

Generación de una metodología de análisis y estimación de tiempos de viaje para la planificación de la operación de servicios de transporte público urbano en Santiago

Felipe Sanhueza Cárdenas, José Agüero Gutiérrez, María Bordagaray Azpiazu, Carolina Palma Alvarado
Cityplanning

* Autor para correspondencia:
cpalma@cityplanning.cl

RESUMEN

El tiempo de viaje es uno de los principales insumos en el dimensionamiento de un servicio de transporte público. Su variabilidad implica falta de confiabilidad en los tiempos de espera, lo que afecta la satisfacción del usuario. La presente investigación consiste en una metodología que considera tiempos de viaje probabilísticos y propone dos estadísticos alternativos al asumido exógenamente en la actualidad para el diseño del programa de operación de una unidad de negocio del sistema Transantiago con el objetivo de identificar las posibilidades de mejora de la calidad del servicio y la optimización de los recursos dispuestos para ello.

Palabras clave: tiempo de viaje, metodología, predicción

ABSTRACT

Travel time is a principal input in the design of public transport services. Its variability implies unreliability in waiting times, which affects user satisfaction. This research describes a methodology that considers probabilistic travel times and proposes two alternative statistics to the one exogenously assumed nowadays in the design of the operating program of a business unit of the Transantiago system in order to identify the possibilities to improve the service quality and the optimization of the required resources.

Keywords: travel time, methodology, prediction

1. INTRODUCCIÓN

El tiempo de viaje es uno de los principales insumos en la provisión de servicios de transporte: permite dimensionar los recursos para la operación con el fin de dar una respuesta óptima a la demanda existente. En este contexto, el problema, tanto para el usuario como para la operación, radica en la variabilidad existente tanto en los propios tiempos de viaje como en la demanda a la que dar servicio.

La variabilidad del tiempo de viaje impacta en la confiabilidad de los tiempos de espera y, por ende, en la satisfacción del usuario. De hecho, Bates *et al.* (2001) señalan que para muchos viajeros la variabilidad de este atributo es más importante que el propio tiempo de viaje, estimado como su promedio, lo que implica que la puntualidad y regularidad es altamente valorada.

Por esta razón, además del desarrollo de metodologías para el control de la operación en tiempo real (Cortés *et al.*, 2011), es de gran importancia el post-análisis, de manera de caracterizar dicha variabilidad y así trabajar en la mejora de la predicción del tiempo de viaje, en la búsqueda de la provisión de un servicio de calidad. En este sentido, la presente investigación consiste en una metodología que considera tiempos de viaje probabilísticos y propone dos estadísticos alternativos al asumido exógenamente en la actualidad para el diseño del programa de operación de una unidad de negocio del sistema Transantiago.

Con el fin de asegurar la calidad en el servicio, Transantiago definió un sistema de incentivos basados en indicadores de calidad cuya definición se encuentra en los contratos de concesión vigente (<http://www.dtpm.cl/index.php/2013-04-29-20-33-57/contratos>). Por un lado, el indicador de frecuencia (ICF), evalúa el porcentaje de expediciones que salen con respecto a las que el plan exige, mientras que el indicador de regularidad (ICR), penaliza los intervalos entre expediciones que se observen superiores a determinado umbral con el objetivo de evitar la variabilidad en los tiempos de espera. Ambos indicadores se miden en términos porcentuales del desempeño con respecto al plan exigido por Transantiago.

El objetivo del estudio es identificar las posibilidades de mejora de la operación con el doble beneficio: de la empresa provisorora del servicio como consecuencia del ahorro en los recursos necesarios para la operación resultante con cada estadístico de tiempo de viaje, y también del usuario, medido a partir de los indicadores de desempeño del servicio en relación a la frecuencia (ICF) y regularidad (ICR).

El artículo consta de 5 secciones. A continuación, se revisan las contribuciones internacionales que constituyen el punto de partida para el desarrollo de esta investigación. Posteriormente, la sección 3 describe la metodología, es decir, el proceso al que deben someterse los datos para obtener los dos estadísticos alternativos de tiempo de viaje que arrojarán sendas programaciones, cuyos indicadores de desempeño serán comparados con el actual. En la sección 4 se expone la aplicación de la metodología, los datos utilizados y las hipótesis establecidas. Además, se presentan los resultados y se comparan los recursos necesarios y los indicadores de calidad asociados a los diversos estadísticos del tiempo de viaje. Finalmente, en la sección 5 se exponen las conclusiones de la metodología y de su aplicación.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La literatura científica internacional es extensa en relación al estudio del tiempo de viaje tanto desde el punto de vista de la oferta como de la demanda. De manera específica, en el caso de la oferta, resulta de gran importancia conocer los factores que afectan al tiempo de viaje con el fin de dimensionar los recursos que optimicen los costos de operación junto al nivel de servicio ofrecido y, por tanto, la calidad de servicio que recibe el usuario. Por un lado, la operación de un sistema de bus depende directamente del tipo de vía sobre la que opere, de las condiciones del tráfico, así como del número y gestión de intersecciones en la ruta. En este sentido, Sepúlveda y Coeymans (1999) encontraron que la composición del flujo mixto -en concreto el porcentaje de buses- influye en el comportamiento del tráfico, y, por ende, en los tiempos de viaje. Por otro lado, investigaciones han identificado que el tiempo de viaje depende de causas tales como el periodo del día, el número de paradas, la demanda a lo largo de la ruta, la disponibilidad de vías exclusivas, la distancia de viaje, la posibilidad de aparcamiento en el lateral de la vía, la accidentalidad, el tipo de bus, las condiciones climáticas y el uso de suelo (Mazloumi *et al.*, 2010; Jenelius 2012; Yetiskul & Senbil 2012; Abkowitz & Engelstein 1983; El-Geneidy *et al.*, 2009).

