

DEFINICIÓN DE LA REVISTA

La revista Infraestructura Vial pertenece al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Fue creada en el año 1999, su primer número se publicó en diciembre de ese mismo año.

Esta revista cuenta con 30 publicaciones y un tiraje semestral de 2000 ejemplares, que son distribuidos a nivel nacional y en más de 35 países en todo el mundo.

La revista publica artículos de carácter técnico e investigaciones realizadas en el área de la infraestructura vial. También incluye otros contenidos relacionados con nuevas tecnologías que se aplican en la ingeniería de carreteras y para el mejoramiento del aprendizaje continuo. Además, divulga artículos de opinión que permiten compartir las experiencias de los ingenieros de carreteras en el mundo.

REQUERIMIENTOS PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS

1. Los artículos deben corresponder a investigaciones o estudios originales, casos de aplicación de nuevas tecnologías y artículos de opinión, en el campo de la infraestructura vial, ingeniería de transportes y temas afines.
2. El artículo debe presentarse en un documento de Microsoft Word y PDF, siguiendo los lineamientos definidos en el siguiente enlace: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/normas-para-presentacion-de-articulos.pdf>
3. El título del artículo debe presentarse tanto en español como en inglés (máximo 85 caracteres, cada uno).
4. Se debe presentar un resumen del artículo en español y en inglés (máximo 300 palabras, cada uno).
5. Es necesario presentar al menos 4 palabras clave en español y 4 en inglés, que identifiquen el artículo para una posible búsqueda en un sistema de archivo.
6. Los artículos que corresponden a investigaciones deben poseer: introducción, objetivos, metodología, desarrollo, análisis de resultados y conclusiones. En caso de que no aplique este formato, el autor debe especificar en una introducción a qué tipo de artículo corresponde.
7. La extensión máxima del artículo es de 12 páginas, incluyendo tablas y figuras.

REVISIÓN DE ARTÍCULOS

El procedimiento que se utiliza para seleccionar los artículos que se publican es el siguiente:

1. Entrega de los artículos a la dirección ejecutiva, para revisar si cumplen con los requisitos mínimos de publicación.
2. Cumplido el punto anterior se someten a una preselección por parte del comité director de la revista.
3. Los artículos preseleccionados son revisados por al menos dos de los miembros del consejo editorial.
4. Por último se envían a evaluadores externos, especialistas en el tema.
5. Aprobadas estas etapas se incluye en la lista de artículos que se van a publicar.

En cada etapa se van eliminando los artículos que no cumplan con los requerimientos necesarios para su publicación. En caso de que requieran alguna modificación, se le informará al autor para que tenga la oportunidad de corregirla y continuar el proceso. Si el artículo es rechazado o aprobado para su publicación se le informa de inmediato al autor respectivo.

Políticas de Uso:



Revista Infraestructura Vial por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional



SUSCRIPCIÓN

Ingrese sus datos personales en el sitio oficial de la revista:
<http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial>

EN ESTA EDICIÓN

ACCESIBILIDAD: ELEMENTO FUNDAMENTAL PARA LA EJECUCIÓN DE INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE

Accessibility: fundamental for implementation of transportation infrastructure element

Jhair Andrés Manrique Bautista José Carlos Jiménez Serpa Miller Humberto Salas Rondón

01

ESTIMACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA MATERIALES GRANULARES DE COSTA RICA

Estimation of the resilient modulus for granular materials of Costa Rica

Juan Carlos Múnera Miranda Jose Pablo Aguiar Moya, PhD.

12

EVALUACIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA TRONCAL DE TRANSPORTE PÚBLICO SAN JOSÉ-SABANILLA-LA CAMPIÑA MEDIANTE LA METODOLOGÍA DEL DESARROLLO ORIENTADO AL TRANSPORTE PÚBLICO

Assessment of the area of influence of San José-Sabanilla-La Campiña public transportation trunk corridor applying the transit oriented development methodology

Daniela Segura-Segura Diana Jiménez-Romero

21

ESTA REVISTA ES PRODUCIDA POR:



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA
Programa de
Infraestructura del
Transporte

ESTA REVISTA ESTÁ INDEXADA EN:



Esta es una publicación del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), ubicado en la Ciudad de la Investigación, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Tel.: (506) 2511-2500, Fax: (506) 2511-4440, Código Postal: 11501-2060 San José, correo: revistaiv.lanamme@ucr.ac.cr

Los comentarios de los artículos firmados son responsabilidad de sus autores. La revista Infraestructura Vial y el LanammeUCR no necesariamente comparten los criterios expresados en ellos.

De nuevo el equipo editorial se complace en entregar el presente número de la revista que, en esta ocasión, comprende dos artículos que se enfocan en la evaluación de accesibilidad y movilidad en el ámbito de transportes y, un tercero, enfocado en las propiedades de los materiales que son utilizados para el diseño de pavimentos en infraestructura vial.

En el primer artículo denominado **Accesibilidad: Elemento Fundamental para la Ejecución de Infraestructura de Transporte** presenta una investigación en la cual se realizaron modelaciones en TransCAD para ayudar en la determinación de índices de accesibilidad que permitirían seleccionar proyectos viales a futuro que mejorarían la infraestructura vial de Bucaramanga, Colombia.

En el segundo artículo **Estimación del Módulo Resiliente para Materiales Granulares de Costa Rica**, muestra la generación de un modelo universal que sea de utilidad para la estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica, parámetro sumamente utilizado por los diseñadores de pavimentos y el cual muchas veces puede ser difícil de obtener debido al equipo de laboratorio requerido.

Por último, el artículo **Evaluación de la Zona de Influencia de la Troncal de Transporte Público San José-Sabanilla-La Campiña Mediante la Metodología del Desarrollo Orientado al Transporte Público**, muestra los resultados de una evaluación utilizando una metodología que analiza si las zonas de una ciudad se encuentran planificadas en función de la movilidad. Se estudia el caso de una troncal de transporte público en la ciudad de San José, Costa Rica y a partir de los resultados que brinda la metodología, es posible determinar las áreas que deben mejorarse en cuanto a su planificación.

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
Directora de la Revista Infraestructura Vial
LanammeUCR.

DIRECTORA GENERAL

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
LanammeUCR
ana.elizondosalas@ucr.ac.cr

EDITOR

Ing. Sheng Qi Wang Qiu
LanammeUCR
sheng.wang@ucr.ac.cr

MAQUETACIÓN Y DIAGRAMACIÓN

Licda. Daniela Martínez Ortiz, LanammeUCR
daniela.martinezortiz@ucr.ac.cr

CONTROL DE CALIDAD

Óscar Rodríguez Quintana, LanammeUCR
oscar.rodriguezquintana@ucr.ac.cr

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Jose Pablo Aguiar Moya
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR

Dr. Jonathan Agüero Valverde
Universidad de Costa Rica, ProDus

Dr. Adrián Ricardo Archilla
Universidad de Hawaii, Estados Unidos

Dr. Fabricio Leiva Villacorta
Universidad de Auburn, Estados Unidos

M.Sc. Javier Zamora Rojas
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR

Accesibilidad: elemento fundamental para la ejecución de infraestructura de transporte

Accessibility: fundamental for implementation of transportation infrastructure element

Jhair Andrés Manrique Bautista

Ingeniero Civil, Magister en Transporte e Infraestructura
Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Colombia
jhairandresmanrique@gmail.com

Miller Humberto Salas Rondón

Ph.D, MSc en Gestión del Territorio e Infraestructura de Transporte
Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Colombia
miller.salas@upb.edu.co

José Carlos Jiménez Serpa

Ingeniero Civil, Magister en Transporte e Infraestructura
Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Colombia
jimser7@hotmail.com

