

Criterios para planificar transporte masivo en ciudades intermedias de Colombia: ¿Cómo complementar y mejorar la política actual?

Criteria for mass public transport in intermediate cities of Colombia. How to complement and improve the current policy?

PhD(C) Paul Basnak¹, PhD. Ricardo Giesen-Encina², PhD. Juan Carlos Muñoz-Abogabir³

^{1,2,3} Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Orcid: {<https://orcid.org/0000-0002-5554-7682>, <https://orcid.org/0000-0001-5785-374X>, <https://orcid.org/0000-0003-1775-985X>}, Email: {pabasnak@uc.cl, giesen@ing.puc.cl, jcm@ing.puc.cl}

Como citar: P. Basnak, R. Giesen y J. C. Muñoz, "Criterios para planificar transporte masivo en ciudades intermedias de Colombia: ¿Cómo complementar y mejorar la política actual?", *Revista Ingenio*, vol. 18, n°1, pp. 1-9, 2021, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2663>

Fecha de recibido: 14 de julio de 2020
Fecha aprobación: 15 de octubre de 2020

RESUMEN

Palabras claves:

BRT, ciudades intermedias, CONPES 3167, política de transporte, transporte público.

En este artículo se proponen, sobre la base de un análisis cualitativo y cuantitativo dos enfoques para recomendar la planificación de transporte masivo. A diferencia del documento 3167 del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) que recomendó impulsar la planificación y construcción de sistemas de transporte masivo en ciudades de Colombia exclusivamente en base a la población, los dos enfoques propuestos incorporan variables adicionales que son determinantes de un mayor uso de transporte público. El primero es una combinación lineal de características sociodemográficas de las ciudades, que considera otras variables relevantes como Producto Interno Bruto (PIB), forma urbana y motorización, denominado "puntaje urbano". El segundo se basa en la demanda existente en los sistemas de transporte público, ponderada por la densidad de viajes y la distancia recorrida, llamado "densidad potencial de demanda". Si bien la evidencia estadística es escasa, ambos indicadores predicen de mejor manera la demanda en corredores existentes.

ABSTRACT

Key words:

BRT, CONPES 3167, intermediate cities, public transport, transport policy

In this article, based on a qualitative and quantitative analysis, two approaches to recommend mass transit planning are proposed. Unlike document 3167 of the National Council for Economic and Social Policy (CONPES) that recommended promoting the planning and construction of mass transportation systems in Colombian cities exclusively on the basis of population, the two proposed approaches incorporate additional variables that are determinants of increased use of public transport. The first is a linear combination of sociodemographic characteristics of cities, which considers other relevant variables such as Gross Domestic Product, urban form and motorization, called "urban score". The second is based on the existing demand in public transport systems, weighted by the density of trips and the distance traveled, called "potential density of demand". Although statistical evidence is scarce, both indicators better predict demand in existing corridors.

1. Introducción

En las últimas décadas, se realizaron grandes inversiones en transporte público en diversas ciudades de Colombia, que mejoraron la infraestructura y el parque automotor, pero no aumentaron la demanda. [1] La necesidad de trasbordos y los mayores tiempos de espera compensan los ahorros en tiempo de viaje. Este problema es más pronunciado en ciudades intermedias, en donde la cantidad de viajes podría ser demasiado baja para justificar sistemas tipo Bus Rapid Transit (BRT). En este sentido, cabe preguntarse si los criterios de planificación para implementar transporte masivo son adecuados o pueden mejorarse.

Existen dos enfoques básicos para recomendar modos de transporte masivo en la literatura. El más sencillo consiste en establecer umbrales para implementar tecnologías como BRT, Tren Ligero o Metro en base a variables como la población de las ciudades y el PIB per cápita.

La experiencia internacional muestra que algunas ciudades de menos de 400.000 habitantes cuentan con líneas de BRT, como Eugene (Estados Unidos), Uberaba (Brasil) y Caen (Francia) [2], tren ligero, como Vitória (España), Haifa (Israel) o Bonn (Alemania), o incluso Metro, como Brescia (Italia) y Lausanne (Suiza). [3]

Autor para correspondencia

Correo electrónico: pabasnak@uc.cl (Paul Basnak)



La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Considerando como “ciudades intermedias” a aquellas con población entre 50.000 y un millón de habitantes [4], la mayoría de las ciudades intermedias con metro o tren ligero pertenece a países desarrollados, en donde existe mayor presupuesto para financiar infraestructura de transporte y los usuarios tienen mayor ingreso, lo que se asocia con una mayor disposición a pagar por ahorro en tiempos de viaje. [5]

Los corredores BRT tienen costos de construcción marcadamente inferiores al del Metro [6] y su capacidad máxima es comparable con la de líneas de Metro. [7] Esta combinación los hace particularmente atractivos para países en vías de desarrollo: en la actualidad, casi el 90% de los pasajeros transportados en BRT pertenecen a ciudades de América Latina o Asia. [2]

En este contexto, se han propuesto distintos umbrales de población como límites mínimos para la planificación de modos de transporte masivo. La Tabla 1 presenta algunos límites propuestos para la planificación de BRT. Puede observarse que la política de transporte urbano del documento CONPES 3167 (2002) [8] propone una población consistente con otras fuentes.

