

Evaluación de la capacidad ferroviaria del corredor Bogotá – Belencito

An Assessment of Railway Capacity of Corridor Bogotá – Belencito

Luis Gabriel Márquez Díaz^{(1)*}, Luis Alfredo Vega Báez^{(2)*}, Juan Carlos Poveda D’Otero^{(3)*}

⁽¹⁾ Magíster en Ingeniería con énfasis en Transporte. Luis.Marquez@uptc.edu.co

⁽²⁾ Doctor en Ingeniería e Infraestructura de los Transportes. Luis.Vega@uptc.edu.co

⁽³⁾ Magíster en Informática. Juan.Poveda@uptc.edu.co

* Docente Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte GIDPOT. Tunja, Colombia.

Recibido 15 de abril de 2010, modificado 20 de noviembre de 2011, aprobado 21 de noviembre de 2011.

Palabras claves

Transporte ferroviario, redes ferroviarias, capacidad de redes ferroviarias.

Resumen

Se aplican modelos analíticos para evaluar cuatro tipos de capacidad ferroviaria en siete tramos del corredor Bogotá – Belencito. Se identifica el cantón crítico de la red ferroviaria, lo mismo que el tramo de mayor capacidad. Se analiza la capacidad disponible para el tren de cercanías de Bogotá y para un tren de pasajeros entre Tunja y Sogamoso, dadas las condiciones actuales de operación. Se hace un análisis de sensibilidad de la capacidad con respecto a la velocidad de operación y la distancia entre estaciones. Por último, se presentan recomendaciones para aumentar la capacidad ferroviaria del corredor.

Key words

Railway transport, railway networks, railway networks capacity.

Abstract

Analytical models are applied to evaluate four types of railway capacity in seven sections of the corridor Bogotá – Belencito. The critical canton of the railway network is identified, and the higher capacity segment. Given the current operating conditions, we analyzed the available capacity of Bogotá’s commuter train and a passenger train between Tunja and Sogamoso. A sensitivity analysis of capacity is done about the operating speed and distance between stations and we then present recommendations to increase railway capacity in the corridor.

INTRODUCCIÓN

Colombia tiene una red ferroviaria de 3.468 km, de los cuales 1.991 km están concesionados, 1.327 km se encuentran a cargo del Instituto Nacional de Vías y 150 km hacen parte de la red privada de El Cerrejón [1]. La red ferroviaria nacional tiene un ancho de trocha yárdica de 914 mm, a excepción del tramo de El Cerrejón que presenta ancho de trocha estándar de 1.435 mm [2].

La concesión del Atlántico, con una extensión de 1.493 km, rehabilitó gran parte de la red ferroviaria desde Santa Marta hasta La Dorada, pero, debido a la pérdida de demanda de transporte, algunos tramos retornaron inicialmente a la nación [1] y en la actualidad se está culminando la entrega de un tramo de 262 km (figura 1) a los departamentos de Cundinamarca y Boyacá por un periodo de 30 años. Esto con el

ánimo de que estas entidades territoriales se encarguen de la operación del ferrocarril con miras a incrementar la cantidad de carga transportada [3] y ofrecer un servicio de transporte de pasajeros compartiendo la infraestructura que es utilizada, prácticamente de manera exclusiva, para el transporte de cemento de Belencito a Bogotá [2] y que hoy por hoy moviliza cerca de 700 t/d [4].

La expectativa generada ante la posibilidad de operar estos nuevos servicios de tren en el corredor Bogotá – Belencito, además de la posible utilización de la línea férrea por parte del Tren de Cercanías de Bogotá en el tramo La Caro – Bogotá, ha comprometido a los futuros operadores del sistema a evaluar las condiciones de operación ferroviaria, no sólo para programar eficientemente los servicios sino para planificar las inversiones. Varios estudios se han adelantado recientemente sobre la red ferroviaria para determinar las condiciones