Fecha de recepción: 25 de mayo 2019 / **Fecha de aprobación:** 15 enero 2020

RESUMEN

El Área Metropolitana de Bucaramanga -AMB- presenta actualmente una situación crítica de movilidad generada por diferentes factores ya sean políticos, sociales o del territorio, por ende se hace necesario una metodología de inversión en términos de infraestructura vial que beneficien a la mayor cantidad de habitantes posibles. Con esta investigación se pretende informar, fortalecer, optimizar y mejorar las condiciones viales presentes en todo el territorio Colombiano, demostrando que con un procedimiento de selección de proyectos viales en términos de tiempo, costo generalizado del viaje y optimización de los recursos públicos, se asegura un beneficio para la comunidad y no para un particular. La metodología utilizada fue basada en la determinación de índices de accesibilidad obtenidos de dos escenarios el actual, (hace referencia a la malla vial existente en AMB) y el futuro, (malla vial existente más los proyectos viales futuros) modelados por medio del software TransCad en el cual se obtuvieron malla vial futura que representaron ahorros en pesos colombianos de \$4.365 millones (1,51 millones de USD)

PALABRAS CLAVES—Accesibilidad, Tiempos de Viaje, Costo de viaje, Software TransCad.

ABSTRACT

The Metropolitan Area of Bucaramanga -AMB- currently presents a critical situation of mobility generated by different factors whether political, social or territorial, therefore an investment methodology is necessary in terms of road infrastructure that benefits the greatest number of inhabitants possible. This research aims to inform, strengthen, optimize and improve the road conditions present throughout the Colombian territory, showing that with a procedure of road project selection in terms of time, generalized cost of travel and optimization of public resources, it ensures a benefit for the community and not for a private individual. The methodology used was based on the determination of accessibility indices obtained from two scenarios, the current one, (refers to the existing road network in AMB) and the future, (existing road network plus future road projects) modeled through the TransCad software, in which a future road network was obtained that represented savings in Colombian pesos of \$ 4.365 million (1,51 million USD)

KEY WORDS-- Accessibility, travel time, travel cost, Software TransCAD.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, Colombia ha estado ejecutando la planeación de infraestructura vial de forma desorganizada, permitiendo que la construcción inmobiliaria sea el factor determinante de la forma y organización espacial del país, dejando en un segundo plano la movilidad en la malla vial.

Se ha determinado que uno de los principales problemas al momento de planificar, es la sectorización que involucra a una ciudad (desarrollo económico, medio ambiente, uso de suelo, vialidades, etc.) realizando su planeación y ejecución de manera independiente, olvidándose de la relación que existe entre estos sectores e ignorando su impacto. Un ejemplo muy claro es que, los planificadores urbanos enfocan sus trabajos en la organización de los patrones de actividades, las densidades, entre otras, sin tener en cuenta que muchas veces estas actividades se encuentran relacionadas temporalmente y espacialmente a otras, ignorando que para lograr una interacción entre estas es necesario vincular la ejecución de infraestructura vial de transporte.

Por otro lado, la principal actividad de los planificadores de transporte es la predicción y provisión de infraestructura para modos que permitan la movilidad en la ciudad, utilizando las adecuadas herramientas que determinen la medición del desempeño de la infraestructura, e ignorando que esta es únicamente un soporte de la movilidad. Por consiguiente, se ha determinado que los planes urbanos de infraestructura son rígidos y anticuados y no generan el desarrollo esperado, por lo que se hace necesario contar con nuevos instrumentos de planificación, como la accesibilidad, que nos permita responder de forma rápida a la demanda de necesidades que posee una ciudad. Este es un término muy común en el léxico de la población del mundo, pero no todos conocen su definición y como poder medirla.

La accesibilidad como potencial de oportunidades de interacción (Hansen, 1959), y facilidad para alcanzar cualquier zona de actividad usando un sistema de transporte determinado (Dalvi y Martin, 1976). En general, se puede asumir como la facilidad que ofrece la infraestructura de una ciudad a la población para alcanzar los destinos deseados, empleando la malla vial (Ben-Akiva y Lerman, s.f.), una de las características es que para poder alcanzar el sitio deseado se necesita de superar la barrera de la distancia, utilizando un medio de transporte, de igual manera, para determinar la medición no existe una ciencia exacta, por lo que se puede decir que no hay una medida estándar para la accesibilidad, esta se

puede tomar de acuerdo a las condiciones que presente el sector en estudio, de igual manera, cabe resaltar las tres grandes categorías de medición más comunes, como índices compuestos, espacio temporal y análisis de redes. De estas tres categorías, los análisis de redes y sus modelos para calcular la accesibilidad, cercanía y conectividad han demostrado ser la herramienta más eficaz para lograr este cálculo y así poder diagnosticar el estado de la ciudad o parte de ella. Uno de los fines de este proyecto es presentar la accesibilidad como una herramienta capaz de planificar la ciudad priorizando la red vial como organizadora del territorio.

METODOLOGÍA

Identificación de la Zona de Estudio

En la Figura 1 se muestra el área de estudio donde se determinaron los niveles de accesibilidad ubicados en el Área Metropolitana de Bucaramanga -AMB- Colombia. En la Figura 2 se muestran las Ciudades de Bucaramanga, Girón, Piedecuesta y Floridablanca y su red vial de conexión, de los cuales se tuvieron en cuenta una serie de características propias de cada zona de estudio. Principalmente se identificó la infraestructura vial presente y la información socioeconómica de la zona. De la infraestructura vial se analizaron las carreteras con mayor índice de congestión vehicular, su velocidad y su longitud, y como información socioeconómica se investigó el estrato económico y número de habitantes.

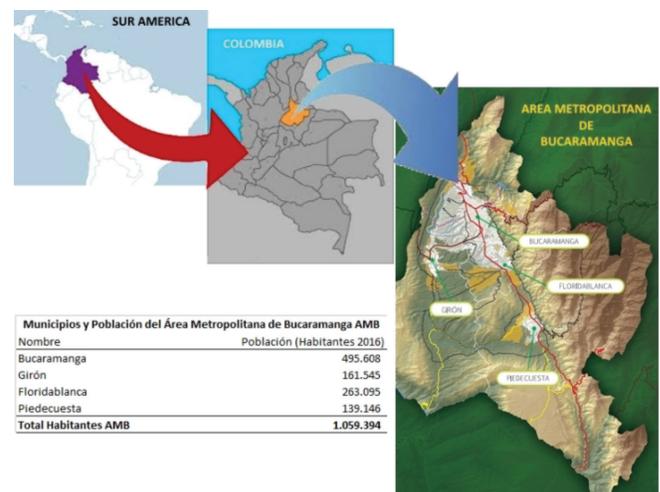


Figura 1. Ubicación del Estudio

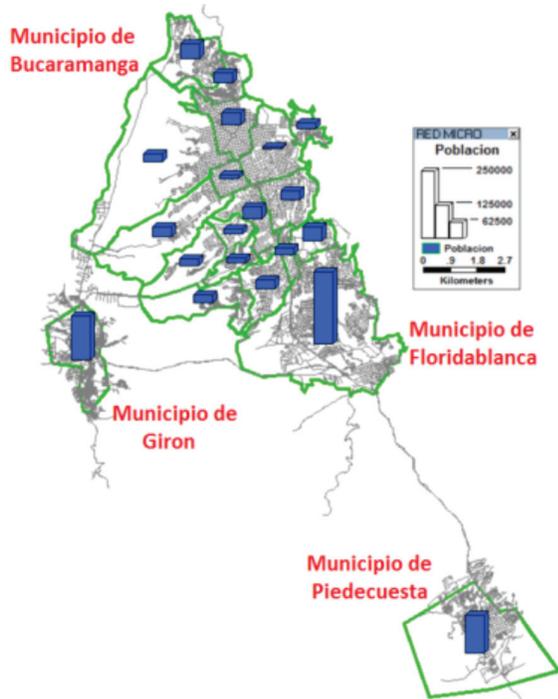


Figura 2. Descripción de la Malla vial y/o Información Socioeconómica del AMB

Simulación de la Malla Vial Existente (Actual)

Se proyecta la malla vial actual del Área Metropolitana de Bucaramanga en el software TransCad, acción ejecutada con el fin de poder generar matrices de tiempo, distribución de viajes e identificación de las vías con mayor congestión. Fines que ayudaran a concluir el mejor conjunto de vías nuevas que generen una optimización del uso de la malla vial existente y a su vez verificar por medio del nivel de accesibilidad su mejora en tiempos y costos generalizados del viaje.

