que representó en su momento, una opción atractiva donde parecía inviable por demanda y financiación, un sistema de transporte soterrado o aéreo de alta capacidad. Su infraestructura híbrida (autobús-tranvía) con un elevado grado de reserva y segregación de su plataforma parece alcanzar un desempeño operativo eficiente, mejora la calidad del servicio, reduce las emisiones y constituye una oportunidad para la organización del transporte público en general.

La metodología usada sigue lo dispuesto en el Manual de Capacidad de Tránsito y Calidad de Servicio (TCQSM, de sus siglas en inglés), en específico, lo concerniente al análisis de autobuses que circulan en plataforma reservada. Los datos captados en la Línea 1 del STPT permiten el ajuste de la capacidad mediante un nuevo modelo del tiempo de permanencia en estación de máxima carga. Así, las nuevas curvas de capacidad determinan no sólo el valor tope experimentado bajo condiciones preexistentes, sino además, el rango preciso de variabilidad asociada a otros parámetros críticos que puede ser de gran utilidad en la gestión y planificación de tramos y líneas futuras, constituyendo un soporte para alcanzar la máxima eficiencia en la red de transporte público planificada. La captación de datos consiste en ir a bordo del vehículo para registrar los tiempos gastados en el proceso durante el recorrido con anotación de incidencias para obtener un muestreo eficiente. El método seguido, organización de datos y tratamiento estadístico, son igualmente detallados. En concreto, los resultados contribuyen al conocimiento de la capacidad ofertada y permiten predecir situaciones futuras.

2 Justificación

Si bien puede llegar a compararse la capacidad de un autobús articulado a un tranvía pequeño por similitud entre ambos modos de transporte, ésta tiende a ser inferior debido a demoras que se producen en paradas, terminales, intersecciones y por propia fricción con el resto del tráfico. Conocer esta realidad es importante, por un lado, para justificar un sistema de alta o mediana capacidad, y por otro, para

implementar mejoras que permitan atenuar esas demoras que se producen en sistemas con menor infraestructura.

La tendencia hacia una elección de sistemas de capacidad intermedia, observada, obedece en gran medida a la cantidad de ciudadanos dispuestos a pagar un cierto valor por su viaje. Sobre todo en ciudades medias, donde la financiación y el mantenimiento de la infraestructura pueden estar influenciados en gran medida por la recaudación de tarifa, valor que muchas veces, resulta insuficiente para mantener buenos estándares en calidad del servicio y propio mantenimiento de la flota. Aspectos clave, que inciden en la captación de usuarios provenientes del vehículo privado. De otra forma, resultaría irrecuperable la inversión y los costes de operación, insostenibles.

Así, los sistemas de mediana capacidad instalados en distintos lugares del mundo, fundamentados en autobuses e infraestructura de bajo coste, constituyen una respuesta seria a la necesidad de movilidad en ciudades de tamaño medio en expansión. Sin embargo, por las características particulares de cada infraestructura no se puede generalizar en su caracterización sin un estudio objetivo que revele la potencialidad de transportación. En este sentido, la capacidad es un parámetro por excelencia muy utilizado en el seguimiento del servicio y explotación de la línea, representa la oferta de movilidad e incide en la fiabilidad del transporte, aspecto que conviene estudiarse en profundidad.

Al estimar la capacidad y su variabilidad en base a los parámetros de influencia local se podrá tener un soporte adecuado para gestionar el desempeño y planificar el STPT. Finalmente, el estudio debe inducir mejoras necesarias para alcanzar buenos indicadores: menor tiempo de recorrido, menos demora y máxima capacidad, permitiéndose el balance adecuado entre los parámetros más representativos.

3 Revisión de la literatura

El estudio de experiencias alcanzadas en distintos lugares del mundo constituye una primera referencia sobre el desempeño de la capacidad bajo cierta infraestructura. En este sentido, algunos ejemplos pueden citarse:

En São Paulo y Porto Alegre, Brasil, se demuestra el aumento de capacidad al instalar canales exclusivos en ciertas rutas de autobús. Se tienen interferencias a más de 100 bus/h por canal y demoras notorias en paradas que son atenuadas con autobuses en convoy (4-6 unidades), permitiendo el adelantamiento en parada bajo dos tipos de servicio: convencional y expreso. Por otra parte, el caso de Curitiba es una referencia obligada en sistemas de autobuses rápidos, donde destaca la capacidad de 40 bus/h en hora pico y transporta hasta 11000 pas/h por sentido. En Bogotá el Transmilenio, está constituido por auto-buses que circulan en viario central exclusivo de 2 canales por sentido, se observa un rango similar al obtenido en sistemas de alta capacidad, entre 11000 y 40000 pas/h por sentido en hora pico (Steer Davies and Gleave). Su amplia plataforma, grado de reserva y aplicaciones ITS (Intelligent Transport System) lo

convierte en un sistema de autobuses con gran capacidad.

El Transitway de Ottawa, presenta servicio convencional y expreso, reporta volúmenes entre 180-200 bus/h y hasta 10000 pas/h por sentido. En este valor incide el método de pago y uso de autobuses articulados. El bus guiado O-Bahn en Adelaida, al sur de Australia, presenta 4000 pas/h/sentido y su aplicación es más rentable en ciudades pequeñas con baja demanda. El Busway de Brisbane reporta 40 bus/h y 9500 pas/h por sentido en las secciones más ocupadas. Flujos en vía expresa por encima de los 100 bus/h por sentido en hora pico son encontrados en el canal-bus a contra flujo de Long Island, New York. Otras vías rápidas de autobús en los EE.UU. y Australia tienen menos de 100 bus/h y un volumen de 50-70 bus/h por sentido, es más típico. El BRT de Beijing en China, tiene canal central segregado por sentido y 87 vehículos en circulación de 180 plazas. El andén sobre isleta de 60-80 m de largo y alcanza una demora total que representa el 23% del tiempo recorrido (8,51 min.); de los cuales 80% se debe a intersecciones y 20% a estaciones. El plan de prioridad establece un verde efectivo (g/C) de 0,39 y ciclos de 150-160 s. En intervalos de un minuto recomiendan enviar grupos de dos autobuses para mantener una operación estable y buen funcionamiento del plan de prioridad en hora pico. (Zheng y Jiaqing, 2007).