Tabla 1. Población mínima propuesta para planificación de BRT en ciudades

Fuente	Población mínima	Contexto
Levinson et al. (1975) [9]	250.000 – 1.000.000	Bus expreso en autopista EE.UU.
CONPES 3167 (2002) [8]	600.000	Política de transporte urbano Colombia
Transportation Research Board (2003) [10]	750.000	Pauta para ciudades de Norteamérica

Un segundo enfoque, más elaborado que el anterior, consiste en establecer límites mínimos de demanda comparando costos de implementar distintas opciones de transporte público. Diversos autores han desarrollado modelos matemáticos para estimar cuál es la cantidad mínima de viajes que justifica la implementación de una tecnología dada (como BRT o Metro) en redes simplificadas o en corredores, modificando variables como la frecuencia, la densidad de paraderos y el tamaño de los vehículos. En la Tabla 2 se resumen algunos valores relevantes.

Tabla 2. Demanda mínima requerida para justificar BRT en corredores

Fuente - ubicación	Unidad	Valor min
CONPES 3167 (2002) - política de transporte urbano Colombia [8]	Pasajeros/hora punta/dirección	7.000
LAMTA (2012) - Los Ángeles (EE.UU.) [11]	Pasajeros/hora punta/dirección	1.000
Moccia y Laporte (2016) – modelo de optimización en corredores [12]	Pasajeros /hora punta (direcc. 70%/30%)	4.000
AECOM (2012) - Canberra (Australia) [13]	Buses/hora	75

El valor establecido en la política CONPES 3167 (2002), cuyo cálculo no se detalla en el documento, es marcadamente superior al de otras fuentes, que incluyen modelos de optimización en corredores como el de Moccia & Laporte [12]. Esto puede deberse al menor ingreso promedio de los habitantes de Colombia en relación con el de países desarrollados, lo que resulta en una menor valoración equivalente de los ahorros en tiempos de viaje, y por ende en una mayor cantidad de viajes necesarios para compensar los costos de inversión.

Para establecer una relación entre los dos enfoques descritos, pueden analizarse cuáles son los determinantes de una mayor demanda de transporte público en una ciudad. Además de una mayor población, se han establecido correlaciones de la cantidad de viajes o del potencial para implementar transporte masivo con una mayor densidad de población [14], mayor PIB per cápita [15], menor tasa de motorización [16], una forma urbana más lineal [17], y la presencia de integración tarifaria y modal [18].

En este sentido, cabe preguntarse si pueden incorporarse estas variables relevantes u otras en un criterio general para recomendar la implementación de BRT. A continuación, se presentarán dos enfoques alternativos para recomendar transporte público masivo en las ciudades intermedias de Colombia. Primero, aplicaremos los modelos de clasificación presentados en Basnak et al. (2020) [19] que consideran la existencia de ciertos modos de transporte público según características básicas de las ciudades y sus habitantes. Luego, propondremos un indicador alternativo basado en la demanda existente en distintos sistemas de transporte público.

2. Primer indicador: “Puntaje urbano”

El modelo Probit Ordinal propuesto en Basnak et al. (2020), utilizado para clasificar los modos de transporte público que actualmente tienen las ciudades según sus características

socioeconómicas y que ha sido calibrado para 400 ciudades de América, puede aplicarse a las ciudades intermedias de Colombia.

La variable dependiente de dicho modelo cuenta con cinco categorías, basadas en la clasificación modal de Vuchic (2005) [20]. La categoría V corresponde a ciudades con modos de transporte público con separación total respecto de otros vehículos y sin cruces a nivel, como el metro de Medellín. La categoría IV corresponde a ciudades que cuentan con modos de transporte público parcialmente segregados del tránsito pero con cruces a nivel (e.g. Cali). Ciudades con modos de transporte público con derecho de vía tipo “C”, con tránsito compartido con otros vehículos como buses comunes, pero sin modos tipo “A” ni “B” (e.g. Pasto), pertenecen a la categoría III. Por último, ciudades que sólo tienen servicios de taxi pertenecen a la categoría II, y ciudades sin transporte público son de categoría I.