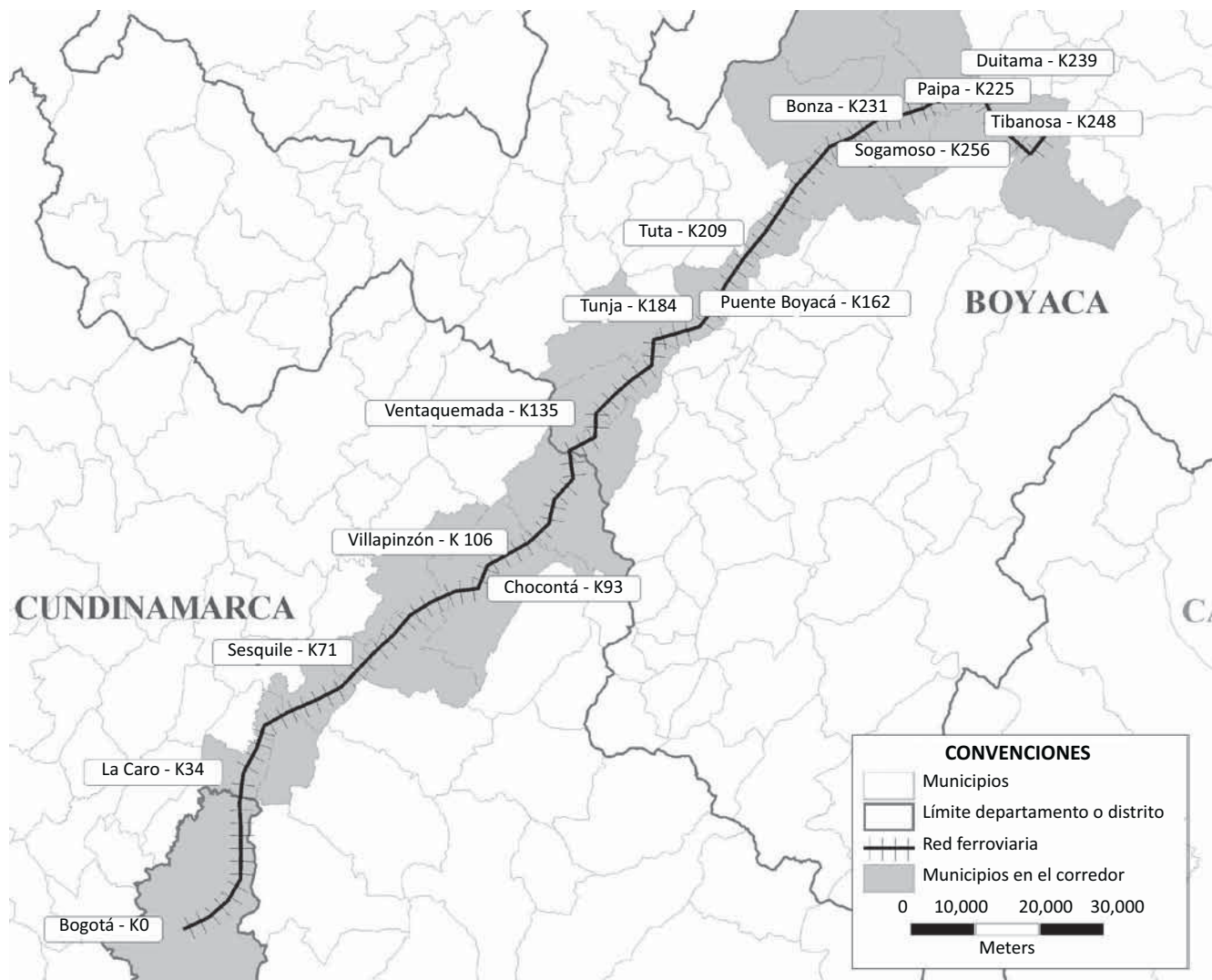


Figura 1. Red ferroviaria en proceso de entrega a Cundinamarca y Boyacá

de operación actual y futura [5-9], pero ninguno de ellos ha abordado el análisis de la capacidad, cuya estimación ha sido durante mucho tiempo un asunto importante en la industria ferroviaria [10]. Por tal razón, se desarrolló una investigación, cuyos resultados se reportan en este artículo, con el propósito de estimar el número máximo de trenes que podría programarse en el corredor Bogotá – Belencito, durante un intervalo de tiempo específico, dadas las condiciones de operación, la infraestructura existente y demás factores que inciden en la capacidad ferroviaria [11, 12].

MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD FERROVIARIA

La capacidad ferroviaria es un concepto complejo, vagamente definido y con múltiples significados [13]. Aunque la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) declaró que la capacidad ferroviaria, como tal, no existe sino que depende de

la forma en que se utilice la infraestructura ferroviaria [14]. Es ampliamente aceptado que la capacidad ferroviaria se define como el número máximo de trenes que pueden transitar en las dos direcciones de una línea durante un período de tiempo determinado [11].