Un sistema similar al STPT se encuentra en Quito, Ecuador, opera con 100 trolebuses en hora pico y 53 en hora valle. Modificaciones recientes en su infraestructura denota divergencia en cuanto a capacidad. Finalmente, reuniendo los casos de autobús en Londres, São Paulo y Bogotá, se muestran los datos de la Tabla 1.

Tabla 1. Capacidad en parada de distintos sistemas de autobús articulado.

Capacidad en parada de autobuses articulados			
Vehículo e infraestructura	Cbus	Capacidad	
		pas/h	bus/h
Autobús articulado + pago adentro	160	3777	24
Autobús articulado, piso alto + pago afuera	160	9779	61

Tomado y adaptado de Lillo et al. (2003).

En estos valores de capacidad según la infraestructura destaca el autobús articulado de piso alto y método de pago fuera del vehículo con 61 bus/h, llegando a transportar hasta 9779 pas/h por sentido con vehículos de 160 plazas, cantidad superior al STPT (140 plazas). Otros autores destacan 120 pasajeros por autobús articulado, valor que bajo un intervalo mínimo de 60 s determina 7200 pas/h por canal (Zamorano et al., 2006). En este caso, una capacidad calculada sin considerar las afectaciones implícitas en el servicio.

En cuanto al desempeño, si la demanda alcanza o excede la capacidad, la calidad del servicio se ve afectada (Ryus et al., 2003). Por esta razón, es importante mantener una capacidad adecuada en los segmentos críticos del sistema. Por otro lado, mientras los pasajeros son recogidos en una parada, los autobuses pueden interferir unos con otros

lo que degrada la calidad del servicio (Gibson et al., 1989; Fernández y Planzer, 2002). Levinson (1983) ya sugería que la demora en parada era un parámetro importante que afecta la calidad del servicio; desarrolló un modelo lineal que crece a tasa constante y en función del número de viajeros. Lobo (1997) determina que el tiempo en paradas es aproximadamente la mitad del tiempo de viaje, lo que representa un valor considerable. Chien et al. (2000) expone, que la demora es determinada principalmente por las actividades de pasajeros en cada parada. Fernández y Planzer (2002) confirman que la parada es el punto del viario donde se gasta gran proporción del tiempo, siendo el cuello de botella principal, en las operaciones de autobús.

Según lo expuesto, la demora en parada luce como un parámetro principal en la estimación de la capacidad que debe ser considerado. La metodología más difundida expuesta en Kittelson et al. (2003) determina análogamente una dependencia lineal con el tiempo unitario por viajero subido y/o bajado para estimar la demora. No obstante, Gardner, Cornwell y Cracknell (1991) habían anunciado que la demora media en parada variaba entre 45 y 90 s, lo que pone en duda la aplicación de un modelo lineal por alta variabilidad. Estudios posteriores demuestran el funcionamiento apropiado de las paradas cuando el grado de saturación (v/C) es inferior a 0,60. Los valores de capacidad fueron obtenidos mediante simulación en paradas múltiples y los resultados determinan que la capacidad ideal para una parada con 2 zonas de carga está entre 60-130 bus/h bajo operación ordenada (Gibson y Fernández, 1995). Y en 30-60 bus/h para paradas con una zona de carga, dependiendo de la tasa de subida de pasajeros. Otro aspecto que puede influir en la demora y disminución de capacidad es el control de tráfico próximo. La influencia del semáforo cercano a la parada puede producir reducciones de hasta un 40% en la capacidad (Gibson y Fernández, 1996).

Según lo observado, la congestión en sistemas de transporte público ocurren donde se realizan las operaciones de embarque y desembarque de pasajeros (paradas). En consecuencia, la metodología condiciona la capacidad de tránsito del sistema a la capacidad de sus paradas, lo que supone mayor estudio del proceso de transferencia.

Centrándonos ahora en el estudio de modelos de capacidad disponibles, el Highway Capacity Manual (HCM, 1985) define la capacidad en el acceso a una intersección como: el máximo número de vehículos que puede pasar por hora, representando el inverso del intervalo medio entre vehículos cuando hay cola en el acceso, imponiéndose de esta forma, un modelo de partida específico. Gibson et al. (1989) señalan que la capacidad en parada de autobús es determinante en el desempeño y emiten una definición análoga para el caso de capacidad en parada como: "máximo número de vehículos por hora que pueden entrar a la zona de carga". No obstante, en esta ocasión, no está asociada sólo a un intervalo medio entre vehículos tratando de acceder, sino que además, debe considerar el tiempo de permanencia en la misma por transferencia de viajeros.

Levinson (1983) ya intuía que el desempeño podría mejorar si se mantiene un mínimo de paradas. Jacques y Levinson (1997) comparan la fórmula de capacidad propuesta en el HCM (1994) con los resultados obtenidos del modelo de simulación TRAF-NETSIM, aplicado, para evaluar distintos escenarios de circulación y obtener datos de velocidad. De esta forma, analizan el punto en que se alcanza la capacidad, considerado el momento en que la velocidad del autobús desciende drásticamente y cuando se forman colas tratando de acceder a la parada. Se comprueba una probabilidad de fallo del 25 % (dificultad de parada) para estimar la capacidad, lo que modifica la fórmula del HCM. Jacques y Levinson (2000) proponen que el análisis se realice en los puntos críticos del viario con más baja capacidad y sección homogénea, tanto en centro de ciudad como en vía arterial. Concluyen que se necesita más estudio sobre la operación de líneas de autobús rápidos en ambos entornos. En suma, de la revisión deducimos, que no existe un modelo específico para estimar la capacidad del STPT, no obstante, se prevé que el modelo expuesto en Kittelson et al. (2003), ampliamente difundido, pueda ser utilizado incorporando los parámetros locales.