Los modelos Probit Ordinal son utilizados comúnmente cuando la variable dependiente es categórica [21] y las variables explicativas se correlacionan en forma positiva o negativa con la variable dependiente. Considerando “j” categorías para la variable dependiente, un modelo Probit ordinal compara una combinación lineal de atributos con “j-1” valores límite. Tanto los valores de los parámetros como los valores límite son estimados por máxima verosimilitud, y los errores de la estimación distribuyen normal. [22]

En la Ecuación 1 se muestra la expresión del modelo Probit estimado en [19], que llamaremos “Puntaje urbano”.

$$\begin{aligned}
 \text{Puntaje urbano} = & 2.30 * \log_{10}(\text{población}) + \\
 & 0.799 * \ln(\text{PIB per capita}) + 5.13. 10^{-4} * \\
 & \text{attract} - 2.91 * \text{compact} + 9.13. 10^{-2} * \\
 & \log_{10}(\text{población}) * \ln(\text{densidad}) - 1.66. 10^{-3} * \\
 & \text{motor} + 0.0422 * \text{prom_pend}(\%) + 0.352 * \\
 & \text{integ_tarifa}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Nótese que dicho puntaje considera, además de la población de las ciudades, variables identificadas en la literatura como favorables a la adopción de transporte masivo como la densidad, el PIB per cápita y la integración tarifaria. En el Anexo 1 se detallan las variables del modelo.

La Tabla 3 muestra los valores límite entre categorías estimados por máxima verosimilitud. Ciudades cuyo “puntaje urbano” es mayor a 24.20 tienden a contar con transporte masivo en la actualidad.

Tabla 3. Valores límite entre categorías del modelo Probit ordinal

Límite entre categorías	Valor puntaje urbano
I y II	16.71
II y III	19.31
III y IV (transporte masivo)	24.20
IV y V	26.47

En la Figura 1 se presentan las probabilidades asignadas a las categorías IV y V (transporte masivo) para las ciudades de Colombia de entre 100.000 y un millón de habitantes. En el Anexo 1 se muestran las probabilidades detalladas para cada ciudad¹.

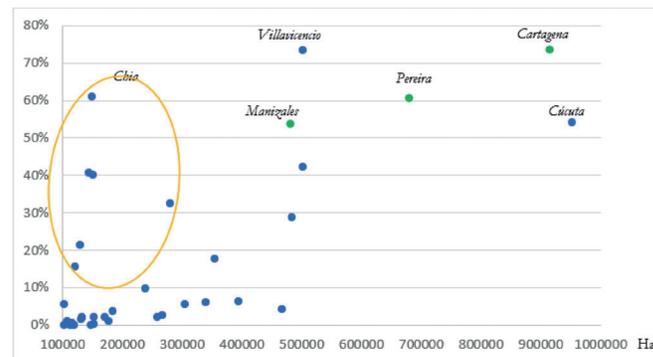


Figura 1. Probabilidades asignadas por el modelo Probit ordinal a Transporte Masivo (clases IV y V) en ciudades intermedias de Colombia

El modelo Probit arroja una probabilidad mayor al 50% para las tres ciudades de la muestra que actualmente cuentan con transporte masivo (Transcaribe en Cartagena, Megabús en Pereira y Metrocable en Manizales), lo que muestra que ciudades con similares características en otros países de América del Sur, Central y del Norte cuentan con BRT, tren ligero o teleférico.

Además de las ciudades con más de 500.000 habitantes, el modelo Probit asigna una alta probabilidad de contar con transporte masivo a un segundo grupo de localidades de menor población, pero que al ubicarse cerca de grandes ciudades pueden ser propicias para la adopción de líneas de transporte masivo que las vinculen a ellas y que a su vez permitan desplazarse dentro de estas localidades “satélite”. Es el caso de Chía, Zipaquirá y Facatativá (cercanas a Bogotá) Palmira y Jamundí (Cali) y Piedecuesta (Bucaramanga). Los proyectos Regiotram de Occidente y Regiotram del Norte, que vincularán a Bogotá con ciudades cercanas, corresponden a esta funcionalidad.

A continuación, veremos cómo se relaciona el “puntaje urbano” con la demanda de los sistemas de transporte público de ciudades intermedias de Colombia. Por último, discutiremos las ventajas y desventajas de adoptar criterios alternativos a la población para planificar la construcción de sistemas de transporte masivo.

¹El modelo de Basnak, Giesen y Muñoz (2020) [19] considera un criterio de área urbana continua para definir cada ciudad. Por este motivo, las poblaciones y superficies urbanas pueden ser distintas a las de las áreas metropolitanas definidas por el DANE, que también incluyen localidades físicamente separadas pero con relación funcional entre ellas.

3. Segundo indicador: “Densidad de demanda”

Actualmente, dos ciudades intermedias de Colombia cuentan con corredores BRT en operación: Cartagena y Pereira. En ambas ciudades, la demanda antes de la pandemia actual era significativamente menor a la planificada: según datos de 2017, Pereira alcanzaba el 64.5% de los viajes previstos y Cartagena apenas un 22%. [1] Si bien esto puede ser motivo de desilusión, no necesariamente implica que la construcción de dichos sistemas no está justificada desde el punto de vista social.