Tirachini (2013) contribuye con la puntualización de que no es el número de paradas asignadas a la ruta sino el número de ellas que finalmente presentan demanda lo que realmente afecta al tiempo de viaje. En su investigación, el autor estima modelos de predicción de tiempo de viaje a nivel zonal y a nivel de ruta que luego aplica para evaluar el efecto en el tiempo de viaje y en los costos operacionales, de seis alternativas de forma de pago en un sistema de bus, confirmando lo beneficioso de una política de actualización de dicho sistema.

Alternativamente, algunas investigaciones se centran en los factores operacionales que influyen en la distribución de llegada de las expediciones, ya que cualquier llegada fuera de horario incurre en un costo para el usuario y el operador. Una de las primeras contribuciones al respecto fue la de Strathman y Hopper (1993), que estiman la probabilidad de llegada a la hora, atrasado o adelantado mediante un modelo logit multinomial, obteniendo que el número de pasajeros que bajan, la distancia recorrida y la conducción por trabajadores a tiempo parcial influyen negativamente en la llegada en hora, obteniendo el peor desempeño en la hora punta de la tarde.

Además del propio tiempo de viaje, su variabilidad también ha sido el interés de la literatura, dado que de tal medida se deriva la confiabilidad del servicio. Como primer estudio basado en datos empíricos, Abkowitz y Engelstein (1983) proponen modelos de regresión para estimar dos medidas: el promedio en cada arco y la desviación del tiempo de viaje en puntos establecidos a lo largo de la ruta, con el fin de determinar la propagación de la dispersión. El tiempo de viaje promedio se explica por la distancia, la demanda y del número de intersecciones semaforizadas, mientras que la desviación del tiempo de viaje depende de la longitud de la ruta y su valor aguas abajo está fuertemente influenciado por el observado aguas arriba. Mazloumi *et al.* (2010) también estiman la variabilidad en el tiempo de viaje, en este caso a través de la desviación estándar y del rango entre los percentiles 10 y 90, encontrando mejor explicación en el primer caso. Entre los factores de mayor impacto se encuentran la distancia recorrida, el número de intersecciones y el número de paradas, así como el periodo del día. Además, los autores también obtienen que las salidas tempranas se relacionan con mayores tiempos de viaje que aquellas en retraso, concluyendo la importancia de la adherencia al horario para evitar la variabilidad en el tiempo de viaje. Recientemente, el estudio de Kieu *et al.* (2015) proponen el coeficiente de variación para medir la variabilidad del tiempo de viaje, la cual diferencian entre su medición a partir de todas las observaciones de servicios en un mismo periodo en múltiples días y aquellas correspondientes a viajes “similares” (misma ruta y servicio).

Como Small (2012) señala, en sus desplazamientos, los usuarios consideran la distribución de probabilidad del tiempo de viaje. La literatura contiene formas tanto simétricas como asimétricas, de tipo gamma o lognormal, del tiempo de viaje de servicios de transporte público. Mazloumi *et al.* (2010) obtuvieron que el tipo de ajuste depende del intervalo de tiempo de salida de las expediciones y del periodo punta: los intervalos de salida mayores se relacionan con distribuciones asimétricas del tiempo de viaje fuera de hora punta mientras que en hora punta el ajuste es normal. Lagos (2013) y Kieu *et al.* (2015) prueban variadas distribuciones y obtienen que la lognormal arroja el mejor ajuste de los datos.

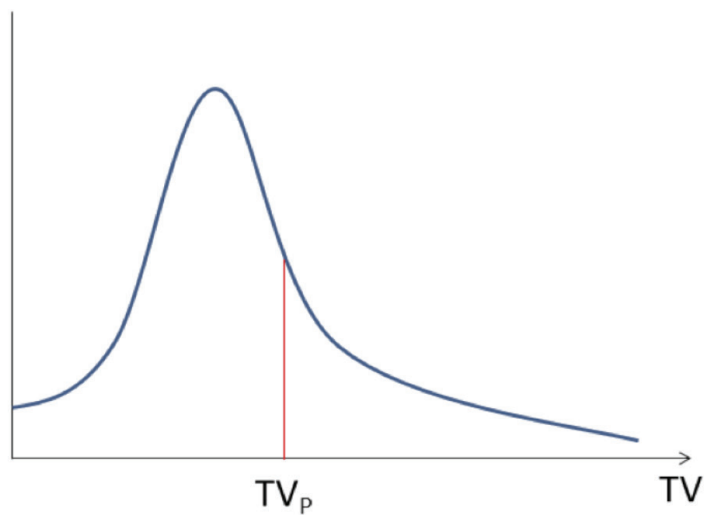
Dada la evidente relevancia de la variabilidad del tiempo de viaje demostrada en la literatura, la presente propuesta metodológica adopta dos aspectos fundamentales concluyentes del estado del arte: por un lado, considera la curva probabilística del tiempo de viaje y, por otro lado, propone dos estadísticos de tiempo de viaje alternativos al actual y característicos de las condiciones operacionales de cada servicio y franja horaria. De esta manera, es posible comparar el efecto en la calidad del servicio y los recursos necesarios para su operación y, por tanto, permite identificar la capacidad de mejora en este sentido, asegurando un servicio de mayor calidad al usuario.