Identificación de los Proyectos Viales (Futuros)

Teniendo en cuenta los proyectos viales futuros que se encuentran destinados para el Área Metropolitana de Bucaramanga en el Plan Maestro de Movilidad 2011 – 2030 (Área Metropolitana de Bucaramanga, 2011), se presenta la elección del mejor conjunto de vías que beneficiara a los habitantes, mejorando sus tiempos de viajes destinados dentro del área de estudio, para lo cual se procedió a seleccionar un conjunto ideal de vías proyectando una malla vial futura y su análisis de beneficios.

En el Cuadro 1 se podrán observar los 8 proyectos seleccionados, que a su vez cumplen la funcionalidad de anillo vial externo metropolitano y brindará una mejor distribución del tráfico.

Cuadro 1. Proyectos Futuros Viales Elegidos

| No. | Corredores Viales | Tipo de Intervención |
|-----|--|---------------------------|
| 1 | Anillo Vial Externo Tres Esquinas - Llano Grande | Construcción del Corredor |
| 2 | Anillo Vial Externo Llano Grande - Girón | Construcción del Corredor |
| 3 | Anillo Vial Externo Girón - Palenque | Adecuación del Perfil |
| 4 | Anillo Vial Centro Abastos - Café Madrid | Adecuación del Perfil |
| 5 | Circunvalar Del Norte | Construcción del Corredor |
| 6 | Circunvalar Oriental o de Los Cerros | Construcción del Corredor |
| 7 | Transversal Oriental Menzuli - Cerros | Adecuación del Perfil |
| 8 | Circunvalar Menzuli | Construcción del Corredor |

En la Figura 3 se puede observar la infraestructura vial existente y se evidencia las falencias de conexión metropolitana que tiene esta malla vial, comenzando por la falta de vías conectoras entre el municipio de Piedecuesta, Floridablanca y Girón. En la Figura 4 se muestra por medio del software TransCad la simulación de la Malla Vial Futura, donde se contemplan los 8 proyectos seleccionados.

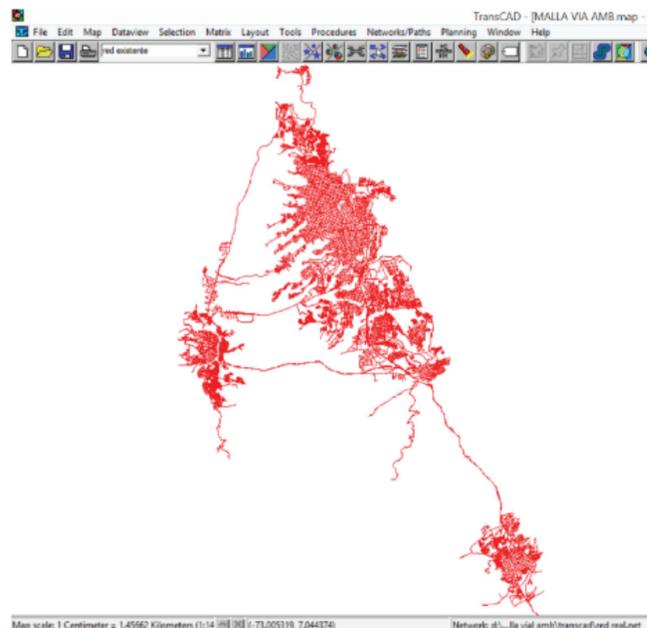


Figura 3. Simulación Malla Vial Existente

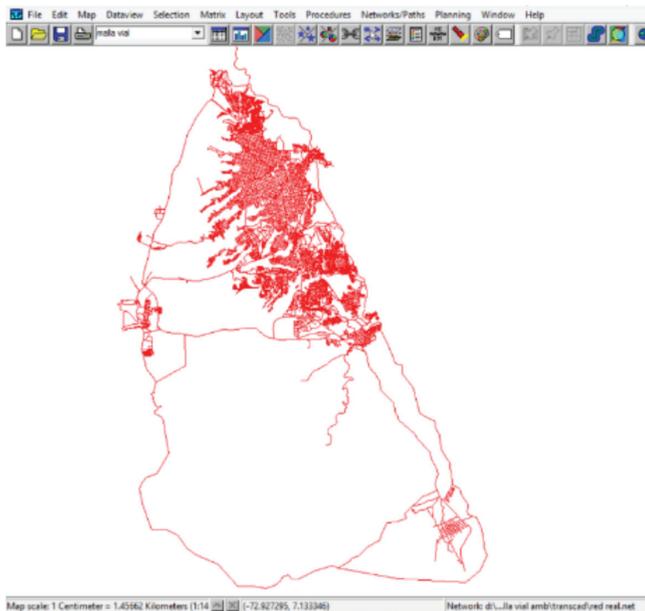


Figura 4. Simulación Malla Vial Futura

Localización de Centroides

Mediante la aplicación del software se determina el centroide de cada una de las 20 comunas, de acuerdo al área que se le asignó a cada una de ellas, este punto de centroide es el origen y el destino del viaje que genera o atrae la comuna, de acuerdo a esto se fijaron 20 centroides georreferenciados.

Matriz de Tiempos en la Malla Vial Actual.

Para realizar la toma de datos de los tiempos de viaje de un punto *i* hasta un punto *j* con las condiciones de tráfico actuales presentes en el Área Metropolitana de Bucaramanga, se utilizó la herramienta Waze (Waze Mobile Ltd., 2006), aplicación online de tráfico y navegación, como la información que maneja este sistema es en tiempo real toma en consideración los tiempos de semáforos, velocidades actuales presentes en la vía y congestión vehicular. La toma de datos se realizó en las horas punta del sector en análisis donde se presentaba la mayor congestión vehicular. De lo cual se tomaron 3 datos diarios de lunes a viernes, los 5 días de la semana, designando las horas punta a las 8 de la mañana, 12 del medio día y 7 de la noche. Debido a esto se obtuvieron 3 matrices de tiempos reales de desplazamiento, de las cuales se promedió y se creó una cuarta matriz en representación.

Cálculo de las Isócronas de la Malla Vial Existente y Futura

Fueron realizadas para la planificación del transporte basadas en el tiempo de viaje de diferentes modos caminata, vehículos no motorizados o en vehículos motorizados. Una vez obtenidos los tiempos de viajes del transporte vehicular motorizado por toda la red vial del Área Metropolitana de Bucaramanga se procedió a elaborar las isócronas del área de estudio por medio del software informático Surfer 10, y obteniendo la representación de la malla vial existente y futura y los tiempos en llegar a la comuna 12 (centroide) ver Figuras 5 y 6.