A partir de información recopilada en [2] que se muestra en la Tabla 4, es posible comparar la demanda estimada para ambos sistemas con el límite mínimo definido en el documento CONPES 3167 (2002). Se incluye asimismo a Bucaramanga, cuya área urbana continua (Bucaramanga, Floridablanca y Girón) tiene 1.045.000 habitantes. [23]

Tabla 4. Demanda en corredores BRT existentes

Ciudad (sistema)	Km / corredores	Viajes x día	Viajes/dir hora punta
Pereira (Megabus)	15.5 / 3	121.171 (2017)	6.900 (2009)
Cartagena (Transcaribe)	10.7 / 1	40.000 (2016)	2.300 (est. 2016)
Bucaramanga (Metrolínea)	9.0 / 1	72.000 (2013)	4.525 (2011)

En los tres corredores, la demanda observada es menor al umbral establecido en la política colombiana de transporte urbano, de 7000 pasajeros/hora punta/sentido, para la implementación de un corredor BRT. No obstante, dicho umbral mínimo – estimado en el año 2002 – puede ser actualizado: al aumentar los ingresos crecen los beneficios asociados con la construcción de un BRT [24] que circula más rápido que los buses convencionales.

Aplicando modelos que comparan el costo medio social generalizado (es decir, la suma de costos de inversión, operación y tiempo generalizado de viaje de usuarios) en corredores de buses convencionales y BRT, en los que se optimiza la cantidad de vehículos, la distancia entre paraderos y el tamaño de los buses para distintos niveles de demanda, es posible estimar cómo varía la cantidad mínima de viajes por unidad de tiempo que justifica la presencia de un BRT para distintos valores subjetivos del tiempo. La expresión de los costos mínimos para cada combinación es (Ecuación 2):

$$C = \min(B, d, T) \left\{ L \cdot (C_{cor} + C_{exp}) + \frac{L}{d} \cdot (C_{par}) + B \cdot (C_f + t \cdot C_d) + N \cdot (C_{acc}(d) + C_{esp}(B, d, T) + C_{via}(B, d, T)) \right\} \quad (2)$$

Donde C es el costo total (compuesto por costos de construcción C_{cor} y C_{par} , costos de expropiación C_{exp} , costos de operación fijos C_f y variables $t \cdot C_d$ y costos de las etapas de viaje de los usuarios C_{acc} , C_{esp} , C_{via}), N la cantidad de viajes, B la flota, d la distancia entre paraderos y L el largo de corredor.

Actualizando el límite de 7.000 pasajeros/hora por dirección establecido en el documento CONPES 3167 según la evolución real del salario mínimo (Tabla 5), bastarían entre 6.575 y 6.735 pasajeros/hora por dirección para justificar BRT. ²De ser así, la demanda del Megabús en Pereira con anterioridad a la crisis sanitaria sería suficiente para fundamentar la existencia del BRT, a diferencia de la demanda del Transcaribe en Cartagena y de Metrolínea en Bucaramanga.

Tabla 5. Sensibilidad a la demanda requerida (viajes/hora punta/dirección) al crecimiento del salario mínimo en términos reales

VST viaje (USD/h)	Perfil uniforme	Perfil “todos al centro”
1.054 (2002)	100 (9.900 viajes/hp/dir)	100 (9.560 viajes/hp/dir)
1.605 (2020)	93.9	96.2

Este análisis no considera beneficios adicionales de la implementación de transporte masivo, que pueden incluir la disminución de accidentes de tránsito, contaminación, criminalidad y la valoración de las propiedades cercanas a los corredores que no se expliquen por los ahorros de viaje para sus residentes o quienes allí acuden. [25] Además, la existencia de trasbordos y la reducción de las frecuencias ha resultado en una disminución de la demanda en estos sistemas, en particular en Bucaramanga [1], por lo que la demanda potencial de los sistemas existentes podría aumentar – sin considerar el efecto de la pandemia – si mejorara el nivel de servicio.

En cuanto al resto de las ciudades intermedias, la última Encuesta de Transporte Urbano de pasajeros desarrollada por el DANE (2020) [26] brinda estimaciones para las proyecciones de demanda en distintos sistemas de transporte urbano colectivo para el año en curso, considerando la situación previa a la pandemia del COVID-19.

Como se muestra en la Tabla 6, Santa Marta era la ciudad con más viajes por día proyectados, seguida por Cartagena (que cuenta con sistema BRT en operación) y Cúcuta (cuyo BRT está planificado). Para realizar una mejor comparación del beneficio potencial de los sistemas de transporte masivo en distintas ciudades, pueden incorporarse dos factores adicionales al número de viajes: la densidad de población y la distancia promedio.

² Las estimaciones de valor subjetivo del tiempo de viaje surgen de [29], que informa un valor subjetivo del tiempo de viaje promedio de 1.287 salarios mínimos/h. Se actualizó además el salario mínimo entre 2002 y 2020 considerando la variación real ajustada por inflación.

La importancia de la densidad de población en la demanda de transporte público ha sido señalada en [14-27] entre otros. En tanto, al aumentar la distancia media de los viajes en transporte público, es mayor el ahorro en tiempos de viaje para modos más rápidos, lo que se traduce en un mayor beneficio social. Asumiendo una distribución dada de viajes en el corredor, el beneficio para los usuarios (expresado en tiempo ahorrado por viaje en vehículo) es proporcional al largo del corredor.