3. METODOLOGÍA

El objetivo de la presente metodología es identificar la capacidad de mejora del desempeño operacional de los servicios de transporte público mediante la propuesta de nuevos indicadores de tiempo de viaje, los cuales son necesarios para el diseño de la operación. Para ello se propone la consideración de la variabilidad de los tiempos de viaje de las expediciones por medio de la curva de probabilidad de tal insumo. Sin embargo, a pesar de describirse la probabilidad del tiempo de viaje por medio de una función continua, el efecto de su variabilidad en términos de operación y desempeño no es continuo debido a la naturaleza discreta de los recursos: buses y conductores. Por esta razón, existen dos resultados operacionales de toda expedición en un sistema de buses urbanos que se presentan en la Figura 1.

La Figura 1 representa una típica curva de probabilidad asimétrica de tiempo de viaje correspondiente a un servicio sentido, intervalo horario y tipo de día, en la que el valor de TV_p representa el tiempo de viaje, cuyo percentil es P , que alimenta el programa de optimización de recursos que arroja el diseño de la operación. Esto supone que el valor TV_p es la duración de una expedición que llega en hora y que, tiempos de viaje superiores corresponden a expediciones en retraso, mientras que menores tiempos de viaje corresponden a llegadas tempranas al cabezal de destino. Considerando que una expedición impacta directamente sobre el siguiente servicio operado por un mismo recurso (vehículo o conductor), al igual que la operación del servicio precedente influye en la expedición en cuestión, entonces una expedición en retraso implica la salida inmediata del bus en el sentido contrario, mientras que una llegada temprana permite la regulación del servicio. No obstante, es preciso indicar que el tiempo de regulación es generalmente limitado y dependiente de las condiciones de la vía urbana en el cabezal de destino. La situación menos favorable con respecto a la Figura 1 corresponde a las llegadas en retraso, dado que representan tiempos de viaje mayores que los programados, incurriendo en mayores intervalos y tiempos de espera para el usuario. Además, a esto se suma la posibilidad de que el tiempo de retraso sea tal que el número de expediciones eventualmente operadas sea menor a las planificadas, lo que puede derivar en problemas de capacidad, principalmente en horarios punta.

Figura 1: Esquema de una función probabilística común del tiempo de viaje y el estadístico (percentil) asumido para el diseño de la operación



Lo anteriormente mencionado conforma la motivación y base sobre la que se ha diseñado la metodología diseñada, que se presenta en la Figura 2.

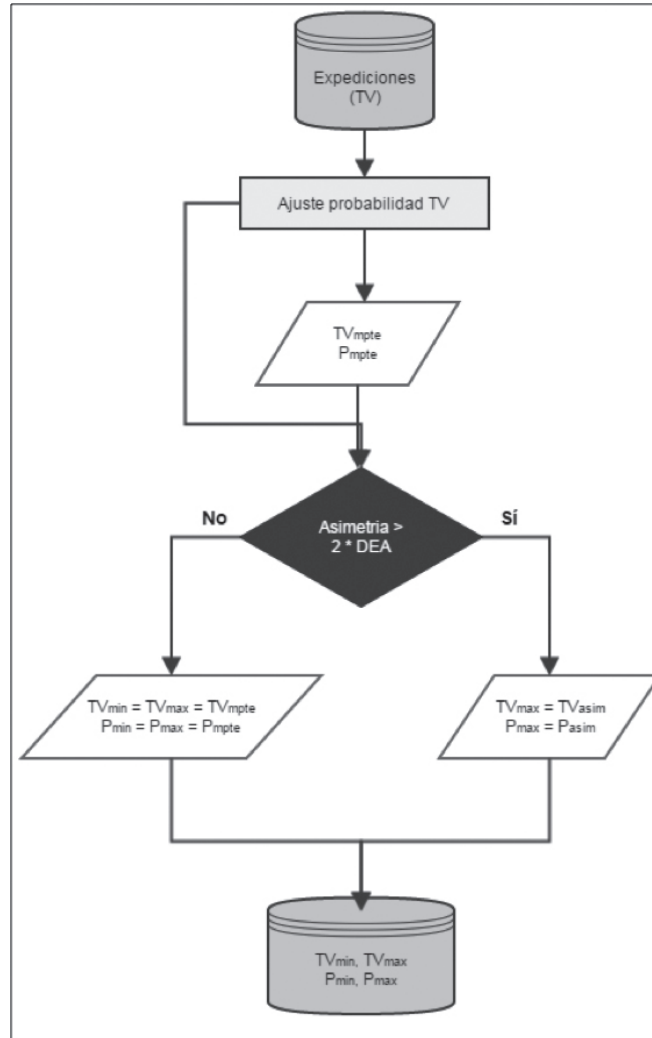
En primer lugar, se propone determinar el mejor ajuste del tiempo de viaje en base a los datos observados de las expediciones asociadas a un mismo servicio sentido, intervalo de tiempo y tipo de día. Como se ha mencionado en la sección 0, en la literatura internacional, el tiempo de viaje ha demostrado un buen ajuste lognormal y, en ocasiones, normal o gamma. No obstante, se ha de notar que la función probabilística lognormal es conceptualmente más acertada considerando que la variable que se desea describir únicamente toma valores positivos y dado que una característica esperable en el tiempo de viaje de servicios que comparten vía motorizada con el tráfico común es una cola o asimetría positiva que también es considerada en la función de densidad lognormal.