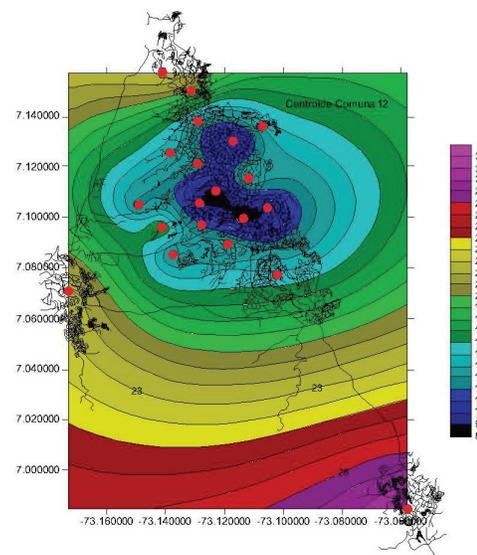


Figura 5. Isócronas Tiempo Existente

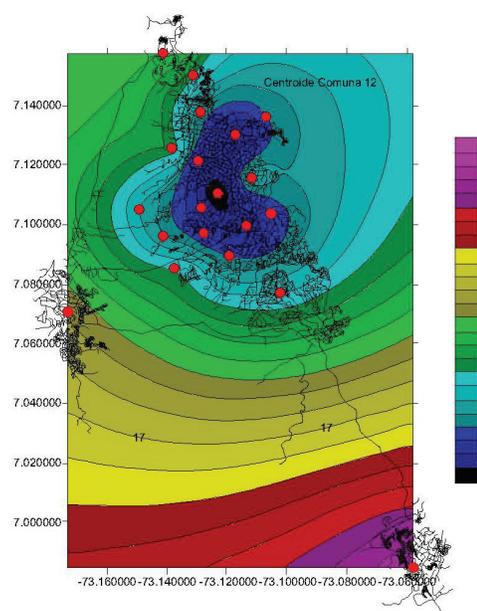


Figura 6. Isócronas Tiempo Futuro

Matriz Origen Destino (O-D)

Para el estudio de la malla vial futura fue necesario conocer cómo se desplazan los habitantes, para esto se realizó un estudio de origen y destino. Basado en los parámetros indicados por el Ministerio de Transporte de Colombiano (Ministerio de Transporte República de Colombia, 2011). mediante encuestas domiciliarias que permitieron conocer la información de los viajes que realizaron los habitantes, así como información socioeconómica, posesión de vehículo automotor y uso de medio de transporte público. El modelo de encuesta diseñado consta de cuatro etapas de preguntas, se realizaron 77 encuestas en cada una de las 20 comuna. El proceso de análisis y creación arrojó una base de 5277 viajes en total, con la cual se generó una matriz de viajes origen y destino.

Tamaño de la Muestra: Para calcular el tamaño de la muestra se utilizó la ecuación de estadística de muestreo propuesta por Scheaffer, Mendenhall, & Lyam, 1987 (Scheaffer et al., 1987). Donde establece dos tipos de fórmula según la población, en este caso como la población en estudio sobrepasa los 100.000 mil habitantes se utiliza la Ecuación (1).

$$n = \left[\frac{Z\hat{\sigma}}{E} \right]^2 \quad (1)$$

Donde,

Z: Corresponde al nivel de confianza

E: Error máximo

$\hat{\sigma}$: Coeficiente de variación

z=1,96 (Para un nivel de confianza de 95%)

Para el valor de E el cual establece Error máximo aceptable de la estimación se utilizará el valor de 0,05 lo cual significa que el error muestral es la diferencia que puede haber entre el resultado que se obtiene preguntando a una muestra de la población y el que se obtendría si se preguntara al total de ella, en conclusión los resultados estarán en un margen de $\pm 5\%$ del resultado real. Para las características del proyecto se asume que el coeficiente de variación es $\sigma = 1$, lo que significa que el valor de la media es igual a la desviación estándar, ver Ecuación (2) con sus correspondientes valores.

$$n = \left[\frac{1,96 \cdot 1}{0,05} \right]^2 = 1537 \text{ viviendas} \quad (2)$$

Expansión de la Muestra: Con el objetivo de convertir la muestra O-D en una muestra representativa para el universo de estudio. El factor de expansión debe multiplicar a los valores obtenidos de número de viajes generados y atraídos, según la Ecuación (3). Con esto se obtendrá la matriz de O-D real.

$$F.E. = \frac{N}{n} \quad (3)$$

Donde:

N: es el número de habitantes totales del área de estudio

n: es el número de habitantes a los cuales se les aplicó la encuesta,

Cuadro 2. Factor de Expansión

| No. Comunas | Nombre | Población (N) | Encuestados (n) | Factor de expansión (F.E.) |
|-------------|-------------------|---------------|-----------------|----------------------------|
| 1 | Norte | 54183 | 77 | 703,7 |
| 2 | Nororiental | 35035 | 77 | 455,0 |
| 3 | San Francisco | 44662 | 77 | 580,0 |
| 4 | Occidental | 38191 | 77 | 496,0 |
| 5 | García Rovira | 42092 | 77 | 546,6 |
| 6 | La Concordia | 26628 | 77 | 345,8 |
| 7 | La Ciudadela | 28933 | 77 | 375,8 |
| 8 | Sur Occidente | 18411 | 77 | 239,1 |
| 9 | La Pedregosa | 16623 | 77 | 215,9 |
| 10 | Provenza | 32299 | 77 | 419,5 |
| 11 | Sur | 28459 | 77 | 369,6 |
| 12 | Cabecera | 33404 | 77 | 433,8 |
| 13 | Morrórico | 52290 | 77 | 679,1 |
| 14 | Oriental | 22936 | 77 | 297,9 |
| 15 | Centro | 8627 | 77 | 112,0 |
| 16 | Lagos Del Cacique | 15045 | 77 | 195,4 |
| 17 | Mutis | 26723 | 77 | 347,1 |
| 18 | Girón | 161545 | 77 | 2098,0 |
| 19 | Floridablanca | 263095 | 77 | 3416,8 |
| 20 | Piedecuesta | 139146 | 77 | 1807,1 |

Planificación De Transporte Malla Vial Futura

Mediante el software TransCad se clasificaron las vías de la malla vial futura del Área Metropolitana de Bucaramanga por cantidad de vehículos que la recorrerán, las líneas rojas son las vías de mayor capacidad con un tránsito diario por encima de los 100.000 vehículos por día, las líneas moradas son las de segunda mayor capacidad con un tránsito diario comprendido entre 10.000 y 100.000 vehículos al día y por último estableció las vías de color azul como las menos transcurridas con un tránsito de 0 a 10.000 (ver Figura 7).

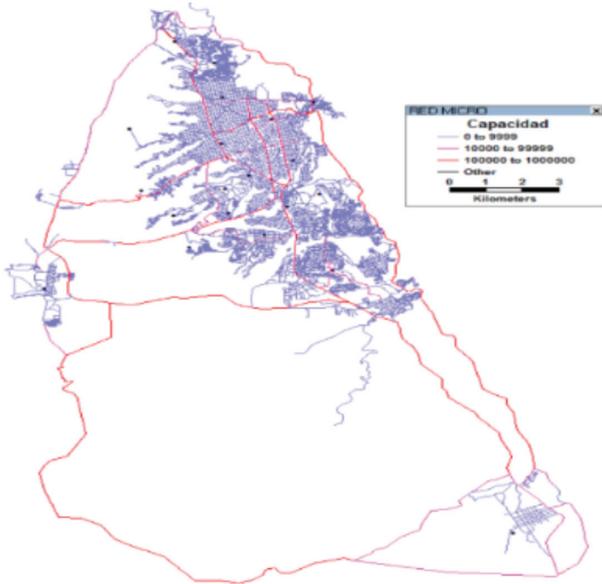


Figura 7. Distribución de Tráfico TransCad

Costo del Tiempo en Vehículo

Para determinar el precio del tiempo de desplazamiento en automóvil, se estimó el costo de operación de vehículo motorizados por kilómetro y luego se transformó dicho valor en tiempo.