Al dividir los viajes diarios en el sistema por la superficie de cada ciudad, se determina la intensidad de demanda medida en viajes/km²día.

Dado que el tiempo ahorrado en vehículo al viajar en un modo más rápido es (suponiendo velocidades constantes) proporcional a la distancia recorrida, y que ésta depende del largo del área urbana para un patrón de viajes definido, al expresar la densidad de demanda en viajes/km/día – lo que equivale a dividir la demanda proyectada por la raíz cuadrada de la superficie urbana – se tiene en cuenta tanto la densidad de población como la distancia media de viajes. Llamaremos a este indicador “densidad potencial de demanda” (Ecuación 3, Tabla 6).

$$\text{Densidad potencial de demanda} \left(\frac{\text{viajes}}{\text{día.km}} \right) = \frac{\text{demanda} \left(\frac{\text{viajes}}{\text{día}} \right)}{\sqrt{\text{superficie}(\text{km})}} \quad (3)$$

Tabla 6. Viajes/día y densidad de demanda

	Demanda (viajes/día) [26]	Densidad potencial de demanda (Viajes/km por día)
Armenia	55.225	11.318
Cartagena	259.116	29.968
Cúcuta	210.436	21.759
Florencia	8.606	2.566
Ibagué	196.651	31.809
Manizales	169.515	35.431
Montería	37.118	7.010
Neiva	64.773	11.477
Pasto	82.035	18.053
Pereira	199.858	30.733
Popayán	73.404	18.237
Quibdó	28.598	8.771
Santa Marta	273.047	37.157
Sincelejo	9.028	2.004
Tunja	45.766	11.434
Valledupar	15.682	2.568
Villavicencio	141.877	24.047

Algunas ciudades que no cuentan con BRT, como Santa Marta e Ibagué, tienen más viajes/km/día en comparación con Pereira y Cartagena que cuentan transporte masivo. Nótese que la mayor cantidad de viajes por día en el BRT de Pereira en relación al de Cartagena se refleja (aunque en mucho menor medida) en su mayor densidad potencial de demanda, aunque esta última considera los viajes de todo el sistema.

La “densidad potencial de demanda” tiene – de manera esperable – correlación positiva tanto con la población de las ciudades como con el puntaje urbano (Figura 2).

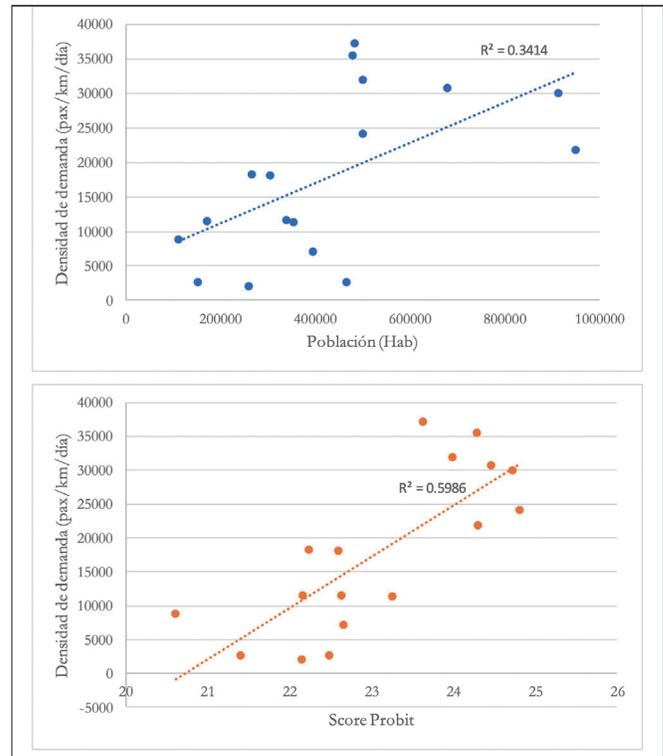


Figura 2. Regresión lineal de la densidad potencial de demanda vs población (sup.), puntaje urbano (inf.)

No obstante, la regresión lineal con el puntaje urbano es significativamente mejor, lo que reafirma la hipótesis de que incorporar variables adicionales a la población permite mejorar los criterios para planificar transporte masivo en ciudades intermedias.

A continuación, discutiremos las ventajas y desventajas de utilizar el puntaje urbano o la densidad de demanda como indicadores para planificar sistemas de transporte masivo en lugar de la población de las ciudades.

4. Discusión: ventajas y desventajas de los indicadores propuestos

La población de las ciudades es sin duda atractiva por su sencillez para establecer en qué ciudades debe evaluarse la

potencial implementación de corredores BRT. No obstante, al ignorar otras características básicas de las ciudades y sus habitantes que explican un mayor uso de transporte público, no permite identificar que también se podría adoptar transporte masivo en localidades de menor población ubicadas cerca de las grandes ciudades, que podrían compartir sus sistemas de transporte masivo.