Se ha de indicar que, además del propio filtro sistemático que se aplica a los datos de la operación aportados por Transantiago a los operadores (expediciones con tiempo de viaje nulo o discrepancias entre la distancia recorrida por la expedición y la teórica del servicio), por un lado, la propia curva lognormal asume cualquier valor de tiempo de viaje positivo, pero limita la probabilidad de ocurrencia de datos fuera del rango comúnmente observado (ver curva Figura 1) y, por otro lado, el uso del valor percentil inhibe el efecto de expediciones con tiempos de viaje anómalos o outliers (lo que no ocurre con otros estadísticos como la media).

Una vez justificado el mejor ajuste probabilístico y obtenidos los parámetros correspondientes, el proceso posterior tiene el objetivo de determinar el percentil por servicio sentido, intervalo de tiempo y tipo de día que alimentará el programa de optimización de recursos que dará lugar a la programación de la operación futura.

En consecuencia, se propone un nuevo indicador de tiempo de viaje que alimente el proceso de optimización de recursos como alternativa al valor fijo y exógeno que se utiliza en la actualidad. El objetivo es identificar las capacidades de mejora del desempeño, a partir de los indicadores ICF e ICR, lo que implica un mejor servicio al cliente. El nuevo indicador propuesto es el punto de máxima pendiente negativa o de inflexión descendente de la curva de probabilidad de tiempos de viaje, aquel que es mayor que la moda (P_{mpte} asociado al TV_{mpte} , ver Figura 2). El fundamento de la propuesta es teórico: el punto de máxima pendiente es precisamente aquel en que el número de casos desciende con mayor intensidad y, por ser, a su vez, el punto de inflexión, también es aquel en el que la tendencia de la curva cambia (en este caso, de cóncava a convexa). Esto significa que un tiempo de viaje mayor forma parte de la cola de la curva de probabilidad, lo que se asegura una alta probabilidad de que la expedición llegue temprana y con capacidad de regulación y que, por el contrario, sea poco probable que el bus llegue en retraso por ser un caso posterior al punto de inflexión. Además, se propone establecer ese corte de manera particular para cada servicio-sentido a partir de la propia curva de probabilidad de tiempos de viaje obtenida de la operación, lo que significa que considera la problemática operativa del recorrido y, por tanto, añade realismo al proceso.

Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología de propuesta de estadísticos de tiempo de viaje



No obstante, a pesar de pertenecer a la cola de la curva de tiempos de viaje, al propósito de reducir el impacto de las expediciones en retraso (Figura 1) motivado por ser ésta la situación operacional con mayor impacto sobre el usuario, se propone alternativamente considerar el efecto de exceso de cola mediante la corrección del percentil anterior, obtenido por el criterio del punto de inflexión. El efecto cola es más pronunciado a medida que mayor es la asimetría. Cramer (1997) establece que la asimetría es pronunciada en aquellos casos en que su valor sea mayor al doble de la desviación estándar de la asimetría. De la misma manera, el proceso (Figura 2) evalúa si existe exceso de asimetría para cada servicio sentido, intervalo horario y tipo de día mediante la siguiente expresión:

$$Asimetría > 2 \cdot DEA \quad (1)$$

donde DEA responde a la desviación estándar de la asimetría en una muestra de distribución normal y tamaño n , según la ecuación:

$$DEA = \sqrt{VARA} \quad (2)$$

$$VARA = \frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)} \quad (3)$$

En caso de confirmarse un exceso de asimetría mediante la expresión 1, se propone desplazar el nuevo percentil (P_{asim} asociado al TV_{asim} , ver Figura 2) un valor (o tiempo de viaje) igual al promedio de las diferencias entre cada punto de la cola y el punto de máxima pendiente.

Como resultado, la metodología arroja un percentil mínimo de tiempo de viaje, correspondiente al punto de máxima pendiente negativa o punto de inflexión de la curva descendente (P_{mpte}) y, en caso de presentar una asimetría positiva acusada, también propone un estadístico máximo, igual al anterior más el desplazamiento por asimetría pronunciada o efecto cola (P_{asim}).