Diferentes tipos de capacidad son manejados en el ámbito ferroviario [10]. La capacidad teórica, definida como el número de trenes que pueden recorrer un tramo durante un intervalo de tiempo específico, en un ambiente generado matemáticamente en el que los trenes transitan permanentemente con un intervalo mínimo ideal; esta es la capacidad límite superior. La capacidad práctica, referida al volumen de tráfico que se puede mover en una línea con un nivel razonable de confiabilidad, que depende de la mezcla de diversas clases de trenes, prioridades y agrupamiento de tráfico; esta capacidad representa una medida más realista puesto que corresponde a condiciones normales de funcionamiento y por lo general está alrededor de 60-75% de la capacidad teórica. La capacidad

usada, entendida como el volumen de tráfico que se presenta en la red, por lo general es inferior a la capacidad práctica. Y finalmente, la capacidad disponible, es decir el volumen de tráfico adicional que podría ser dispuesto en la línea, calculada como la diferencia entre la capacidad utilizada y la capacidad práctica.

Muchos enfoques y herramientas han sido desarrollados para hacer frente al problema de estimar la capacidad ferroviaria [15-20]. Entre las técnicas más relevantes se encuentran los métodos analíticos, los métodos de simulación y los métodos de optimización [10]. La presente investigación sólo consideró métodos analíticos ya que el corredor estudiado, al estar conformado por una línea única, puede evaluarse debidamente sin necesidad de aplicar técnicas más complejas para la estimación de la capacidad.

Los métodos analíticos, diseñados para modelar el entorno ferroviario por medio de fórmulas matemáticas o expresiones algebraicas, permiten obtener directamente capacidades teóricas y estimar las capacidades prácticas, ya sea mediante la inclusión de márgenes de regularidad o calculadas simplemente como un porcentaje de la capacidad teórica.

El tradicional método analítico [20] obtiene la capacidad teórica para un período de 24 horas, equivalente a 1.440 min, con base en el tiempo de recorrido subiendo s , el tiempo de recorrido bajando b y el tiempo de protección o separación de trenes E . A partir de esa expresión se puede calcular también la capacidad práctica multiplicando el resultado por un coeficiente práctico que normalmente se encuentra en el rango de 0.6 a 0.75.

$$C = \frac{2.880}{s + b + E}$$

Otro método analítico para el cálculo de la capacidad ferroviaria es el propuesto por la *American Association of Railroads* (AAR), que incluye un factor de corrección que depende de las condiciones de operación, donde a es una constante que toma el valor 2 para tramos de línea única, T representa el periodo de análisis expresado en minutos, f es un factor de corrección que toma el valor de 0,9 en líneas ferroviarias con bloqueo automático y 0,8 en otras condiciones de operación, y Mb es el módulo máximo neto que representa la suma de los tiempos sin parada de un tren en un tramo determinado, más el tiempo necesario para realizar las operaciones de entrada y salida de las estaciones.

$$C = \frac{a \cdot T \cdot f}{Mb}$$

A diferencia del método anterior, el periodo de análisis (T) no es fijo sino que se puede variar, además contempla la posibilidad de estudiar sistemas de línea única o doble mediante la variación del parámetro a , e incorpora un factor de corrección (f) para tomar en cuenta la clase de mecanismo de bloqueo de la línea. En el denominador, Mb puede entenderse

como un parámetro equivalente al término $s + b + E$ de la ecuación anterior.

El método de la empresa estatal Ingeniería y Economía del Transporte (INECO) [21], dependiente del Ministerio de Fomento español, sugiere que la capacidad sea calculada con base en el tiempo de no disponibilidad de la vía T_c , el tiempo de marcha total del tren estándar T_m , el factor de mayoración F que incorpora la heterogeneidad del tiempo de marcha T_m y un tiempo suplementario T_s .

$$C = \frac{2.880 - T_c}{F \cdot T_m + T_s}$$

El tiempo de no disponibilidad se descuenta del tiempo de análisis (2.880 minutos en un día para línea doble) y puede estar relacionado con actividades de mantenimiento o simplemente con periodos de inactividad en el marco de la lógica operacional del sistema. El factor de mayoración F es un valor mayor o igual que 1, que intenta representar la variación en el tiempo de marcha T_m a causa de los retrasos en el desplazamiento del tren y el tiempo suplementario T_s se puede entender como el equivalente al tiempo de protección o separación de trenes descrito en la primera ecuación.

Aunque existen otros métodos analíticos para el cálculo de la capacidad [10, 21], la mayoría de ellos presenta una estructura similar a los anteriormente presentados, así que no fueron considerados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se levantó el inventario de la red ferroviaria y se encontró un total de 29 estaciones (Tabla 1), en una longitud total de 262 km, distribuidos así: 10,8% en Bogotá, 36,6% en Cundinamarca y 52,6% en Boyacá. Se observó que no todas las estaciones tienen habilitadas las líneas auxiliares y en consecuencia el cruzamiento de trenes está limitado. Aunque el cruzamiento de trenes se hace actualmente sólo en las estaciones de Villapinzón y Tunja, también están habilitadas las estaciones en La Caro, Suesca, Chocontá, Ventaquemada, Tierranegra y Paipa. En promedio, la longitud de las líneas segundas en las estaciones habilitadas es de 443 m.