La Tabla 7 resume las principales ventajas y desventajas de utilizar los indicadores propuestos en comparación con la población.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de los indicadores propuestos para planificar transporte masivo

	Puntaje urbano	Densidad de demanda
(+)	- Buen predictor de la existencia de BRT en ciudades diversas	- Indicador simple - Incorpora dos variables básicas del
	- Mejor correlación con la demanda que la población BRT (densidad de	- Incorpora variables que explican la demanda de transporte público
	- Incorpora variables que explican la demanda de transporte público	- Ignora el nivel de servicio actual del transporte público
(-)	- El modelo mide la existencia de transporte masivo, no su potencial	- Estimaciones de viajes/día solo en algunas ciudades
	- Expresión más compleja que los otros criterios	- Sin evidencia estadística para establecer un umbral mínimo (30.000 viajes/km/día?)
	- Problemas de equidad (más inversión en zonas con mayor ingreso) al considerar PIB regional	

El puntaje urbano, utilizado para identificar qué características socioespaciales de las ciudades explican la existencia de los modos de transporte que operan en ellas, incorpora distintas variables que explican un mayor uso de transporte público, por lo que también puede utilizarse como indicador para planificar la implementación de sistemas de transporte masivo. Aunque su expresión es naturalmente más compleja que un simple umbral de población, la mayoría de sus variables pueden obtenerse con relativa facilidad. Una posible excepción es la motorización, que puede estimarse a partir del Registro Único Nacional de Tránsito, pero que no necesariamente refleja cuántos vehículos son utilizados en cada ciudad.

Para el uso del “puntaje urbano” como criterio de planificación a nivel nacional, se recomienda no tener en cuenta las diferencias regionales en el PIB per cápita. Aunque se verifica en la práctica que el PIB per cápita

regional explica mejor los modos de transporte público en ciudades que el PIB nacional, el uso de esta variable a nivel regional implicaría una mayor tendencia a invertir en transporte público en zonas de mayor ingreso. Esta política puede ser costo-efectiva pero implica impulsar proyectos que podrían acentuar la inequidad. [28]

Por su parte, la densidad de la demanda actual de los sistemas de transporte público tiene como principal ventaja que considera tanto la densidad de población como la distancia de viajes. No obstante, no tiene en cuenta que la cantidad de viajes que se realizan en un sistema dado depende de su nivel de servicio. Si bien es cierto que en algunas ciudades de la muestra (como Valledupar) la participación modal del transporte público podría aumentar con una mejora de las condiciones de viaje, la evidencia muestra que en aquellas ciudades que reformaron sus sistemas de transporte público la demanda no aumentó en comparación con las que no lo hicieron. [1] Este indicador es más sencillo que el puntaje urbano, ya que requiere solo de dos variables (cantidad de viajes en transporte público y superficie urbana) aunque no hay estimaciones oficiales de demanda para todas las ciudades intermedias de Colombia. Por último, la evidencia estadística es insuficiente para definir un umbral mínimo en términos de viajes/km/día. Considerando a Pereira como ciudad de referencia, cuyo sistema BRT tiene una demanda adecuada para justificar su operación considerando los costos sociales totales, un límite inferior de 30.000 viajes/km al día es una primera aproximación razonable.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentaron dos indicadores alternativos al criterio de población mínima establecida en la política nacional de transporte urbano para planificar la implementación de sistemas de transporte masivo en ciudades intermedias de Colombia. El primero consiste en utilizar otras características de las ciudades y sus habitantes además de la población, como la forma urbana, la densidad de población y la motorización, lo que denominamos “puntaje urbano”. El segundo criterio, llamado “densidad de demanda”, consiste en dividir la cantidad de viajes por día en un sistema de transporte público urbano por la raíz cuadrada de la superficie urbana.

La principal ventaja de estos indicadores en relación con la población es que ambos incorporan variables fácilmente obtenibles, que han sido identificadas como relevantes en la literatura como determinantes de un mayor uso de transporte público o de un mayor beneficio para la implementación de corredores de transporte masivo.

No obstante, debe considerarse que ambos indicadores propuestos ofrecen criterios útiles para la planificación

estratégica a nivel preliminar. En este sentido, siempre deben ser complementados por análisis particulares para cada proyecto, que tengan en cuenta las características específicas de cada corredor, como la distribución de las densidades locales de población, los orígenes y destinos particulares de los viajes y los costos de construcción entre otros.

Por último, la crisis sanitaria actual ha impactado significativamente no sólo en la demanda de los sistemas sino también en las preferencias de viaje de los usuarios, y muchos de estos cambios podrían persistir en el futuro. En este sentido, la pandemia brinda una oportunidad para mejorar los indicadores aquí propuestos, al aplicar modelos para estimar el costo social que tengan en cuenta los nuevos estándares de ocupación de los vehículos y la insatisfacción de las personas a compartir viaje con otros pasajeros.