4 Planteamiento del problema

De lo visto, la parada es el elemento del viario donde se genera más demora en operaciones de autobús. Esta demora afecta la capacidad de la línea y para profundizar en su estudio, debe plantearse un análisis exhaustivo de los parámetros de influencia para una cuantificación precisa. Por otro lado, los estudios de capacidad no se han planteado como variable el grado de reserva de plataforma, este es un aspecto importante, que puede iniciarse con el análisis del STPT, dado que éste tiene un nivel alto de reserva. Siempre es posible variar el grado de reserva y es útil saber cómo influye en la capacidad. De ahí que la modelización considerando el grado de reserva pueda ser de gran interés para quienes gestionan y planifican este tipo de transporte. Asimismo, se señala que la capacidad en parada es determinante en el desempeño y que ésta debe adecuarse a la demanda para lograr un intervalo óptimo entre vehículos, esto es, máximo número de viajeros transportados con un mismo número de autobuses. Los resultados constituyen una herramienta útil de apoyo en la toma de decisiones.

Para lograr la correcta modelización de la capacidad se realiza la importancia de un estudio previo de la demora en parada. Al medirla, es preciso ir a bordo del vehículo para cuantificar las demoras que ocurren durante el recorrido, llevando un registro de las incidencias que luego permitan depurar los datos atípicos. En este sentido, se propone descomponer primero el proceso operativo, y en posterior, definir la estrategia de aforo en dos fases con la intención de racionalizar el esfuerzo; en primer lugar un sondeo exploratorio que estime la dispersión alcanzada en los parámetros, y luego, un estudio definitivo que busque reducir el error típico mediante la ampliación de la muestra. El trabajo en

todo caso, debe tratar la identificación, definición y cuantificación de los parámetros, para generar un rango exacto de capacidad en función de la demanda y parámetros más influyentes. El objetivo específico debe ser: medir el desempeño de un tramo de línea 1 del STPT en el que se emplean trolebuses, con gran fiabilidad, de manera que se pueda relacionar su capacidad con su grado de reserva y nivel de infraestructura, evaluando el efecto de semáforo, logrando un modelo de demora en parada a partir del número de pasajeros subidos y bajados. Para alcanzar fiabilidad, se optimiza la campaña de datos (ubicación dentro del vehículo, necesidad de contadores, diseño de formatos para la recogida de datos, etc). Asimismo, se comprueba qué otros factores pueden influir en campo y se aplica un tratamiento estadístico exhaustivo posterior que haga tangible la modelización de la capacidad en forma robusta.

5 Metodología de cálculo

El TCQSM muestra un modelo de capacidad que bien puede ser tomado como modelo de partida en nuestro análisis. Así, la capacidad por canal-bus se obtiene mediante la expresión general:

$$C_{cb} = C_p \times N_{zc} \times f_{gd} \times f_{ap} \quad (1)$$

Adaptando la expresión (1) a las condiciones locales comprobamos que el ajuste por número de zonas de carga "Nzc" toma el valor de uno, dado que se cuenta con una zona de carga por sentido en estación. Asimismo, los factores por giro a la derecha "fgd" y por adelantamiento en parada "fap" desaparecen por condiciones de canal exclusivo que no permite estas afectaciones al momento de salir el trolebús de la estación, resultando un modelo más simple:

$$C_{ct} = C_p \quad (2)$$

En la ecuación (2) "Cp" representa la capacidad en la parada por zona de carga y ésta puede ser estimada como:

$$C_p = \frac{3600(g/C)}{td + (g/C)dp + (Z.Cv.dp)} \quad (3)$$

Analizando las ecuaciones (2) y (3); podemos decir que la capacidad del canal del trolebús "Cct" está en función de tres parámetros: tiempo medio de despeje "td", considerado el mínimo tiempo requerido para acelerar y salir de la zona de carga; demora media en parada "dp" en función del tiempo por subidos y bajados, incluye el tiempo por apertura-cierre de puertas y por accionamiento de rampas de acceso al vehículo; y un margen de operación que estima las demoras que ocurren por encima de la media según cierta "tasa de fallo" admisible. El factor (g/C) es la relación verde efectivo disponible por semáforo próximo a la parada. Esta afectación es doble en la expresión (3): en el

numerador representa la porción de hora en que el trolebús puede entrar o salir de la parada; y en el denominador, la proporción de demora que ocurre durante la fase roja (disminución hipotética de demora en parada). A mayor relación verde efectivo más capacidad por canal, y para el caso de total prioridad, se debe asumir un valor de uno.

Si bien es cierto la capacidad en la parada teóricamente tiende a maximizarse cuando un vehículo está dispuesto a salir tan pronto como otro detrás pretenda parar, igualmente es probable, que se generen fallos en esta operación. Por esta razón, el modelo introduce el concepto de “tasa de fallo” y representa la probabilidad de que un vehículo llegando a la parada consiga otro ocupando la zona de carga. Cierta estudio recomienda en área central usar tasas entre el 7,5 y 15%, advierten que una tasa inferior al 15% garantiza el balance entre buena velocidad y alta capacidad, y que por encima de este valor, se generan colas, representando el punto donde se inicia el descenso rápido de la velocidad. Simulaciones realizadas indican que la velocidad a tasas del 15% son 20% más bajas aunque la cantidad de autobuses programada sea inferior a la capacidad y un valor de tasa de fallo del 25% se recomienda para estimar un nivel de servicio “E”. (Jacques y Levinson, 1997).

Esta probabilidad de fallo es utilizada para determinar un margen de operación “Mo”, considerando la demora media en parada y tasa de fallo deseada. Asimismo, en procura de fijar un “Mo” ajustado por variabilidad de la demora, se incluye el coeficiente de variabilidad “Cv” definido como la desviación estándar sobre la demora media. De observaciones en rutas de autobús de los EE.UU. se conoce un rango entre 0,4 y 0,8 para éste coeficiente. Y para estimar la probabilidad de fallo se utiliza la variable normal estándar “Z” en función de la tasa de fallo admitida si los datos se ajustan a una distribución normal. El “Mo” constituirá el máximo tiempo en segundos que la demora en parada puede exceder la media sin que ocurra fallo cuando el número de autobuses dispuesto a usar la parada alcanza su capacidad. Este término se añade al tiempo de despeje y demora media en el denominador de la expresión (3) para asegurar que los fallos no ocurran con mayor frecuencia a cierta tasa de fallo admitida, constituyendo un término de diseño.