Con base en las condiciones geométricas de la red ferroviaria se hizo la estimación de velocidades bajo criterios de seguridad y se encontró que la mayor velocidad sería de aproximadamente 35 km/h en el tramo La Caro – Bogotá, mientras que la menor velocidad se tendría en el tramo Tierranegra – Tunja con 20 km/h. En los demás tramos se consiguieron velocidades cercanas a 25 km/h.

La red ferroviaria es usada primordialmente para transportar cemento de Belencito a Bogotá, movilizándolo un tren conformado por dos locomotoras acopladas y 12 plataformas hasta Villapinzón y un tren de locomotora sencilla con el mismo número de plataformas hasta Bogotá; la locomotora que se desacopla en Villapinzón regresa a Belencito, al igual que los trenes vacíos.

Tabla 1. Estaciones en la red ferroviaria

BOGOTÁ Y CUNDINAMARCA					BOYACÁ				
No.	Estación	Abscisa	Cota (m)	Distancia (km)	No.	Estación	Abscisa	Cota (m)	Distancia (km)
1	Bogotá	K0	2620	0	14	Ventaquemada	K136	2840	15
2	Terminal de carga	K5	2588	5	15	Tierranegra	K150	2983	14
3	Usaquén	K15	2585	10	16	Samacá	K158	2895	8
4	Ramal Samper	K18	2584	3	17	J. Páez (Alto de Moraí)	K172	2977	14
5	San Antonio	K23	2584	5	18	Tunja	K184	2770	12
6	La Caro	K34	2582	11	19	Oicatá	K199	2687	15
7	Briceño	K47	2590	13	20	Tuta	K209	2626	10
8	Tocancipa	K53	2591	6	21	Sotaquirá	K213	2605	4
9	Gachancipa	K58	2590	5	22	Termopaipa	K222	2593	9
10	Suesca	K74	2551	16	23	Paipa	K225	2585	3
11	Chocontá	K93	2761	19	24	Bonza	K231	2592	6
12	Villapinzón	K106	2800	13	25	Duitama	K239	2602	8
13	Albarracín	K121	2835	15	26	Tibasosa	K248	2563	9
					27	Sogamoso	K256	2570	8
					28	Chicamocha	K261	2559	5
					29	Belencito	K262	2560	1

Se encontró que la operación ferroviaria en el sistema se hace mediante la división de tramos, cada uno de los cuales se llama cantón; en general, un cantón es un tramo de vía férrea en el que normalmente no puede haber más de un tren, para así evitar una colisión entre dos de ellos. De acuerdo con el estado de la infraestructura y de los aparatos de vía en las estaciones, se pudo establecer que en la actualidad sería factible explotar el sistema con los siguientes cantones: Bogotá – La Caro, La Caro – Suesca, Suesca – Villapinzón, Villapinzón – Tierranegra, Tierranegra – Tunja, Tunja – Paipa y Paipa – Belencito.

Se estableció que únicamente en épocas de alta demanda de cemento se despachan dos trenes diarios de lunes a sábado, pero cuando las bodegas en Bogotá mantienen un buen nivel de inventario se despacha sólo un tren de lunes a viernes y

dos trenes el día sábado. La figura 2, que contiene el diagrama de marcha para la programación regular de trenes en el sistema, deja ver cómo las condiciones actuales de explotación del sistema no implican ninguna dificultad en la programación de los trenes despachados. El diagrama de marcha representa el programa de todos los trenes que se movilizan o pueden movilizarse en el sistema durante un periodo de tiempo determinado. En él están incluidos todos los trenes comerciales, pero no se incluyen los trenes de trabajos, servicio interno, carromotores y otros vehículos autopropulsados.

El diagrama exhibe sobre el eje vertical la distancia que se recorre entre estaciones, mientras que el eje horizontal representa la escala temporal de 24 horas diarias. Se puede observar cómo la programación de servicios, despachando un tren cargado en Belencito a las 21:00 y un tren vacío en