Para evaluar la bondad del tiempo de viaje estimado y posteriormente al proceso de optimización de recursos que se aplica para el diseño de la operación del servicio, se hace uso de una herramienta de simulación programada para estos efectos la cual permite realizar un proceso de simulación de la operación considerando tiempos de viaje probabilísticos y tiempos máximos de espera en los cabezales de los servicios.

El resultado de la simulación comprende los recursos necesarios y los niveles de cumplimiento de los indicadores operacionales definidos. Estos indicadores serán comparados con los obtenidos utilizando la definición actual.

La propuesta constituye un avance metodológico desde una perspectiva teórica. No obstante, de los resultados de la simulación podría esperarse que el servicio no mejore en la práctica debido a que tan solo constituye el indicador que alimenta el proceso de optimización de recursos, y éstos son discretos: buses y conductores. En consecuencia, no es posible predecir el impacto del cambio del indicador de tiempo de viaje sino que es necesario simular cada situación y comparar el desempeño esperado.

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

4.1 Contexto de aplicación

La metodología arriba descrita se ha aplicado a los datos del mes de abril de 2015 correspondientes a los tres servicios (N1, N2, N3) para ambos sentidos. Su elección se justifica por diversas razones. En primer lugar, operan desde un mismo depósito, lo cual implica que comparten problemas operacionales asociados a éste. Otro punto importante es que corresponden a servicios troncales de Transantiago y escogidos de similar longitud, dado que, como se ha revisado en la literatura, la distancia de la ruta influye en la variabilidad del tiempo de viaje, por lo que el control de dicho insumo resulta clave para la comparación. Los servicios escogidos en esta ocasión operan por la Avenida Libertador Bernardo O'Higgins, vía principal de la ciudad de Santiago, que la atraviesa de poniente a oriente y que presenta condiciones variables de tráfico a lo largo de la semana.

Se asumen determinadas consideraciones, como son la diferenciación por tipo de día e intervalo horario, por estar impuestas por contrato entre la empresa operadora y Transantiago (<http://www.dtpm.cl/index.php/2013-04-29-20-33-57/contratos>); dichas definiciones toman parte en el cálculo de los indicadores de desempeño del servicio provisto por aquélla. Los tipos de día son los siguientes:

- Día laboral, de lunes a viernes
- Sábado
- Domingo

Análisis realizados muestran que el día viernes posee un comportamiento distinto al resto de los días laborales, especialmente en el periodo punta tarde, por lo que actualmente se considera como un tipo de día distinto (DLN, Viernes) respecto del resto de la semana laboral (DLN, L-J) para efectos de programar la operación.

La política de incentivos al operador evalúa la operación en concepto de frecuencia (ICF) y regularidad (ICR) mensuales que en un primer término son evaluados por periodo horario. Para ello, Transantiago define en los contratos distintas franjas horarias o periodos: 12 en DLN, 9 en sábado y 8 en domingo. No obstante, se sabe que, en la práctica, las condiciones no son siempre homogéneas dentro de una misma franja horaria definida por Transantiago, debido a la variabilidad de la demanda y tráfico viario. Por esta razón y dado que el proceso de optimización que arroja el diseño de operación así lo permite, se propone la discretización en medias horas de manera de dotar al proceso del máximo realismo.

4.2 Resultados: comparación del efecto de los percentiles en la calidad provista y los recursos necesarios

A continuación se presentan los resultados (indicadores de calidad y recursos necesarios) que derivan de los diversos estadísticos de tiempo de viaje: el percentil mínimo y el máximo arrojados por la metodología propuesta (asociados a la máxima pendiente descendente de la curva de probabilidad de tiempo de viaje y su corrección por asimetría), el actual percentil 70 y el percentil 65. Los resultados de éste último se exponen con el fin de completar el análisis para identificar las capacidades de mejora del servicio bajo un enfoque amplio.

Como primer resultado, y en la línea de otras investigaciones ya revisadas en la sección 0, los tiempos de viaje resultaron distribuir lognormal en todos los periodos horarios. En segundo lugar, se obtuvo que el percentil mínimo resultante de la metodología y asociado al punto de máxima pendiente descendente o de inflexión de la curva de probabilidad del tiempo de viaje, tiene un valor promedio de 73, con mínimo y máximo rondando el 67 y 79 respectivamente. Alternativamente, el percentil máximo, que es el anterior corregido por el efecto de la asimetría positiva o cola derecha (P_{asim} , ver Figura 2), arroja valores promedio de 90, con mínimo 87 y máximo 98. Dado que el promedio de ambas alternativas se sitúa por encima del valor del estadístico actualmente utilizado (percentil 70), se presentan los resultados para el percentil 65 con el fin de comparar el impacto de un estadístico menor al actual.

Como primer resultado, y desde el punto de vista del operador del servicio, la Tabla 1 presenta la variación relativa de los principales recursos para el global de los 6 servicios-sentido que tendría lugar con cada nuevo percentil comparado con el actual P70, asumiendo que todo el sistema se nutre del primero en cada caso.