6 Caracterización de la Línea 1 del STPT

El tramo objeto de estudio presenta una longitud aproximada de 10,3 km., consta de 13 estaciones intermedias y 2 terminales: el “Terminal sur” ubicado en “Ejido” y la estación intermedia “Pie del Llano” que funciona como terminal provisional muy cerca del casco central de la ciudad de Mérida-Venezuela. El citado tramo representa el 55% de la obra total proyectada para Línea 1 y tiene un canal por sentido segregado e inserto en arterial importante. La distancia media entre estaciones es de 731 m con interrupciones en el viario a nivel: 17 intersecciones y 7 cambios de sentido. El control en intersecciones se da mediante semáforo de tiempo prefijado al momento de medir. La figura 1

muestra el plan general de transporte planificado; la Línea 1 tiene más de la mitad de su ruta en funcionamiento, y la Línea 2, se encuentra en fase de proyecto. Ambas líneas están destinadas a conformar el STPT. La Línea 3 se prevé con otro tipo de infraestructura, ha sufrido diversos cambios en su definición y tipo de modo a adoptar.

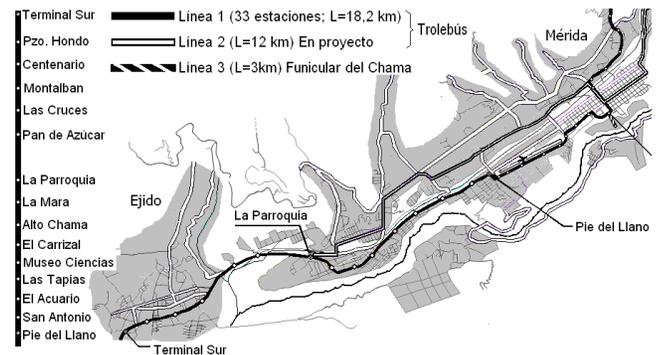


Fig. 1. Tramo en estudio de Línea 1: entre estación “Terminal sur” y “Pie del Llano”. STPT. Mérida-Venezuela

El STPT combina el autobús articulado e infraestructura propia de tranvías. Así, la tecnología de propulsión principal es eléctrica, el modo se conecta a catenaria mediante troles. La infraestructura en estaciones es sobre-elevada en isleta central y admite un vehículo por sentido. El canal está totalmente segregado del resto de tráfico considerando sólo el tramo hasta la estación “Pie del Llano”. Este diseño no admite el adelantamiento en estaciones y la transferencia de viajeros implica la conexión con el andén mediante rampas retráctiles para el acceso a nivel. Véase la figura 2.

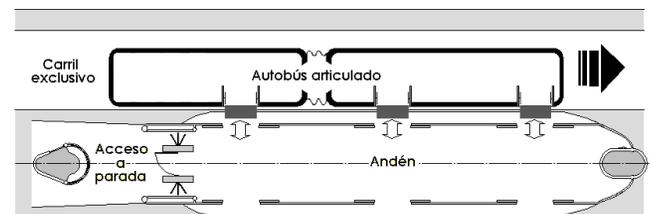


Fig. 2. Vehículo, infraestructura de parada y acceso a nivel en estaciones.

Dos torniquetes permiten el control de pago, se tiene acceso especial para discapacitados y el andén admite la distribución de pasajeros frente a las 3 puertas del vehículo. Los tiempos del proceso de transferencia son controlados y

una simetría de estación también es detallada.

7 Obtención de datos: muestreo y análisis estadístico

Dentro de las técnicas disponibles para la captación de datos se eligió las “medidas en campo” que constituye el método más preciso para obtener los parámetros en la estimación de la capacidad. Se diseñan planillas de registro adaptadas a las condiciones particulares y el proceso constituye el registro en dos grupos de datos: una planilla donde se lleva el conteo sube y baja de pasajeros y la hora de arribo a la estación; y en otra, el tiempo de transferencia discriminado por: apertura-cierre de puertas, puesta en marcha y salida de zona de carga. Es importante resaltar que el tiempo se registra en forma acumulada, y en posterior, se discriminan las demoras por diferencia entre los registros respectivos. Aquellas demoras que ocurren entre estaciones, por intersección u otro evento, son registradas aparte. La campaña de medidas fue realizada en el año 2007 y 2008 abarcando días típicos de la semana, garantizando la mayor representatividad de las horas de servicio. El cuadro operativo mostraba un horario fraccionado atendiendo las horas pico de la mañana y tarde, la demanda se presentaba en forma moderada con oferta de servicio de 4 a 6 trolebuses enviados a intervalos de 15 y 10 min., respectivamente.

7.1 Muestreo

Se propone un muestreo en dos fases para racionalizar el esfuerzo. El tamaño mínimo requerido “n” es obtenido aplicando distribución normal con un cierto error estándar y nivel de confianza del 95%, mediante la expresión:

$$n = \frac{3.84 \times S^2}{e^2} \tag{4}$$

Donde “S” es la desviación y “e” el error estándar permitido. La desviación observada en fase exploratoria resultó de 9 s y el error ± 5 s, lo que determina 13 mediciones mínimas. En fase definitiva, se logran 23 datos de demora media en cada estación por sentido de circulación, el doble del mínimo requerido y el error cometido es de ± 3,7 s.

7.2 Análisis estadístico

La capacidad está condicionada a cuatro variables a saber: tiempo de despeje de la parada “td”; demora media en estación “dp”; margen de operación “Mo” y nivel de prioridad asignado al movimiento en intersecciones (g/C). Los datos demuestran que la parada de máxima carga es “Centenario”, donde se tiene una demora media de 38,9 s en sentido Suroeste y 37,6 s al Noreste. El coeficiente de variación de la demora está entre 0,1 y 0,2 (0,18 promedio), lo que representa mayor consistencia y poca dispersión a la encontrada en el caso de autobuses de EE.UU. Los valores

máximos y mínimos de demora se ubican en 60 y 20 s respectivamente, lo que define una amplitud de 40 s.