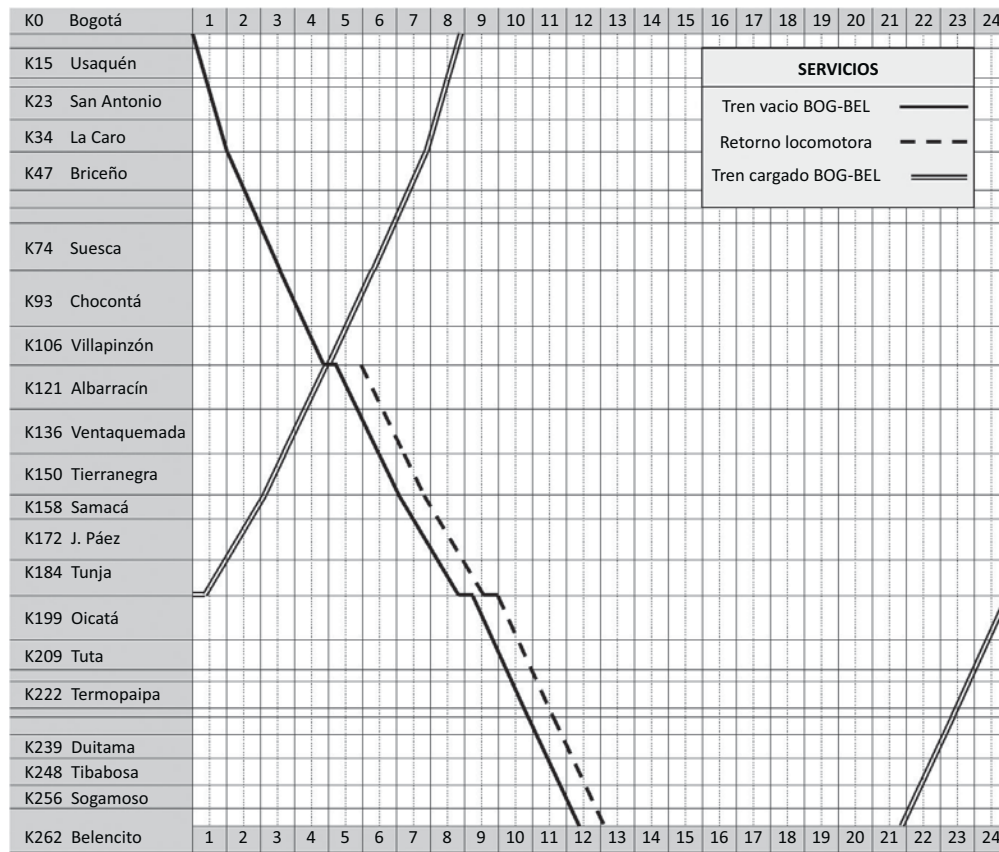


Figura 2. Diagrama de movilización real de trenes

Bogotá a las 24:00, produce un cruzamiento en la estación de Villapinzón a las 04:00, donde el tren que sube cargado tiene la prioridad. En el mismo diagrama, la línea punteada representa el retorno de la locomotora adicional que se usa para garantizar el arrastre entre Belencito y Villapinzón cuando el tren sube cargado.

Como el tramo Bogotá – La Caro hace parte del recorrido turístico del Tren de la Sabana, se tiene adicionalmente un servicio de tren diario de Bogotá a Zipaquirá y viceversa en fines de semana y días festivos.

Se hizo el análisis de bloqueo tomando en cuenta las condiciones de seguridad en la movilización de trenes y se encontró que en el corredor se bloquea el cantón al expedirse el orden de vía a un tren, es decir que se impide la movilización de cualquier otro vehículo férreo en los dos sentidos de circulación hasta que el tren despachado no haya llegado al cambiavías de entrada de la siguiente estación. Con base en las condiciones medias de operación descritas y aplicando los métodos considerados se hizo la evaluación de la capacidad ferroviaria del corredor, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Capacidad de la red ferroviaria por tramos

TRAMO	TIEMPO (min)	CAPACIDAD (Trenes/d)					
		Teórica ^a	Práctica ^b	AAR ^c	INECO ^d	Usada ^e	Disponible
Bogotá - La Caro	59	22	16	17	17	8	8
La Caro - Suesca	96	14	10	11	11	6	4
Suesca - Villapinzón	77	17	13	13	14	6	7
Villapinzón - Tierranegra	106	12	9	10	10	6	3
Tierranegra - Tunja	102	13	10	10	10	6	4
Tunja - Paipa	99	13	10	10	11	6	4
Paipa - Belencito	89	15	11	12	12	6	5

a) Igual tiempo de recorrido en ambos sentidos y tiempo adicional de 12 min, b) coeficiente práctico de 0,75, c) se adiciona un tiempo de entrada y salida de estaciones de 12 min, d) tiempo de no disponibilidad de 2 horas diarias y factor de mayoración igual a 1,2, e) para máxima demanda

Al contrastar los resultados con otros estudios se encontró que los valores obtenidos son válidos, ya que observaciones hechas en varios sistemas de redes ferroviarias con pendientes hasta de 2,5% y curvas hasta de 400m admiten tráficos que llegan a 40 trenes diarios en promedio [20]. El cantón crítico, que limita la capacidad teórica ferroviaria del corredor a 12 trenes/d, tal como se aprecia en la figura 3, se localiza en el tramo Villapinzón – Tierranegra y ofrece una capacidad práctica de 9 trenes/d. El tramo de mayor capacidad corresponde a Bogotá – La Caro con 16 trenes/d, equivalente a 1 tren cada 90 minutos.