Los elementos a considerar para establecer un costo variable de consumo de operación vehicular son: combustible, consumo de llantas y consumo de lubricantes, de esta manera se procede a encontrar un valor en pesos por kilómetro de cada uno de los elementos, después se procede a la suma de estos con el fin de obtener el costo total de operación.

Costo de Combustible (CC): El vehículo de referencia fue un automóvil liviano a gasolina con las siguientes características: motor 1,6 Litros, Transmisión manual 5 velocidades y llantas 185/60 R14, se tiene que para un galón de gasolina presenta un rendimiento promedio de 48,18 kilómetros (Autodaewoospark, 2016), el valor del galón de gasolina en el Área Metropolitana de Bucaramanga zona de estudio es de aproximadamente de \$7.869,00 COP / 2,72 USD (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

Obteniendo el consumo y el precio se puede proceder a calcular el costo del combustible por kilómetro recorrido, realizando la Ecuación (4).

$$\text{Indicador Consumo de Combustible} = \frac{\text{Precio } \$/\text{Gal}}{\text{Consumo}/\text{Gal}} \quad (4)$$

$$\text{Indicador Consumo de Combustible} = \frac{\$7.869,00 \text{ GL}}{48,18 \text{ Km/GL}} = \$ 163,33 \text{ pesos por Km (0,055 USD)}$$

Costo del Consumo de Llantas (CLL): La resistencia promedio de una llanta 185/65 R14 es de (Popely, 2016). 80.000 Kilómetros y su valor en el mercado colombiano es de aproximadamente (Michelin, 2016) \$ 223.900,00 COP.

Obteniendo esta información se procede a remplazarla en la Ecuación (5)

$$\text{Indicador Consumo de Llantas} = \sum \frac{\text{No. Llantas} * \text{Precio de Llanta } (\$)}{\text{Duracion Llanta en Km}} \quad (5)$$

$$\text{Indicador Consumo de Llanta} = \frac{4 * 223900}{80000} = \$ 11,2 \text{ pesos por km (0,004 USD)}$$

Costo de Consumo de Lubricantes (CL): El cambio de aceite se deberá realizar cada 5.000 kilómetros aproximadamente y este cambio en el Área Metropolitana de Bucaramanga tiene un costo de \$ 60.000 COP.

Se reemplaza dentro de la ecuación. Ver Ecuación (6).

$$\text{Indicadores Consumo de Lubricantes} = \sum \frac{\text{No. Unidades Lubricantes} * \text{Precio } (\$)}{\text{Duracion Lubricante en Km}} \quad (6)$$

$$\text{Indicadores Consumo de Lubricantes} = \frac{1 * 60000}{5000} = \$ 12 \text{ pesos por km (0,004 USD)}$$

Costo total: se procede a realizar la sumatoria de los costos variable de consumo de operación analizados para la operación de un vehículo motorizado en un kilómetro de motor 1,6 litros a gasolina, transmisión manual 5 velocidades y llantas 185/60 R14 dentro de la red vial presente en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Ver Ecuación (7).

$$\text{Costo Operacion Vehicular} = \text{CC} + \text{CLL} + \text{CL} \quad (7)$$

$$\text{Costo Operacion Vehicular} = 163,33 + 11,2 + 12 = \$ 186,53 \text{ pesos por km (063 USD)}$$

Obteniendo el precio de recorrido por kilómetro, se realiza la conversión de dicho valor a minutos, para esto se debe determinar la velocidad promedio de recorrido dentro de la malla vial futura y así fijar el tiempo de recorrido promedio de un kilómetro y establecer el valor del mismo. La velocidad promedio de recorrido es de 55 km/h.

Se determina el tiempo de recorrido de un kilómetro. Ver Ecuación (8).

$$\text{Tiempo km} = \frac{\text{Distancia (km)}}{\text{Velocidad } \left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)} \quad (8)$$

$$\text{Tiempo km} = \frac{1 \text{ km}}{50 \text{ km/h}} = 0,02 \text{ h} = 1,2 \text{ min} = 1 \text{ min } 12 \text{ seg}$$

“Un kilómetro se recorre en 1 minuto y 12 segundos y tiene un costo de operación vehicular de \$ 186,53 pesos.”

Análisis del Costo Generalizado del Viaje

Por medio de este análisis se va a determinar en costo generalizado del viaje, los beneficios económicos que traería la implementación de los 8 proyectos seleccionados. La idea principal de este análisis es tomar un promedio de costo de construcción de los 8 proyectos denominados “Anillo Vial Externo”, y definir el tiempo que se tomaría de los minutos de ahorro para poder satisfacer a cabalidad la inversión de los proyectos, de esta manera se está analizando la propuesta planteada a la solución de movilidad en el AMB. De la estadística principal se obtiene que el valor por minuto sea de \$ 157,94 pesos, ahora se multiplica este valor por la cantidad de minutos ahorrados en un día para así determinar el costo de los beneficios.

Lo primero que se realizó para obtener el resultado buscado fue multiplicar la matriz de tiempos de ahorro por la matriz origen y destino, recordando que la matriz origen destino define la cantidad de viajes que se realizan desde un punto A hasta un B de la red. Al multiplicar la cantidad de viajes por los minutos ahorrados de un solo viaje se obtiene el valor total de minutos disminuidos, el cual corresponde a 27.639.244 minutos en toda la red del Área Metropolitana de Bucaramanga Futura, ahora se procede a multiplicar dicho valor en costo por el establecido anteriormente. Ver Ecuación (9).

$$COSTO\ DIARIO\ AHORRADO = 27639244 * 157,94 = \$ 4.365.342.197,36 \quad (9)$$

Se está creando un ahorro en pesos diarios de \$ 4.365.342.197,36 .

En promedio para el país colombiano se gasta \$1.500 millones de pesos en Construir un kilómetro-carril (1.000 metros de largo por 3,5 metros de ancho).

En total para la ejecución de los 8 proyectos contemplados dentro de la malla vial futura de este proyecto, se necesitara una inversión total de \$ 751.800.000.000,00 COP, este valor dividido entre el costo ahorrado diario por desplazamientos en la red, va a determinar la cantidad de días en los cuales se va a recuperar dicha inversión. Tendremos la siguiente Ecuación (10)

$$Numero\ de\ Dias = \frac{751800000000}{4365342197,36} = 172,2 = 173\ dias. \quad (10)$$

Se requieren 173 días después de haber ejecutado dichos proyectos para recuperar la inversión en condiciones de tiempos de viajes ahorrados.

RESULTADOS

Análisis Sistémico de la Red

Descripción de la Infraestructura Vial existente y la Infraestructura Vial Futura: Se generaron 9.507 nodos y 14.207 arcos que se contemplan como la red inicial de trabajo y se denomina “Malla Vial existente o Real”, a cada arco se le destino unos atributos necesarios para este proyecto de estudio, los cuales fueron: longitud (km), velocidad (km), tiempo de recorrido y nombre de la vía. La situación futura de la infraestructura vial está compuesta por 9.535 nodos y 14.237 arcos, presenta 28 nodos y 30 arcos más que la Malla Vial Real, esto debido a que en la situación futura se consideran 8 futuras inversiones.

Análisis de Carácter Retístico de la Malla Vial existente

Topología de la Red - Malla Vial existente: Para analizar la Malla Vial existente desde su topología, se estudiaron los Indicadores de Conexión según el Cuadro 3.