El análisis estadístico supone dos pruebas de bondad de ajuste: una de igualdad de varianzas mediante el estadístico F-snedecor y otra de igualdad de medias aplicando t-student. Las muestras a comparar se corresponden con valores medios de demora por estación obtenidos en cada sentido de circulación. Véase la tabla 2. Se nota que existen dos casos en la prueba de igualdad de medias: asumiendo varianzas iguales y varianzas desiguales. Asimismo, se puede observar que $t < t$ crítico en todas las estaciones, lo que determina igualdad de medias por sentido de circulación y tendencia a una misma población. Sin embargo, estas pruebas son válidas, si la población de procedencia de la muestra se ajusta a una distribución normal. En tal sentido, se aplica una prueba para confirmar dicho ajuste. El test “Shapiro Wilk” aplicado a datos de demora en cada sentido de circulación del STPT muestra resultados satisfactorios (W = 0,94 al Suroeste y 0,91 al Noreste). En consecuencia, se propone ampliar la muestra agrupando los datos en ambos sentidos en estación de máxima carga, lo que implica un aumento a 46 medidas, desviación típica de 6,9 s y error cometido de ± 2,0 s, mejores valores de dispersión.

Tabla 2. F-Snedecor y t-student. Demora media por estación y sentido de circulación del STPT.

	S. Antonio	El Acuario	Las Tapias	M. Ciencias	El Carrizal	A. Chama	La Mara	Parroquia	P. Azúcar	Montalbán	Centenario	P. Hondo	Sentido
dp media (seg)	31,3	35,5	30,6	32,8	31,0	33,1	35,4	29,8	31,7	31,0	38,9	33,5	SO
S desv. típica (seg)	7,7	7,5	5,8	5,4	5,2	7,6	7,3	5,8	6,6	6,5	8,6	5,7	
S² varianza	59,2	56,2	33,3	29,0	27,2	57,4	54,0	33,8	43,3	42,3	74,6	32,1	
<small>v1= (n1-1) = 22 (G. Libertad) n1 = 23 en cada estación</small>													
dp media (seg)	32,3	36,3	29,5	32,1	31,8	34,2	32,8	30,9	34,5	30,3	37,6	32,5	NE
S desv. típica (seg)	6,3	6,9	5,4	4,7	3,1	3,8	6,3	3,0	5,8	3,3	4,8	4,3	
S² varianza	39,6	47,7	28,8	21,7	9,6	14,4	39,1	9,0	33,7	10,9	23,0	18,9	
<small>v2= (n2-1) = 22 (G. Libertad) n2 = 23 en cada estación</small>													
Igualdad de varianza (nivel de confianza 95%)													
F	1,5	1,2	1,2	1,3	2,8	4,0	1,4	3,8	1,3	3,9	3,2	1,7	
F (α/2= 0,025; v1= 22; v2= 22)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	
	□ Varianzas desiguales ■ Varianzas iguales												
Igualdad de medias (nivel de confianza 95%)													
t	0,5	0,4	0,7	0,5	0,7	0,6	1,3	0,8	1,5	0,5	0,6	0,7	
t (α/2= 0,025; v= 44)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	

Los resultados del test de normalidad sobre los datos agrupados son mostrados en la figura 3, se aprecia un mejor ajuste comparado con la muestra anterior, un valor W = 0,94 es altamente significativo. También se estudia la independencia de la demora en cada estación respecto a condiciones impuestas tales como: día y hora de medición. Se aplica “tabla de contingencia” y estadístico Chi-cuadrado para demostrar que tales condiciones no influyen en las diferencias observadas de demora media en parada por estación. Dado el volumen de estos cálculos, no son presentados en este artículo. En concreto, el muestreo es eficiente, se tiene una muestra altamente representativa que permite

inferir los parámetros necesarios como: coeficiente de variación de demora (0,20); demora media en estación (37 s); y tiempo medio de despeje (7,2 s), redondeando valores.

7.3 Demoras en el tramo, por rampas de acceso al vehículo y tiempo de despeje

La demora total experimentada en el tramo es de 11 minutos en promedio por sentido de circulación. De los cuales: 7,75% se debe al tiempo perdido en el cambio de fuente de tracción (diesel-eléctrico) que se realiza cerca de la estación “Pie del Llano”; 33,3% por intersecciones y 58,95% por estaciones intermedias. Es importante destacar que un 21,75% de este último porcentaje se debe a la recogida de rampas de acceso al vehículo, lo que representa un tiempo considerable que debe detallarse más adelante. El valor más probable del tiempo de despeje (7,2 s) fue ajustado por longitud efectiva de despeje y aceleración media examinada en campo (1 m/s²).

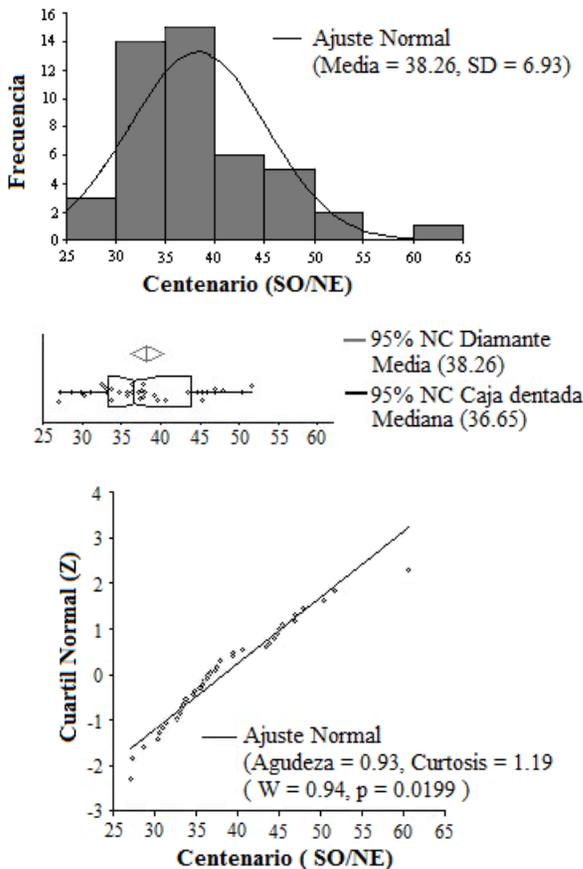


Fig. 3. Test “Shapiro Wilk”. Datos agrupados, ambos sentidos.