Se hizo el análisis de la capacidad disponible y se encontró que para el tren de pasajeros Tunja – Sogamoso, proyectado por la Gobernación de Boyacá, queda una capacidad de 4 trenes/d, lo que permitiría programar sólo dos horarios de despacho desde cada uno de los puntos extremos de la ruta. Este es un factor determinante en la viabilidad técnica de dicho proyecto que se debe contrastar con las estimaciones de demanda de pasajeros en el corredor, una vez se adelante el estudio definitivo correspondiente.

De igual forma, la capacidad disponible para el Tren de Cercanías de Bogotá permitiría movilizar tan sólo 8 trenes/d en las condiciones imperantes en la actualidad. Al revisar las proyecciones de demanda e infraestructura hechas para el proyecto del Tren de Cercanías de Bogotá [9], se encuentra

que, debido al número de servicios de trenes requeridos (2 trenes/h por sentido en la hora pico), se propone ofrecer doble línea en el tramo comprendido entre Bogotá y la estación de San Antonio. Esta propuesta es razonable a la luz de los cálculos realizados pues al mantener la línea única existente, la capacidad disponible sería insuficiente.

Por último, se hizo un análisis de sensibilidad de la capacidad con respecto a la velocidad y la distancia entre estaciones, tal como se aprecia en la figura 4. Se encontró que, manteniendo todo lo demás constante, la capacidad ferroviaria es muy sensible a la distancia entre estaciones y varía un poco menos con respecto a la velocidad.

Las aplicaciones del análisis de sensibilidad son muy valiosas ya que permiten estimar la capacidad en diversos escenarios. A manera de ejemplo, al aumentar la velocidad del cantón crítico a 40 km/h la capacidad práctica llega a 15 trenes/d. Así mismo, al habilitar el cruzamiento de trenes en todas las estaciones existentes en el tramo Bogotá – La Caro, se obtiene una distancia máxima entre estaciones de 11 km y en consecuencia la capacidad práctica aumenta a 43 trenes/día. Aun así no sería factible despachar 2 trenes/h por sentido en la hora pico y en consecuencia sería necesario proponer doble línea en este tramo para garantizar la operación del Tren de Cercanías de Bogotá.