Cuadro 3. Indicadores de conexión y Conectividad

| β de Kansky | 1,4943 |
|--|----------|
| η , Eta | 0,093 km |
| Q, Cociente entre diámetro y extensión total de la red | 0,019 |
| γ , Gamma | 0,000314 |
| γ , Gamma % | 49,82 % |
| NC, número ciclomatico | 4701 |
| Ω , alfa | 0,247 |

Al analizar los resultados obtenidos se puede deducir lo siguiente, la malla vial existente está bien conectada ya que el número de arcos supera el de nodos, la distancia media de los arcos presente es de 0,093 kilómetros definidos por el índice **Eta** y la red es mallada ya que el resultado del coeficiente entre diámetro y extensión se acerca a cero. El índice gamma (γ) el cual dio 0,000314, dice que la malla vial existente cuenta con un número de arcos muy pequeño con relación al número ideal el cual sería para este caso 90.373.542, este índice se verifica por la relación en porcentaje la cual dio 49,82 % e indica que cada nodo de la red se podría introducir un 49,82 % del total de arcos para poder obtener un grafo más completo. A su vez el índice alfa aclara que la malla vial estudiada presenta un número de circuitos muy bajo con un 0,247 y comparado con el ideal el cual seria 4,701.

Indicadores de Accesibilidad Malla Vial Existente: El índice de accesibilidad se determinó por indicadores (Madrid y Ortiz, 2005), el número asociado (NS) el cual corresponde al valor más alto de los tiempos de viajes (tiempos de filas) y define el tiempo máximo que debe transcurrir para acceder al centroide correspondiente de esa fila, siendo el tiempo mayor como el centroide menos accesible, el número Shimmel (Shi) que corresponde a la sumatoria de los tiempos (tiempos de filas) el cual define los valores más altos como los centroides con un acceso más difícil. Y por último indicador se estableció el Índice Omega que es el porcentaje de accesibilidad que presenta cada centroide, entre menor sea este valor mayor accesibilidad va a presentar ese nodo, ver Ecuación (11) y Cuadro 4.

$$\Omega (\text{Omega}) = \frac{\text{Shi} * \text{Shi min}}{\text{Shi min} * \text{Shi max}} * 100 \quad (11)$$

Donde: Ω (Omega): Porcentaje de Accesibilidad, Shi: Numero Shimmel del Centroide, Shi min: Numero Shimmel más bajo y Shi max: Numero Shimmel más alto.

Cuadro 4. Índice de Accesibilidad Malla Vial Real

| No. Comunas | Nombre | NS | SHI | OMEGA |
|-------------|-------------------|----|-----|-------|
| 1 | Norte | 38 | 403 | 60 |
| 2 | Nororiental | 42 | 391 | 58 |
| 3 | San Francisco | 39 | 294 | 44 |
| 4 | Occidental | 37 | 301 | 45 |
| 5 | García Rovira | 33 | 278 | 41 |
| 6 | La Concordia | 27 | 241 | 36 |
| 7 | La Ciudadela | 30 | 235 | 35 |
| 8 | Sur Occidente | 30 | 245 | 37 |
| 9 | La Pedregosa | 28 | 245 | 37 |
| 10 | Provenza | 26 | 308 | 46 |
| 11 | Sur | 31 | 302 | 45 |
| 12 | Cabecera | 31 | 282 | 42 |
| 13 | Morrórico | 41 | 387 | 58 |
| 14 | Oriental | 35 | 284 | 42 |
| 15 | Centro | 32 | 261 | 39 |
| 16 | Lagos Del Cacique | 28 | 302 | 45 |
| 17 | Mutis | 37 | 346 | 52 |
| 18 | Girón | 35 | 431 | 64 |
| 19 | Floridablanca | 26 | 382 | 57 |
| 20 | Piedecuesta | 41 | 671 | 100 |

Análisis de Carácter Retístico Malla Vial Futura

Carácter Cinético de la Malla Vial Futura

Para este grafo final se establecieron unas velocidades medias de operación de acuerdo a la jerarquía de la vía, estas

velocidades fueron tomadas del Plan Maestro de Movilidad del Área Metropolitana de Bucaramanga, cabe mencionar que se seleccionaron unas velocidades por debajo de las mencionadas en el plan maestro, ya que se tuvieron en cuenta los tiempos de semaforización presente en algunas vías de la malla vial (Cuadro 5).

Cuadro 5. Velocidades de Diseño

| Vía Metropolitana Primaria | Vía Metropolitana Secundaria | Vía Municipal |
|----------------------------|------------------------------|---------------|
| 80 km/h | 45 km/h | 40 km/h |

Fuente: (Área Metropolitana de Bucaramanga, 2011)

Topología de la Red - Malla Vial Futura

Indicadores de Conexión de la Malla Vial Futura: Para la red de comparación denominada malla vial futura. Se establecieron los valores de las características principales de este grafo futuro, tales como: número de nodos presentes en el grafo (9.535 nodos), número total de arcos (14.237 arcos) y longitud total de la red (1.391,09 km) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Indicadores de Conexión y Conectividad

| | |
|--|----------|
| β de Kansky | 1,4931 |
| η , Eta | 0,098 km |
| Q, Cociente entre diámetro y extensión total de la red | 0,018 |
| γ , Gamma | 0,000313 |
| γ , Gamma % | 49,78 % |
| NC, número ciclotómico | 4703 |
| Ω , alfa | 0,246 |

Al analizar los resultados se deduce que la malla vial futura está bien conectada ya que el número de arcos supera el de nodos, la distancia media de los arcos presente es de 0,098 kilómetros definidos por el índice Eta y la red es mallada ya que el resultado del coeficiente entre diámetro y extensión se acerca a cero. El índice gamma el cual dio 0,000313, dice que la malla vial futura cuenta con un número de arcos muy pequeño con relación al número ideal el cual sería para este caso 90.906.690, este índice se verifica por la relación en porcentaje la cual dio 49,78 % e indica que cada nodo de la red se podría introducir un 49,78 % del total de arcos para poder obtener un grafo más completo. A su vez el índice alfa aclara que la malla vial estudiada presenta un número de circuitos muy bajo con un 0,246 y comparado con el ideal el cual sería 4.703 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Indicadores de Conexión y Conectividad

| No. Comunas | Nombre | NS | SHI | OMEGA |
|-------------|-------------------|----|-----|-------|
| 1 | Norte | 35 | 281 | 51 |
| 2 | Nororiental | 33 | 255 | 47 |
| 3 | San Francisco | 30 | 201 | 37 |
| 4 | Occidental | 32 | 271 | 49 |
| 5 | García Rovira | 30 | 205 | 37 |
| 6 | La Concordia | 26 | 146 | 27 |
| 7 | La Ciudadela | 26 | 153 | 28 |
| 8 | Sur Occidente | 26 | 161 | 29 |
| 9 | La Pedregosa | 23 | 149 | 27 |
| 10 | Provenza | 23 | 181 | 33 |
| 11 | Sur | 27 | 232 | 42 |
| 12 | Cabecera | 25 | 152 | 28 |
| 13 | Morrórico | 29 | 206 | 37 |
| 14 | Oriental | 27 | 163 | 30 |
| 15 | Centro | 27 | 147 | 27 |
| 16 | Lagos Del Cacique | 25 | 199 | 36 |
| 17 | Mutis | 30 | 205 | 37 |
| 18 | Girón | 29 | 314 | 57 |
| 19 | Floridablanca | 20 | 239 | 44 |
| 20 | Piedecuesta | 33 | 549 | 100 |

El índice de Omega determina la accesibilidad relativa o topológica de la red, cuando el nodo presenta una accesibilidad alta significa que el porcentaje de omega es bajo y cuando la accesibilidad es mínima significa que el porcentaje es alto. Comparando los diferentes índices Omega para la malla vial existente, se tiene que de este caso de estudio el centroide más accesible es el de la fila 7 denominada “La Ciudadela”, con un porcentaje de índice Omega de 35. Para la malla vial futura, se estableció que las comunas 6 y 9 denominadas La Concordia y La Pedregosa presentan un porcentaje menor de índice Omega de 27. Indicando que estas comunas presentan una mejor ubicación geográfica, una mejor conexión vial con la red futura destinada para el Área Metropolitana de Bucaramanga y una mejor distribución del tráfico interno, características que ayudan a obtener los mejores tiempos de viaje.