Tabla 1: Variación relativa (%) de los recursos derivados de cada percentil propuesto alternativo sobre el actual P70

	L - J			Viernes		Sábado			Domingo		
	P65	Pmaxpte	Pasim	Pmaxpte	Pasim	P65	Pmaxpte	Pasim	P65	Pmaxpte	Pasim
Total buses	-8,76	-5,84	10,22	1,50	9,02	5,50	13,76	30,28	-1,45	5,80	0,00
Tiempo total	2,30	7,37	26,09	9,09	19,83	6,35	16,14	40,92	-2,57	10,65	28,45
Total servicios	13,22	12,20	19,32	12,42	12,75	2,19	4,74	13,14	-3,74	7,49	9,63

Como era de esperar, por lo general, los recursos necesarios son mayores según aumenta el estadístico asumido para el diseño de la operación del servicio. Esto es debido a que un mayor percentil asume mayores tiempos de viaje, lo que implica un mayor tiempo total de operación en el mes y, consecuentemente, la exigencia de un aumento del resto de insumos. Sin embargo, esto no siempre se confirma debido a que una programación optimizada puede resultar en una combinación más óptima de algún recurso cuando se varía el tiempo de viaje tanto positiva como negativamente dado que también se consideran los viajes no comerciales.

Como segundo resultado, y desde la perspectiva del usuario, las tablas 2 y 3 informan del impacto de los diversos estadísticos en la calidad del servicio a través de la evaluación de los indicadores ICF e ICR esperados con el diseño operacional resultante del proceso de optimización.

En primer lugar, cabe confirmar el buen desempeño del estadístico actual (P70), en general, en todos los servicios y tipos de día. Sin embargo, siendo éste asumido de manera exógena, cabe evaluar el potencial de mejora de los dos propuestos por la metodología, el mínimo asociado a la máxima pendiente descendente de la curva de probabilidad de tiempo de viaje y el máximo, computado como el anterior corregido por efecto de exceso de asimetría de dicha curva. Como se desprende de las tablas, la variación en el desempeño es variable en cada servicio-sentido y tipo de día. Se obtienen valores similares para el estadístico de máxima pendiente y el percentil 65, mientras que el percentil máximo asociado al criterio de asimetría presenta valores considerablemente más bajos, es decir, menor calidad de servicio.

Tabla 2: Indicadores de calidad promedios por tipo de día (lunes a jueves o viernes) de cada servicio-sentido asociados a cada estadístico

		Lunes - Jueves				Viernes		
		P65	P70	Pmaxpte	Pasim	P70	Pmaxpte	Pasim
Promedio ICF diario	N1_I	95,59%	97,80%	94,71%	88,55%	98,24%	94,27%	90,75%
	N1_R	92,34%	94,59%	92,79%	92,34%	95,50%	90,99%	90,54%
	N2_I	82,28%	96,20%	94,30%	93,67%	96,84%	93,04%	94,30%
	N2_R	80,25%	96,91%	93,83%	96,30%	96,30%	91,36%	93,83%
	N3_I	91,72%	96,55%	92,41%	92,41%	95,86%	93,79%	91,03%
	N3_R	90,37%	97,78%	91,11%	90,37%	96,30%	90,37%	90,37%
Promedio ICR diario	N1_I	90,49%	93,33%	92,92%	91,78%	93,81%	92,00%	90,81%
	N1_R	88,99%	91,06%	91,06%	90,14%	91,01%	90,09%	90,51%
	N2_I	78,63%	87,79%	85,50%	88,93%	87,02%	82,82%	89,02%
	N2_R	78,68%	86,76%	82,22%	86,30%	86,03%	79,26%	84,93%
	N3_I	84,04%	88,03%	86,01%	88,19%	89,16%	86,90%	88,46%
	N3_R	83,21%	88,43%	86,09%	87,04%	88,35%	85,82%	86,03%

Tabla 3: Indicadores de calidad promedios por tipo de día (sábado o domingo) de cada servicio-sentido asociados a cada estadístico