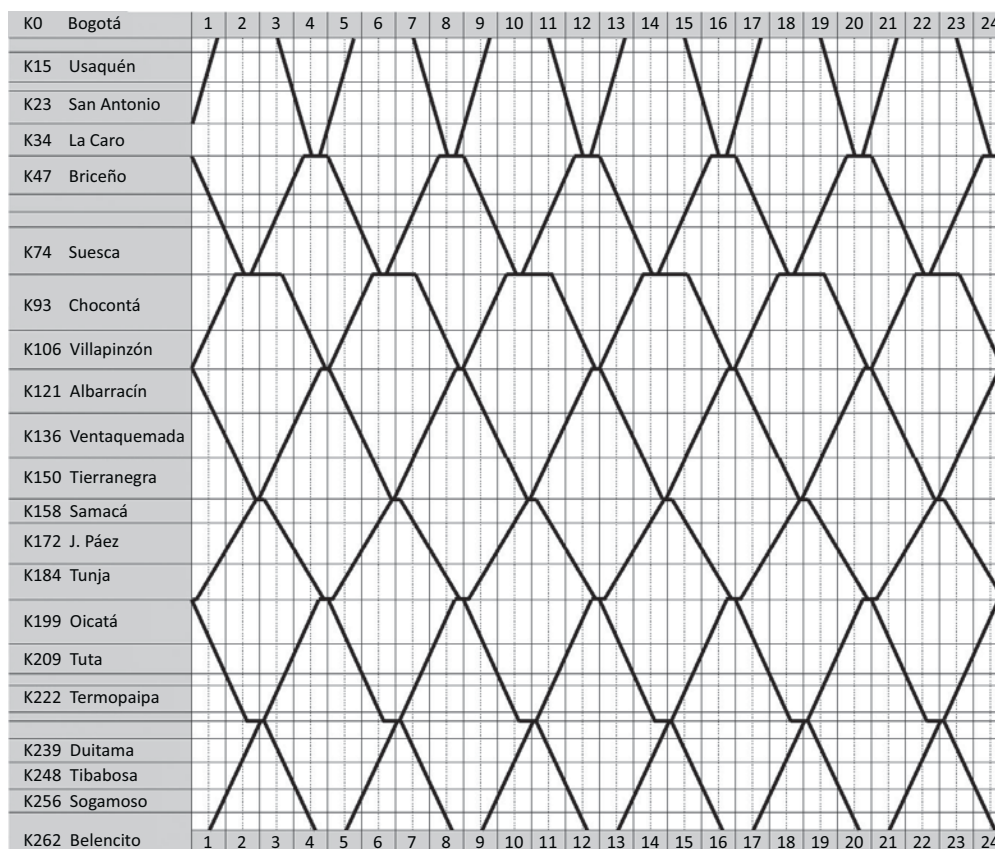


Figura 3. Diagrama de movilización para la capacidad teórica del corredor limitada por el cantón crítico

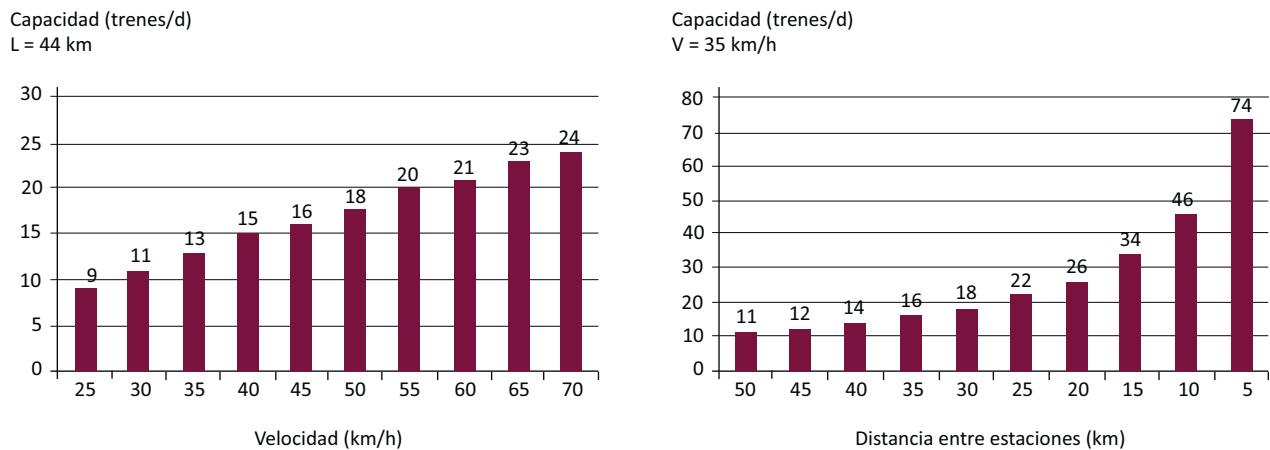


Figura 4. Sensibilidad de la capacidad ferroviaria práctica

Se debe anotar que, para lograr aumentos en velocidad se requieren grandes inversiones en infraestructura como la rehabilitación de líneas o cambios geométricos, mientras que para disminuir la distancia entre estaciones las inversiones son comparativamente menores, ya que están relacionadas con la puesta en funcionamiento de los apartaderos.

CONCLUSIONES

Se evaluó la capacidad ferroviaria teórica, práctica, usada y disponible en el corredor Bogotá – Belencito. El procedimiento aplicado surgió de un inventario de la red ferroviaria, a partir del cual se hizo la estimación de las velocidades de operación bajo criterios de seguridad, se identificaron los servicios de trenes prestados regularmente y se elaboró un análisis de las condiciones de movilización de trenes para determinar los parámetros a utilizar en los modelos analíticos con los que se calculó la capacidad ferroviaria de 7 tramos característicos del corredor.

Se encontró que la capacidad máxima teórica del corredor es de 12 trenes/d, correspondiente a la capacidad del cantón crítico localizado entre Villapinzón y Tierranegra, en límites de los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. El tramo de mayor capacidad teórica es Bogotá – La Caro, con 22 trenes/d. Se pudo establecer además que la capacidad disponible para un tren de pasajeros entre Tunja y Sogamoso es de 4 trenes/d, mientras que la capacidad disponible para el Tren de Cercanías de Bogotá es de 8 trenes/d.