6. Referencias

- [1] Gómez-Lobo, “BRT Reforms in Colombia: an ex-post evaluation.”, Elsevier, vol.132, pp. 349-364, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.11.014>
- [2] BRT+ Centre of Excellence y EMBARQ (2020) Global BRTData. Versión 3.52. Última modificación: 28 de Agosto, 2020. [Online] Available: <http://www.brtdata.org>
- [3] Urbanrail.net (2020). Información recuperada en 8/2020 del sitio web, [Online]. Available: <http://www.urbanrail.net/>.
- [4] Jordan, R. & Simoni, D. “Ciudades intermedias de América Latina y el Caribe: propuestas para la gestión urbana.” Italia, CEPAL (1998).
- [5] Jara-Díaz, S. R. “Allocation and valuation of travel time savings. Handbooks in Transport,” Handbook of Transport Modeling, vol. 1, pp. 303-319, 2000.
- [6] Henry, L., & Dobbs, D. “Sustaining the Metropolis: Comparative examination of new start light rail transit, light railway, and bus rapid transit services opened from 2000”, Transportation Research E, pp. 177:37-55, 2012.
- [7] Hidalgo, D., & Graftieaux, P. “Bus rapid transit systems in Latin America and Asia: results and difficulties in 11 cities.” Transportation Research Record, Vol. 2072, pp. 77-88. 2008. Doi: <https://doi.org/10.3141/2072-09>
- [8] Consejo Nacional de Política Económica y Social, “Política para mejorar el servicio de transporte público urbano de pasajeros.” Documento CONPES 3167, Bogotá, D.C., 2002.
- [9] Levinson, H.S. et al. “Bus Use of Highways: Planning and Design Guidelines, National Highway Cooperative Research Program.” Transportation Research Board, Washington D.C., 1975.
- [10] Transportation Research Board, “Bus Rapid Transit -Implementation Guidelines,” TCRP Report 90, Vol. 2, 2003.
- [11] LAMTA, “Transit Service Policy”, Los Angeles Metropolitan Transportation Authority, 2012.
- [12] Moccia, L., & Laporte, G. Improved models for technology choice in a transit corridor with fixed demand. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 83, pp.245-270, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.11.001>
- [13] AECOM, “Transit Lane Warrants Study”. Consultancy Report for Roads ACT Canberra, Australia, 2012.
- [14] Ewing, R. & Cervero, R., “Travel and the Built Environment.” Journal of the American Planning Association. Vol. 76, no.3, pp. 265-294, 2010.
- [15] Loo, B. P. Y., & Cheng, A. H. T. “Are there useful yardsticks of population size and income level for building metro systems? Some worldwide evidence.” Cities, vol. 27, no. 5, pp. 299–306, 2010.
- [16] Kitamura, R. “A dynamic model system of household car ownership, trip generation, and modal split: model development and simulation experiment.” Transportation vol. 36, no. 7, pp. 11–732, 2009.
- [17] Babalik-Sutcliffe, E. “Urban rail systems: Analysis of the factors behind success”, Transport Reviews, vol. 22, no. 4, pp.415-447, 2002. Doi: <https://doi.org/10.1080/01441640210124875>
- [18] Muñoz, J. C., Batarce, M., & Hidalgo, D. “Transantiago, five years after its launch.” Research in Transportation Economics, vol. 48, pp. 184-193, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.041>
- [19] Basnak, P., Giesen, R., y Muñoz, J.C “Technology choices in public transport planning: a classification framework.”, Research in Transportation Economics, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100901>
- [20] Vuchic, V. R. Urban transit: operations, planning, and economics. Wiley: UK, 2005.
- [21] Greene, W, & Hensher, D. Modeling Ordered Choices. Stern School of Business, New York University, New York, 2009.
- [22] Daykin, A. R., & Moffatt, P. G., Analyzing ordered responses: A review of the ordered probit model. Understanding Statistics: Statistical Issues in Psychology, Education, and the Social Sciences, vol. 1, no.3, pp. 157-166, 2002. Doi: https://doi.org/10.1207/S15328031US0103_02
- [23] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2020) Serie de proyecciones de población con desagregación nacional, departa-

mental, municipal, y cabecera – resto.[Online]. Available: www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion.

- [24] Waters, W. G. “The value of travel time savings and the link with income: implications for public project evaluation.” *International Journal of Transport Economics / Rivista internazionale di economia dei trasporti*, vol. 21, no 1, pp. 243-253, 1994. Doi: 10.2307 / 42747665
- [25] Hidalgo, D., Pereira, L., Estupiñán, N., & Jiménez, P. L. “TransMilenio BRT system in Bogota, high performance and positive impact—Main results of an ex-post evaluation.” *Research in Transportation Economics*, vol. 39, no. 1, pp. 133-138, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.retre.2012.06.005>
- [26] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2020). Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros (ETUP). [Online]. Available: www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/transporte/encuesta-de-transporte-urbano-etup
- [27] UN-Habitat. *Planning and Design for Sustainable Urban Mobility: Global Report on Human Settlements*, Taylor & Francis 2013.
- [28] Yamano, N., & Ohkawara, T. “The regional allocation of public investment: Efficiency or equity?” *Journal of Regional Science*, vol. 40, no. 2, pp. 205-229, 2000. Doi:<https://doi.org/10.1111/0022-4146.00172>
- [29] Díaz, L. G. M. “Disposición a pagar por reducir el tiempo de viaje en Tunja (Colombia): Comparación entre estudiantes y trabajadores con un modelo Logit mixto.” *Lecturas de Economía*, vol. 78, pp. 45-72, 2013.