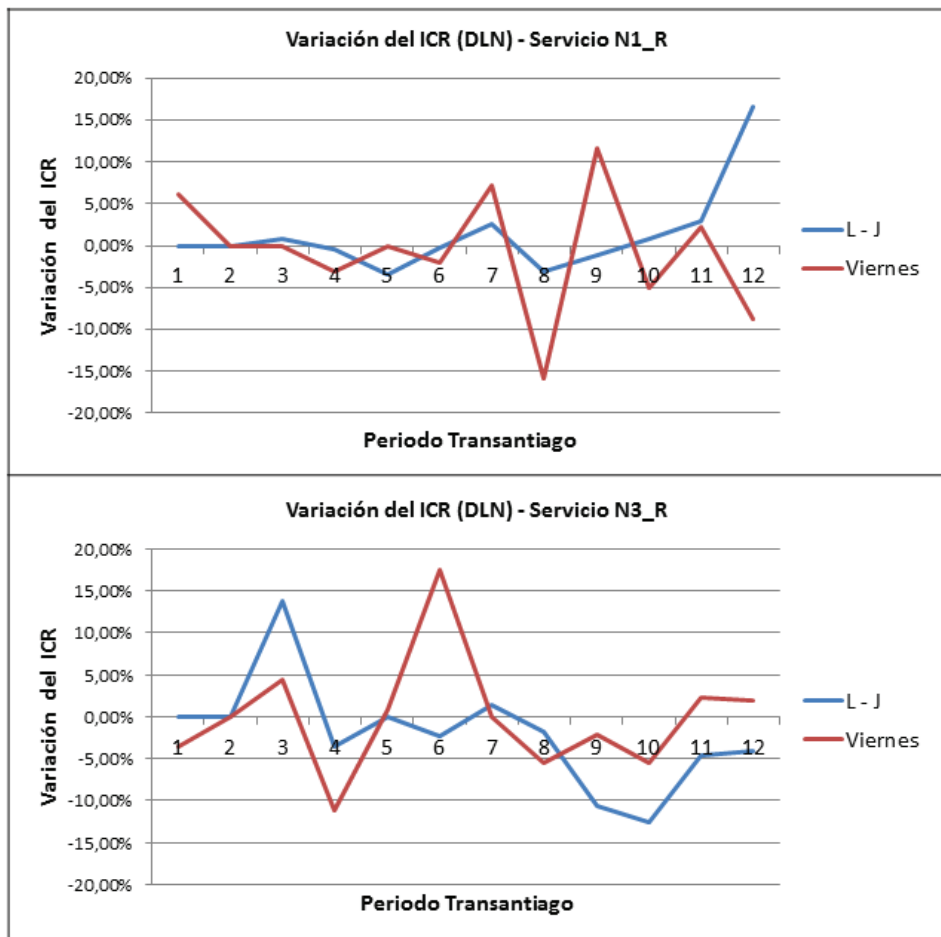
		Sábado				Domingo			
		P65	P70	Pmaxpte	Pasim	P65	P70	Pmaxpte	Pasim
Promedio ICF diario	N1_I	98,21%	100,00%	98,66%	91,96%				
	N1_R	100,00%	100,00%	98,98%	89,80%				
	N2_I	97,92%	97,92%	93,75%	87,50%	95,93%	99,10%	95,48%	85,97%
	N2_R	95,51%	99,36%	97,44%	90,38%	96,86%	98,65%	96,41%	84,75%
	N3_I	95,80%	96,64%	91,60%	78,15%	94,44%	96,30%	86,11%	79,63%
	N3_R	96,15%	96,92%	93,85%	73,08%	94,55%	94,55%	83,64%	74,55%
Promedio ICR diario	N1_I	89,36%	93,16%	89,87%	89,19%				
	N1_R	89,32%	93,54%	89,42%	89,61%				
	N2_I	83,33%	86,78%	85,17%	84,21%	89,30%	93,78%	88,81%	87,16%
	N2_R	82,81%	87,50%	84,92%	84,65%	87,81%	91,83%	87,56%	83,90%
	N3_I	91,38%	92,17%	90,09%	83,00%	84,62%	91,43%	85,35%	84,21%
	N3_R	90,48%	89,76%	88,40%	80,69%	85,71%	90,87%	83,67%	85,87%

Cabe comparar de manera específica el impacto de los dos estadísticos propuestos por la metodología: aquel resultante del criterio de máxima pendiente negativa de la curva de probabilidad de tiempo de viaje y el derivado de la corrección del anterior por efecto de la asimetría de la mencionada curva. Un estadístico mayor asume que un gran número de expediciones llegan temprano o a tiempo y por tanto disponen de capacidad de regulación para asegurar un buen desempeño con respecto a intervalos. Sin embargo, como ya se ha mencionado y como puede observarse en esta aplicación, el efecto en la calidad del servicio no es continuo y por eso es necesario simular el efecto con datos reales. En este caso, por lo general, el percentil mínimo (P_{mpte}) resulta más satisfactorio en el desempeño asociado a la frecuencia y a la regularidad del servicio, tal y como se observa en las tablas 2 y 3.

Los anteriores resultados informan del desempeño promedio por día. No obstante, con el fin de identificar las condiciones en las que es posible mejorar la calidad del servicio, a continuación se analiza el desempeño esperado en los diversos periodos horarios de cada tipo de día. En particular, este análisis se centra en el día laboral normal: lunes a jueves y viernes, dada la importante demanda y, por tanto, motivado por la búsqueda de un beneficio mayor en términos de número de usuarios que perciben tal mejora. De manera particular se propone estudiar el indicador ICR, dado que, por definición, el ICF es más estable, tal y como puede también concluirse de las tablas 2 y 3.

Considerando lo anterior, la Figura 3 presenta la variación absoluta por periodo horario DLN del indicador ICR resultado del percentil mínimo arrojado por la metodología con el criterio de máxima pendiente, sobre el actual percentil 70, en dos servicios: el N1_R y el N3_R.

Figura 3: Variación absoluta del indicador ICR resultante del percentil de máxima pendiente con respecto al actual P70, en día laboral normal (DLN) y por periodo horario en los servicios: a) N1_R; b) N3_R



Tal y como se desprende de la Figura 3, el efecto del percentil de máxima pendiente propuesto en la metodología tiene capacidad de mejora de la regularidad de hasta un 10 – 15% absoluto en determinados periodos en cada servicio-sentido. En particular, con el nuevo percentil, el servicio N1_R mejora su desempeño por la tarde (Figura 3a), mientras que el N3_R lo hace de mañana (Figura 3b). Además, los dos casos presentan variaciones más acusadas del desempeño en regularidad en día viernes.