Análisis Comparativo entre la Malla Vial Existente y la Malla Vial Futura

Con los resultados obtenidos de los índices de conectividad y conexión, se identificaron cuales de los dos escenarios se encuentra en mejores condiciones de distribución, conectividad y cohesión.

De acuerdo al primer indicador β de Kansky se puede deducir que se está trabajando con una red bien conectada o compleja tanto en la malla vial existente como en la futura, pero el grafo futuro presenta un índice menor a la malla actual lo cual refleja que dicha red es menos compleja, es decir, que la malla vial futura presenta mayor cantidad de nodos pero no de todos ellos se desprenden múltiples arcos.

El segundo indicador η Eta establece la distancia media entre nodos que presenta cada red, de acuerdo a los datos obtenidos la malla vial futura presenta un aumento del 5,38%.

Del indicador de cociente entre diámetro y extensión total de la red se puede indicar que se está trabajando en los dos escenarios propuestos con una malla vial mallada.

El índice gamma, muestra que la malla vial futura presenta un número de arcos menor que la malla existente, pero en los dos escenarios se tienen valores muy pequeños en comparación del valor ideal, a su vez el porcentaje gamma de la malla vial futura menciona que cada nodo se puede introducir un 49,78 % más a los arcos presentes en la red para hacerla más completa.

Y por último el índice alfa indica que en los dos escenarios presenta un valor muy bajo de los circuitos de la red determinados en el índice anterior, en comparación con el ideal que se debería tener con la cantidad de nodos y arcos presentes. Al obtener un aumento de nodos y arcos en la malla vial futura se aumenta el número de circuitos existentes y el número de circuitos ideales.

De las isócronas de tiempo real y futuro ilustradas se puede destacar la disminución de los tiempo principalmente de los viajes realizados dentro del Municipio de Bucaramanga, ya que en las isócronas de tiempo actual presenta un tiempo máximo de recorrido interno de 16 minutos y en las isócronas futura presenta tiempo de 10 minutos gracias a las condiciones que presenta la red futura.

De igual forma el viaje más largo registrado dentro del Área Metropolitana es el de Piedecuesta – Bucaramanga, el cual dentro de las isócronas actuales presenta un tiempo máximo de 32 minutos aproximadamente desde el centroide interno

denominado Cabecera, este mismo viaje con las mismas condiciones tiene un tiempo máximo de 26 minutos en el grafo futuro, obteniendo una disminución de 6 minutos.

Realizando la debida comparación por medio de la accesibilidad, se puede mencionar que la malla vial real cuenta con un porcentaje menor de 35% en la comuna 7 denominada “La Ciudadela”, la cual mediante el porcentaje hallado es la comuna con mayor accesibilidad de esta red, al compararlo con la malla vial futura la cual tiene un porcentaje menor de índice Omega de 27% en la comuna 9 denominada “La Pedregosa”, que de igual manera cuenta con el menor porcentaje, es la comuna más accesible del grafo futuro, de acuerdo a estos dos porcentajes se puede asumir que los proyectos viales del anillo vial externo incluidos en la red futura generaron un aumento de accesibilidad de la red total de un 8% en general, lo que significa, que se pasa de tener tiempos mínimos de 8 y 9 minutos a 2 y 3 minutos.

CONCLUSIONES

Se comprobó que realmente se puede realizar una inversión óptima de los recursos del departamento para la infraestructura vial, en función de un estudio de accesibilidad que condicione la inversión a los proyectos que realmente beneficiaran a la comunidad, con el fin de generar una disminución de tiempo y costo de desplazamiento vehicular; eliminando de todo contexto el beneficio económico de un particular. Por medio de la implementación de los 8 proyectos de infraestructura vial, establecidos en la malla vial futura se generó ahorros en pesos colombianos de \$4.365 millones (1,51 millones de USD).

En total para la ejecución de los 8 proyectos se contemplan una inversión aproximada de \$751.800.000.000,00 para este desarrollo se requieren 173 días después de haber ejecutado dichos proyectos para recuperar la inversión en condiciones de tiempos de viajes ahorrados, adicionándole por demás un gran beneficio para los habitantes del AMB, los cuales ahorran dinero y tiempo, por cada trayecto realizado de viaje.

Se creó una matriz de viajes origen – destino del Área Metropolitana de Bucaramanga donde se especifica el comportamiento de movilidad que poseen los habitantes, esto con el fin de brindar una ayuda a la planificación y expansión de la zona de estudio.

REFERENCIAS

1. Alcaldía Municipal de Floridablanca. (2012). *Plan de Desarrollo Primero Floridablanca 2012 - 2015*. Floridablanca: Alcaldía Municipal de Floridablanca.
2. Alcaldía Municipal de Floridablanca. (25 de 6 de 2015). *Alcaldía Municipal de Floridablanca*. Disponible: <http://www.floridablanca.gov.co/poblacion/>.
3. Alcaldía Municipal de Girón. (14 de 10 de 2015). *Alcaldía Municipal de Giron*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2016. Disponible: http://www.giron-santander.gov.co/informacion_general.shtml.
4. Alcaldía Municipal de Piedecuesta. (26 de Noviembre de 2015). *Alcaldía Municipal de Piedecuesta*. Recuperado el 14 de Agosto de 2016. Disponible: http://www.alcaldiadepiedecuesta.gov.co/sitio/index.php?option=com_content&view=category&id=141&Itemid=179.
5. Área Metropolitana de Bucaramanga (2011). *Plan Maestro de Movilidad Área Metropolitana de Bucaramanga 2011 - 2030*. Bucaramanga.
6. Área Metropolitana de Bucaramanga (12 de Septiembre de 2016). *Área Metropolitana de Bucaramanga*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2016. Disponible: <http://www.amb.gov.co/>. (Área Metropolitana de Bucaramanga 2016)
7. Autodaewoospark (4 de Noviembre de 2016). *Auto Daewoo Spark*. Recuperado el 12 de Agosto de 2016. Disponible: <http://www.autodaewoospark.com/rendimiento-combustible-aveo.php>.
8. Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (s.f.). *Disaggregate travel and mobility choice models and measures of accessibility*. (A. D. Hensher, & R. P. Storper, Edits.) London, Croom-helm: Behavioural travel modelling.
9. Dalvi, M. Q., & Martin, K. M. (1976). The measurement of accessibility: some preliminary results. *Transportation*, 5(1), 17-42.
10. Hansen, W. G. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of planners*, 25(2), 73-76.
11. Madrid Soto, A., & Ortiz Lopez, L. M. (2005). *Análisis y Síntesis en Cartografía*. Bogotá: Centro Editorial Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia. Disponible: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1239/>.