Anexo – Datos adicionales sobre el modelo Probit ordinal

Aquí se brindan datos adicionales sobre el modelo Probit utilizado en [19] para clasificar ciudades según sus modos de transporte público.

Explicación de las variables utilizadas

$\log_{10}(\text{Población})$: Habitantes en el área urbana continua (ingresada como logaritmo decimal)

$\ln(\text{PIB per cápita})$: Se consideró el PIB per cápita por departamento estimado por el DANE (ingresada como logaritmo natural)

Atract: Indicador gravitacional, cuya expresión para una ciudad i identifica la interacción entre una localidad y ciudades vecinas, que pueden beneficiarse de sistemas conjuntos de transporte masivo.

Compac: Indicador de forma estandarizado, de fórmula $(2\sqrt{\pi \cdot \text{area}})/\text{perímetro}$. Ciudades más compactas tienen – para igual distribución de viajes – menor distancia promedio de viaje. De esta manera, una menor compacidad favorece modos de transporte más rápidos, dado que a mayor distancia de viajes mayor ahorro en los tiempos de viaje.

$$“i” \text{ es } A_i = \max_j \left[\frac{\text{Population}_j}{(\text{dist}_{ij})^2} \right]$$

$\ln(\text{Densidad})$: Habitantes por km^2 , considerando la superficie urbana continua (ingresada como logaritmo natural)

Motor: Motorización. El modelo considera tasas únicas para cada país expresadas en automóviles /1000 hab., dado que no existen estimaciones fiables por ciudad.

Prom_pend(%): Desnivel medio (%) de la red vial urbana, considerando la superficie continua. Para obtener esta variable se analizaron shapes tomados de Google Earth® con una aplicación en Python® que mide las coordenadas X, Y, Z de cada intersección en la red.

Integ_tarifa: Variable dummy que vale 1 si es posible realizar trasbordos gratuitos (o con un costo reducido) en un sistema de transporte público y 0 en caso contrario.

Ciudades analizadas y probabilidades asociadas a transporte masivo

En la Tabla 8 se muestran las probabilidades asignadas por el modelo a las categorías IV y V (transporte masivo) a las ciudades de Colombia con población entre 100.000 y un millón.

Tabla 8. Probabilidades asignadas a transporte masivo en ciudades intermedias de Colombia, ordenadas según población decreciente

Ciudad/Área Metropolitana (Departamento)	Población	Probab
Cúcuta (Norte de Santander)	951.986	0.541
Cartagena (Bolívar)	914.552	0.737
Pereira (Risaralda)	679.374	0.606
Villavicencio (Meta)	502.047	0.734
Ibagué (Tolima)	501.991	0.422
Santa Marta (Magdalena)	484.025	0.288
Manizales (Caldas)	480.423	0.538
Valledupar (Cesar)	468.165	0.042
Montería (Córdoba)	395.184	0.063
Armenia (Quindío)	355.478	0.178
Neiva (Huila)	340.512	0.059
Pasto (Nariño)	305.360	0.056
Palmira (Valle del Cauca)	279.465	0.325
Popayán (Cauca)	267.389	0.025
Sincelejo (Sucre)	259.435	0.020
Buenaventura (Valle del Cauca)	238.648	0.099

Barrancabermeja (Santander)	183.730	0.036
Tuluá (Valle del Cauca)	178.030	0.009
Tunja (Boyacá)	171.461	0.021
Florencia (Caquetá)	152.536	0.003
Yopal (Casanare)	152.421	0.020
Piedecuesta (Santander)	150.483	0.402
Chía (Cundinamarca)	149.570	0.610
Riohacha (La Guajira)	147.244	<0.001
Facatativá (Cundinamarca)	145.080	0.405
Cartago (Valle del Cauca)	132.653	0.020
Fusagasugá (Cundinamarca)	132.633	0.018
Girardot (Cundinamarca)	130.668	0.015
Jamundí (Valle del Cauca)	130.114	0.213
Zipaquirá (Cundinamarca)	121.962	0.154
Maicao (La Guajira)	118.889	<0.001
Ocaña (Norte de Santander)	116.232	<0.001
Sogamoso (Boyacá)	116.031	0.004
Quibdó (Chocó)	112.380	<0.001
Duitama (Boyacá)	112.308	0.002
Ciénaga (Magdalena)	110.303	0.002
Buga (Valle del Cauca)	109.753	0.001
Apartadó (Antioquia)	107.271	0.011
Turbaco (Bolívar)	103.755	0.055
Aguachica (Cesar)	103.209	<0.001