7.4 Modelo de capacidad encontrado en el STPT

Descomponiendo la demora media en parada “dp” en

sus términos constituyentes se tiene la siguiente expresión:

$$dp = (da+dr) + ts/b \tag{5}$$

da: demora media por accionamiento de puertas (s)

dr: demora media por accionamiento de rampas de acceso al trolebús (s)

ts/b: tiempo por subidos y bajados en estación (s)

Las demoras por accionamiento de puertas y rampas de acceso al trolebús obedecen a factores humanos y/o mecánicos que tienden a ser aleatorios. Asumiendo un funcionamiento normal para simplificación del problema, estos primeros términos de la expresión (5) constituyen una demora media fija que puede ser estimada como valor más probable. De la base de datos, la demora media por rampa es un 31,4% la demora en parada y el valor más probable de ambas demoras (da+dr) es 23,62 s. Por otro lado, el tiempo por subidos/bajados es una variable dependiente fundamentalmente del número de pasajeros “N” presentes en las operaciones de transferencia. Un ajuste de este tiempo permite calibrar el modelo para determinar la capacidad del STPT. En la figura 4 se muestra el ajuste cuadrático que describe mejor el comportamiento en estación de máxima carga. Se logran buenas correlaciones: r² = 0,79 en ajuste lineal y r² = 0,81 en ajuste cuadrático.

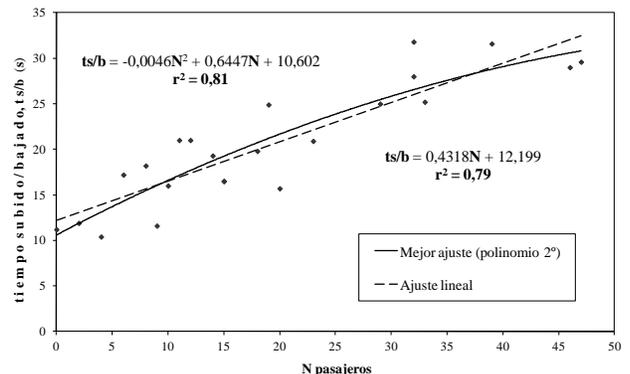


Fig. 4. Tiempo subidos/bajados en estación de máxima carga “Centenario”

Sustituyendo los parámetros hallados y el modelo de tiempo por subidos y bajados en la ecuación (2) se obtiene la capacidad del STPT en función de la demanda en parada:

$$Cct = \frac{3600(g/C)}{7,2 + (34,222 - 0,0046N^2 + 0,6447N) \left[\frac{g}{C} + (Z.Cv) \right]} \tag{6}$$

Cct: capacidad en canal del trolebús (trol/h)

N: número de pasajeros en operación de embarque-desembarque

Esta capacidad está limitada a la cantidad de pasajeros que admite la estación, tipificada en 70 personas (50% la capacidad del vehículo). Se aplica la tasa de fallo del 25%

sugerida, correspondiente a un estadístico "Z" de la curva de distribución normal equivalente a 0,674, lo que modifica la expresión (6):

$$Cct = \frac{3600(g/C)}{7,2 + (34,222 - 0,0046N^2 + 0,6447N) \left[\frac{g}{C} \right] + 0,1349} \quad (7)$$

Así, la ecuación (7) estima la capacidad tanto en condición de prioridad total en intersecciones, como en caso, de no existir un plan de semáforo en orden estricto.

8 Resultados

Una vez definido el modelo de capacidad para el STPT podemos establecer relaciones entre los parámetros para mostrar de qué manera influye uno sobre otro. En la figura 5 se aprecia la relación *Capacidad-Intervalo-Margen de Operación vs tasa de fallo*, según los datos observados.

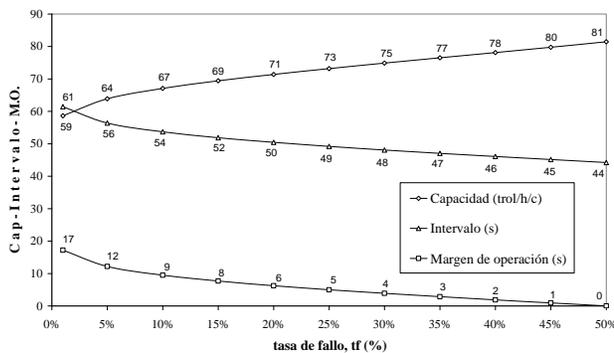


Fig. 5. Relación capacidad-intervalo-margen de operación y tasa de fallo

Se nota divergencia entre capacidad e intervalo; a mayor capacidad menor intervalo entre vehículos. Por otra parte, a mayor tasa de fallo admitida mayor capacidad (en teoría 50%), punto donde no existe margen de operación y por tanto mayor interferencia, aspectos que incidirán negativamente en la velocidad y la fiabilidad de cualquier sistema. Lo ideal es tener un balance entre buen desempeño y alta capacidad mediante la selección de una tasa de fallo idónea. No obstante, encontrar este parámetro, implica el uso de herramientas de simulación que admitan evaluar distintas condiciones de circulación del STPT imponiendo diversas cadencias, y así, detectar las interferencias entre vehículos producidas en cada escenario, interferencias que no se presentaron en campo al momento de medir.

En consecuencia, adoptamos la tasa de fallo del 25% sugerida para determinar la capacidad de 73 trolebús/h por canal, es decir, 10246 pas/h por sentido con intervalo de 49 s y un margen de operación de 5 s. Es importante destacar que este valor es superior a muchos encontrados en sistemas similares, es el resultado de aplicar la metodología original de cálculo TCQSM, considerando el parámetro de demora media en estación observada.