La Figura 3 informa de que el desempeño no es constante a lo largo del día y ni siquiera son comparables entre sí los periodos punta. Esto es debido, por una parte, a la diversidad de factores que influyen en el tiempo de viaje y su variabilidad, tal y como se ha revisado en la sección 2, y, por otra, en la discontinuidad del efecto en el desempeño derivado de la gestión de agentes discretos como son los buses y de la hora de llegada de cada expedición al cabezal de destino. En consecuencia, de la Figura 3 se desprende que sí hay capacidad de mejora de la calidad del servicio si se asumen distintos percentiles, por servicio-sentido, tipo de día y periodo.

5. CONCLUSIONES

Motivada por la importancia de la variabilidad del tiempo de viaje en el desempeño y satisfacción del usuario de un servicio de transporte público, la presente investigación describe una metodología que considera tiempos de viaje probabilísticos y que propone dos estadísticos alternativos al asumido exógenamente en la actualidad para el diseño del programa de operación de una unidad de negocio del sistema Transantiago. Este estudio tiene como objetivo identificar las posibilidades de mejora del servicio buscando un beneficio doble: de la empresa provisorora del servicio como consecuencia del ahorro en los recursos necesarios para la operación resultante con cada estadístico de tiempo de viaje, y también del usuario, medido a partir de los indicadores de desempeño del servicio en relación a la frecuencia (ICF) y regularidad (ICR).

Tras la aplicación a un conjunto de servicios-sentido, se concluye que la calidad del servicio se mejora en determinados casos como resultado de la aplicación del percentil mínimo propuesto por la metodología: aquel asociado al punto de máxima pendiente descendente o de inflexión de la curva de tiempos de viaje. En concreto, la aplicación llevada a cabo informa de hasta un 10 – 15% de mejora absoluta de la regularidad de algunos servicios en algunos periodos horarios. En consecuencia, se evidencia el potencial y validez del criterio de máxima pendiente, y, por ende, el presente estudio contribuye en la propuesta de dicho criterio basado en tiempos de viaje probabilísticos, permitiendo ajustar el diseño de la operación a la realidad y, por ende, asegurando la mejora del desempeño en términos de calidad al usuario y costos.

La aplicación expuesta asume, en cada caso, un mismo percentil para todo el sistema por tipo de día. No obstante, dadas las evidencias de un comportamiento distinto del percentil según el periodo horario dentro de un mismo tipo de día, se concluye el interés de evaluar y computar estadísticos distintos en los diversos tramos del día o según agrupaciones de servicios-sentido, tipo de día e intervalo horario cuyo comportamiento es homogéneo. A este respecto, se está desarrollando una investigación paralela que tiene el objetivo de determinar la clasificación óptima que asegura respuestas homogéneas mediante un proceso de clusterización de los datos que se computaría previamente al proceso de obtención de estadístico de tiempo de viaje descrito en este artículo.

REFERENCIAS

- Abkowitz, M.D. y Engelstein, I. (1983) Factors affecting running time on transit routes. **Transportation Research Part A**, 17(2), 107–113.
- Bates, J., Polak, J., Jones, P. y Cook, A. (2001) The valuation of reliability for personal travel. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 37(2-3), 191–229.
- Cortés, C.E., Gibson, J., Gschwender, A., Munizaga, M. y Zúñiga, M. (2011) Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 19(4), 695–707.
- Cramer, D. (1997) **Basic Statistics for Social Research: Step-by-step Calculations and Computer Techniques Using Minitab**. Routledge.
- El-Geneidy, A.M., Hourdos, J. y Horning, J. (2009) Bus transit service planning and operations in a competitive environment. **Journal of Public Transportation**, 12, 39–59.

- Jenelius, E. (2012) The value of travel time variability with trip chains, flexible scheduling and correlated travel times. **Transportation Research Part B: Methodological**, 46(6), 762–780.
- Kieu, L., Bhaskar, A., and Chung, E. (2014) Public transport travel-time variability definitions and monitoring. **Journal of Transportation Engineering**, 141(1), 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000724, 04014068.
- Lagos, F. (2013) Modelamiento de incertidumbre en los tiempos de viaje. Tesis de magister en gestión de operaciones, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad De Chile.
- Mazloumi, E., Currie, G. y Rose, G. (2010) Using GPS data to gain insight into public transport travel time variability. **Journal of Transportation Engineering**, 136(7), 623–631.
- Sepúlveda, C. y Coeymans, J.E. (1999) Determinación de un modelo de elección de pista para el bus directo en presencia de flujo mixto. Actas del IX Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago, 337–350.
- Small, K. (2012) Valuation of travel time. **Economics of Transportation**, 1(1-2), 2–14.
- Strathman, J.G. y Hopper, J.R. (1993) Empirical analysis of bus transit on-time performance. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 27(2), 93–100.
- Tirachini, A. (2013) Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 30, 239–256.
- Yetiskul, E. y Senbil, M. (2012) Public bus transit travel-time variability in Ankara (Turkey). **Transport Policy**, 23, 50–59.