Se concluye que es posible aumentar la capacidad ferroviaria del corredor actuando especialmente en la rehabilitación de las estaciones para permitir el cruzamiento de trenes, ya que, como quedó demostrado, la capacidad ferroviaria es más sensible a la distancia entre estaciones que a los cambios de velocidad. Además que las inversiones para reducir la distancia entre estaciones son menores en comparación con la alternativa de incrementar la velocidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio de Transporte. *Diagnóstico del Transporte 2008*. Grupo de Planificación Sectorial, Oficina Asesora de Planeación. Diciembre de 2008.
- [2] L. G. Márquez. *Modelo de Oferta de Transporte para Colombia, Selección de Información*. Tunja: Unión Temporal Modelación del Transporte, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2008.
- [3] Gobernación de Boyacá. “Presentan estudio de factibilidad del tren Bogotá – Belencito”. Boletín Informativo. No. 044, 5 de marzo de 2010, pp. 2-3.
- [4] H. Díaz. *Proyecto Tren de Boyacá*. Tunja: Gobernación de Boyacá, Departamento Administrativo de Planeación, 2010, pp. 2-12.
- [5] L. G. Márquez, H. Jaimes. “Modelo de demanda para un tren de pasajeros entre Tunja y Bogotá”. *Revista de Ingeniería*. rev.ing. ISSN 0121-4993 No. 30 noviembre 2009, pp. 16-24.
- [6] L. D. Antonio, L. M. Rondón. *Diagnóstico del corredor férreo Ventaquemada – Belencito y planteamiento de mejoras para un tren de cercanías*. Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2009.
- [7] J. A. Carabuena, A. Jaime. *Estimación de la demanda manifiesta para la implementación de un tren de pasajeros en el tramo Tunja – Sogamoso*. Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2005.
- [8] C. A. Mora, H. M. Sánchez. *Caracterización de la oferta para la implementación de un tren de pasajeros en el tramo Sogamoso – Tunja*. Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2005.

- [9] Steer Davies Gleave. “Estudio de Demanda para el Tren de Cercanías de la Sabana de Bogotá – Cundinamarca”. Informe de Fase I. Departamento Nacional de Planeación, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Bogotá, 24 de octubre de 2000.
- [10] M. Abril, F. Barber, L. Ingolotti, M.A. Salido, P. Tormos, A. Lova. “An assessment of railway capacity”. *Transportation Research Part E*. No. 44, 2008, pp. 774-806.
- [11] G. Longo, R. Stok. “Estimation of railway capacity using stochastic differential equations”. En: *2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Eds. I.A. Hansen, A. Radtke, J.P. Pacht & E. Wendler, International Association of Railway Operations Research, Hannover, Germany, 2007.
- [12] R. Rivier. “Nouvelles méthodes d’analyse de la capacité et de la qualité de service de réseaux ferroviaires”. EPFL, Lausanne, 1997.
- [13] H. Krueger. “Parametric modeling in rail capacity planning”. En: *31st Conference on Winter simulation*, Eds. P.A. Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sturrock & G.W. Evans, ACM Press New York, NY, USA, Phoenix, Arizona, United States, 1999, pp. 1194.
- [14] Unión Internacional de Ferrocarriles. *Capacity (UIC code 406)*. International Union of Railways (UIC) 16, rue Jean Rey 75015 Paris - France, June 2004. ISBN 2-7461-0802-X (English version), p. 2.
- [15] A. Landex. *Methods to estimate railway capacity and passenger delays*. PhD thesis. Technical University of Denmark, Department of Transport. November 2008, pp. 12-36.
- [16] M. Forsgren. *Computation of Capacity on Railway Networks*. Master of Science Project Report (Technical Report T2003-12). Swedish Institute of Computer Science. Kista (Stockholm), 2003.
- [17] L. Lucchini, A. Curchod, R. Rivier. “Transalpine Rail Network: A Capacity Assessment Model (CAPRES)”. En: STRC 1st Swiss Transport Research Conference. Monte Verità / Ascona, March 1-3, 2001. Disponible: <http://www.strc.ch/lucchini.pdf>. [Consulta: 01-03-2010].
- [18] E. Petersen. “Over-the-road transit time for a single track railway”. *Transportation Science* No. 8, 1974, pp. 65-74.
- [19] R. J. Egmond. *Railway Capacity Assessment, an Algebraic Approach*. TRAIL Studies in Transportation Science, S99/2, Delf University Press, 1999. ISBN 90-407-1935-7.
- [20] F. Togno. *Ferrocarriles*. México: Representaciones y Servicios de Ingeniería, 2ª Ed. 1982, ISBN 9686062661, pp. 506.
- [21] D. Álvarez, P. Rodríguez. *Ingeniería e infraestructura de los transportes*. ISBN 8483173654. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, 2003, pp. 571-574.