8.1 Capacidad según TCQSM y ajuste con datos del STPT

La metodología TCQSM permite precisar la capacidad del STPT en función de sus parámetros y demora media en parada (37 s). La figura 6 muestra los resultados en caso de prioridad total y también bajo influencia teórica de semáforo próximo. Sin embargo, en estas curvas no queda claro el rango preciso de variabilidad ni el valor máximo de capacidad del STPT como puede verse.

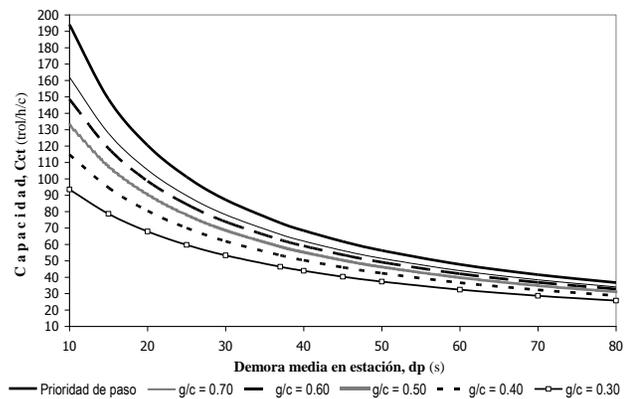


Fig. 6. Capacidad según TCQSM y demora media observada en el STPT.

De esta forma, es necesaria una definición de este aspecto no logrado con la metodología original y que puede ser evaluado. La figura 7 muestra los resultados de aplicar la ecuación (7), se observa tanto del valor máximo de capacidad como el rango de variabilidad en función de la demora media en parada, ubicada entre 34,22 s y 56,81 s. Se evidencia una capacidad de 50 trolebús/h por canal equivalente a 7032 pas/h por sentido bajo condiciones de alta demanda. Un valor inferior al mostrado anteriormente pero que define mejor la capacidad del STPT.

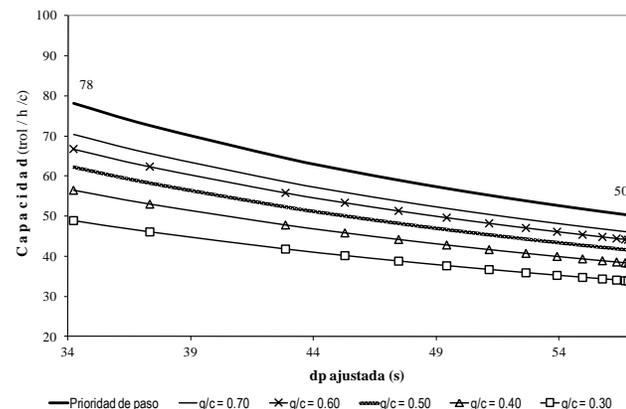


Fig. 7. Capacidad y rango de variabilidad en el STPT.

Asimismo, una relación entre intervalo y demanda de

pasajeros es obtenida. Esta curva puede ser útil en la gestión del servicio en función de la fluctuación del número de pasajeros esperando en la parada. Véase la figura 8.

8.2 Demora por recogida de rampas de acceso al vehículo

Un aspecto interesante de cara a implementar mejoras que puedan significar el aumento de capacidad, constituye la evaluación de la demora por accionamiento de rampas de acceso al trolebús. Suprimiendo esta demora detectada en campo se alcanza un nuevo resultado. Véase la figura 9.

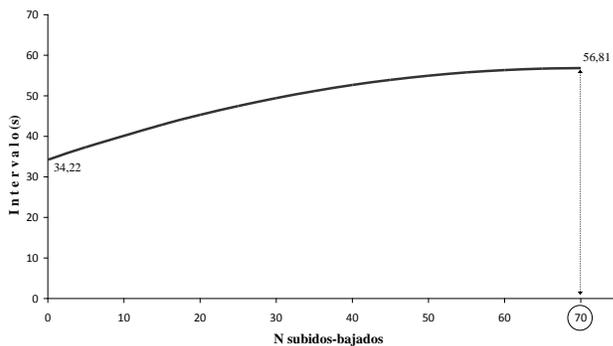


Fig. 8. Intervalo vs. N pasajeros subidos – bajados

Podemos apreciar que la capacidad aumenta a 67 trolebús/h por canal, representando 9338 pas/h por sentido a un intervalo de 41,21 s. Un incremento significativo que sugiere acciones para mejorar este aspecto negativo en las operaciones del STPT. Esta situación tiene que ver con el diseño del vehículo y debe considerarse en líneas futuras.

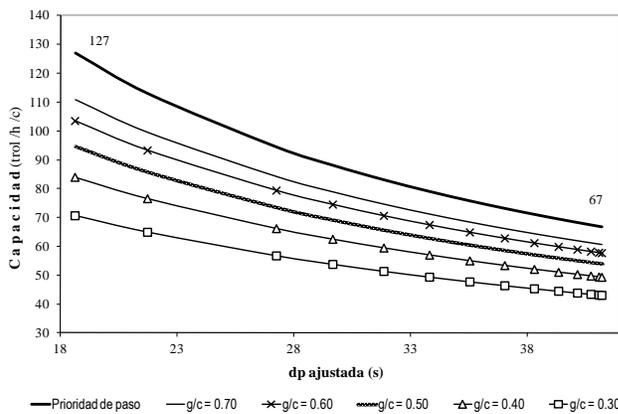


Fig. 9. Capacidad sin efecto de rampas de acceso al vehículo.

9 Conclusiones y discusiones finales

Se logran resultados satisfactorios en la definición de la capacidad del STPT mediante la aplicación de una metodología disponible en el caso de autobuses en plataforma

reservada. El modelo determinista utilizado es ajustado para lograr una estimación más real de la capacidad del STPT que resultó de 50 trolebús/h por canal, es decir, 7032 pas/h por sentido con tasa de fallo admitida del 25% e intervalo mínimo cercano a los 57 s.

Se demuestra que la capacidad bajo condiciones actuales puede aumentar un 34% si se aplica otra medida sustitutiva que elimine las rampas de acceso al vehículo, sobre todo en el caso de líneas futuras. Este incremento representa un valor de capacidad teórica de 9338 pas/h por sentido y un intervalo mínimo entre vehículos de 41,21 s. Intervalo que es alcanzable en la medida que se establezca un control estricto y se imponga un plan de prioridad en intersecciones.

La demora por intersección es el 33,3% del tiempo recorrido representando una demora media de 3,7 minutos, demora que tenderá a mejorar una vez se centralice los semáforos y se mejore su coordinación. La demora por parada tienen una mayor contribución a la demora total, constituye el 59% (6,6 min.) de la demora en el recorrido, y la demora por eventos especiales un 7,7% (casi un minuto) que puede despreciarse dada la causa que la produjo.

El modelo TCQSM considera la influencia de la intersección próxima a la estación que puede ser útil. El descenso observado de capacidad es del 5% por cada 10% de verde efectivo cedido al resto del tráfico.

El análisis evalúa el uso de la metodología original TCQSM frente a un ajuste por aplicación de modelo de tiempo por subidos- bajados, lo que determina el rango preciso de variabilidad y máxima capacidad.

El coeficiente de variabilidad de la demora en parada del STPT resultó mucho menor al encontrado en sistemas de autobús en plataforma reservada de los EE.UU. Esta situación demuestra las ventajas de implementar un canal exclusivo para el STPT en cada sentido y una infraestructura de mayor nivel en estaciones. Dentro de las limitaciones del estudio se tiene:

- Los factores de influencia en canal con tráfico mixto no pudieron ser evaluados dado el grado de reserva y segregación del tramo analizado.
- La interferencia entre vehículos no fue estudiada debido a una cadencia lejos de producirla.

En cuanto a futuras investigaciones se debe realizar:

- Análisis de interferencia entre trolebuses, efecto combinado de parada y semáforo próximo, considerando la capacidad teórica alcanzada y asumiendo distintos planes de prioridad y grado de reserva.
- Estudio de parámetros de influencia en tramos donde se prevé que el STPT compartirá su canal con el resto de tráfico. Este nuevo escenario puede ser de gran interés para los entes que desarrollan el STPT.

Referencias

Chien SI, Chowdhury SM, Mouskos KC, and Ding Y,

- 2000, Enhancements of CORSIM model in simulating transit operations, *J Transp Eng*, 126(5), 396–404.
- Fernández R and Planzer R, 2002, On the capacity of bus transit systems, *Transport Reviews*, 22(3), 267-293.
- Gardner G, Cornwell PR, & Cracknell JA, 1991, The performance of busway transit in developing cities, *Transport and Road Research Laboratory, Research Report RR329*, Crowthorne.
- Gibson J, Baeza I and Willumsen LG, 1989, Bus-stop congestion and congested bus-stops, *Traff Engn Control*, 30(6), 291-302.
- Gibson J y Fernández R, 1995, Recomendaciones para el Diseño de Paraderos de Buses de Alta Capacidad, *Apuntes de Ingeniería* 18(1), Ediciones Universidad Católica de Chile, 35-50.
- Gibson J y Fernández R, 1996, Efecto de una intersección semaforizada aguas abajo sobre la capacidad de un paradero de buses con sitios múltiples, *Apuntes de Ingeniería* 19(4), Ediciones Universidad Católica de Chile, 31-40.
- Jacques K and Levinson H, 1997, *Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials*, TCRP Report 26, TRB, National Academy Press, Washington DC, Available on line at http://gulliver.trb.org/publications/tcrp/tcrp_rpt_26-a.pdf
- Jacques K and Levinson H, 2000, *Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials: Applications and Refinements*, TCRP Research Results Digest No. 38, TRB, National Research Council, Washington DC, September.
- Kittelson et al., 2003, *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM)*, 2nd Edition, Transit Cooperative Research Program, TRB, Washington DC.
- Levinson HS, 1983, Analyzing transit travel time performance, *Transportation Research Record*, 915, TRB, National Research Council, Washington DC, pp. 1-13.
- Lillo E, Wensell U y Willumsen L, 2003, Innovación en el Transporte Urbano: Bus Transit Systems, *Revista de Economía Industrial* N° 353.
- Lobo AX, 1997, *Automatic vehicle location technology: Application for buses*, PhD Thesis, University of London.
- Ryus P, Connor M, Corbett S, Rodenstein A, Wargeling L, Ferreira L, Nakanishi Y, and Blume K, 2003, *A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System*, TCRP Report 88, Transportation Research Board, Washington DC.
- Transit Cooperative Research Program, TCRP Report 90, Volume 1: *Case Studies in Bus Rapid Transit*, TRB, Washington DC, 2003.
- Transit Cooperative Research Program, TCRP Report 90, *Bus rapid Transit, Volume 2: Implementation Guidelines*, TRB, Washington DC, 2003.
- Transportation Research Board, 1985, *Highway Capacity Manual, Special Report 209*, National Research Council, Washington DC.
- Transportation Research Board, 1994, *Highway Capacity Manual, Special Report 209*, National Research Council, Washington DC.
- Zamorano C, Bigas J y Sastre J, 2006, *Manual de tranvías, metros ligeros y sistemas en plataforma reservada*, 1era Edición, Consorcio Regional de Transportes de Madrid, Colegio de Ingenieros de Camino, Canales y Puertos.
- Zheng L and Jiaqing W, 2007, Summary of the Application Effect of Bus Rapid Transit at Beijing South-Centre Corridor of China, *J Transpn Sys Eng & IT*, 7(4), 137-142, Available on line at www.sciencedirect.com.

Recibido: 23 de noviembre de 2011.

Revisado: 28 de noviembre de 2012.

Moreno González, Emilio: *Profesor Asociado en la Universidad de Los Andes. MSc Ingeniería vial (ULA). Doctor en Ingeniería e Infraestructura de los Transportes (UPM). Investigador adscrito al Departamento de Vías-Facultad de Ingeniería.*

Romana García, Manuel: *Profesor Titular Universidad Politécnica de Madrid. Doctor Ingeniero de Caminos (UPM). Subdirector ETSI Caminos, Canales y Puertos. Centro de Investigaciones del Transporte "TRANSYT". Departamento de Ingeniería Civil: Transportes. Correo electrónico: mromana@caminos.upm.es.*