12. Martínez , E. J. (12 de Agosto de 2015). ¿Cómo está distribuida en cifras Bucaramanga? *Vanguardia*. Disponible: <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/infografia-170668-como-esta-distribuida-en-cifras-bucaramanga>.
13. Michelin. (12 de Octubre de 2016). *MICHELIN*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2016. Disponible: <http://www.michelin.com.co/CO/es/tires/185/65/14.html>.
14. Ministerio de Minas y Energía (21 de 7 de 2016). *Ministerio de Minas y Energía*. Recuperado el 14 de Agosto de 2016. Disponible: <https://www.minminas.gov.co/precios-de-combustible>.
15. Ministerio de Transporte República de Colombia (19 de 09 de 2011). *Mintransporte*. Recuperado el 12 de Agosto de 2016. Disponible: https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/documentos_del_ministerio/Manuales.
16. Oficina de Planeacion del Municipio de Bucaramanga (3 de Julio de 2016). *Alcaldia de Bucaramanga*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2016, Disponible: <http://www.bucaramanga.gov.co/datos.asp>.
17. Popely, R. (14 de 10 de 2016). *Cars*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016. Disponible: <https://www.cars.com/articles/2013/05/how-long-do-tires-last/>.
18. Scheaffer, R., Mendenhall, W., & Lyam, O. (1987). Elementos de Muestreo. En *Elementos de Muestreo* (pág. 53). Mexico: Grupo Editorial Iberoamerica.
19. Salas Rondon, M. H. (2008). *ACCESIBILIDAD, ELEMENTO A CONSIDERAR EN LA INVERSIÓN DE INFRAESTRUCTURAS*. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
20. Waze Mobile Ltd. (2006). *Waze*. Software. Disponible: <https://www.waze.com/es/>.

Estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica

Estimation of the resilient modulus for granular materials of Costa Rica

Juan Carlos Múnera Miranda

Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

juan.muneramiranda@ucr.ac.cr

Jose Pablo Aguiar Moya, PhD.

Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

jose.aguiar@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 15 de enero 2020 / **Fecha de aprobación:** 17 de marzo 2020

RESUMEN

El módulo resiliente es una medida de la capacidad de un material de almacenar o absorber energía sin que este experimente deformación permanente. Este se determina mediante ensayos triaxiales de carga repetida y es un parámetro importante en el análisis y diseño de pavimentos flexibles. Con su valor es posible predecir la respuesta mecánica del pavimento como esfuerzos, deformaciones y deflexiones. Sin embargo, su obtención es onerosa por los equipos que involucra, razón por la que no todos los laboratorios de materiales cuentan con el ensayo. Debido a esto, los diseñadores de pavimentos recurren a correlaciones para aproximar un valor de módulo resiliente, que generalmente difiere de forma considerable del obtenido con el ensayo. La siguiente investigación tiene como objetivo la estimación de un modelo universal de módulo resiliente para materiales granulares que considere variables relacionadas con los estados de esfuerzo y las características básicas de los materiales. Para ello, se generó un modelo de regresión lineal mediante mínimos cuadrados ordinarios con datos de al menos 13 diferentes materiales granulares. El modelo se validó mediante indicadores estadísticos obteniendo una bondad de ajuste aceptable.

PALABRAS CLAVES: Módulo resiliente, materiales granulares, regresión.

ABSTRACT

The resilient modulus is a measure of the ability of a material to store or absorb energy without experiencing permanent deformation. This is determined by triaxial tests of repeated load and is an important parameter in the analysis and design of flexible pavements. With its value it is possible to predict the mechanical response of the pavement as stresses, deformations and deflections. However, obtaining it is expensive for the equipment involved and not all material laboratories have the test. Because of this, pavement designers use correlations to approximate a resilient modulus value, which generally differs considerably from that obtained with the test. The following research aims to estimate a universal model of a resilient modulus for granular materials that considers variables related to stress states and the basic characteristics of the materials. For this, a linear regression model was generated using ordinary least squares with data from at least 13 different granular materials. The model was validated by statistical indicators obtaining an acceptable goodness of fit.

KEY WORDS: Resilient modulus, granular materials, regression.

INTRODUCCIÓN

El módulo resiliente es una medida de la capacidad los materiales para almacenar o absorber energía sin deformación permanente, es decir, es una propiedad dentro del límite proporcional del material (Popov, 1990). Se determina mediante un ensayo de respuesta dinámica basado en la deformación recuperable bajo cargas repetidas y se define como (Ecuación 1) (Huang, 2004).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

donde

M_R = módulo resiliente

σ_d = esfuerzo desviador

ϵ_r = deformación unitaria recuperable (resiliente)

Cuando un material se somete a un ensayo de carga repetida, al inicio de la aplicación de carga, se da una deformación permanente y al mismo tiempo una deformación recuperable, conforme aumenta el número de repeticiones carga, la deformación plástica va disminuyendo y la deformación pasa a ser prácticamente toda recuperable (Huang, 2004) (Figura 1).

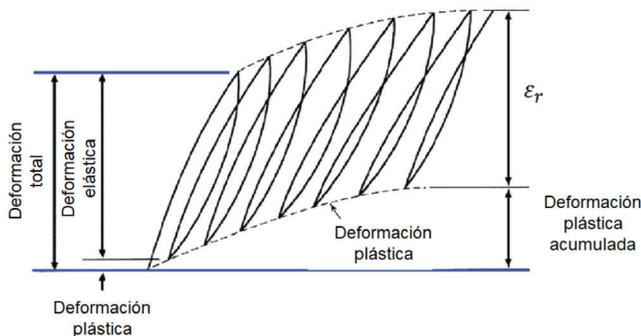


Figura 1. Deformaciones bajo un ensayo de carga repetida (Huang, 2004)

El módulo resiliente se realiza en materiales cohesivos y granulares mediante un ensayo triaxial de carga repetida, que simula los estados de esfuerzos que experimenta el material por el tránsito de los vehículos. El ensayo consiste en la aplicación de un pulso de carga haversiana de magnitud fija, con una duración de carga de 100 ms y un periodo de reposo de 900 ms, sobre un espécimen de ensayo cilíndrico (102 mm de diámetro y 203 mm de altura, generalmente). Durante el ensayo, la muestra se somete a un esfuerzo cíclico de manera dinámica y esfuerzo de confinamiento de forma estática proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. La respuesta total de la deformación axial resiliente

(recuperable) de la muestra se mide y se utiliza para calcular el módulo resiliente, según la norma de ensayo AASHTO T 307 (AASHTO, 2019). El ensayo se ejecuta para varios estados de esfuerzo, de manera que se pueda calcular un modelo de módulo resiliente para el material que se está analizando, (Ecuaciones 2, 3 y 4) (NCHRP, 2004).

$$M_R = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3} \quad (2)$$

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (4)$$

donde

M_R = módulo resiliente

θ = invariante de esfuerzos
(sumatoria de esfuerzos principales)

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ = esfuerzos principales

P_a = presión atmosférica

τ_{oct} = esfuerzo cortante octaédrico

k_1, k_2 y k_3 = parámetros de regresión normalizados log-log

El módulo resiliente se utiliza en el análisis elástico multicapa, y junto con el módulo de Poisson, es una variable indispensable para predecir la respuesta mecánica de los materiales como los esfuerzos, deformaciones y deflexiones dentro de un pavimento flexible (Jiménez, 2009). Su valor es un parámetro de entrada para el diseño empírico y mecánico-empírico de pavimentos.

Al ser un ensayo costoso por los equipos que implica, no todos laboratorios de materiales convencionales disponen de este ensayo. Muchos diseñadores de pavimentos optan por el uso de correlaciones o nomogramas para determinar el valor aproximado del módulo resiliente. Con los nomogramas se estima el módulo resiliente según los resultados de otros ensayos básicos de caracterización (AASHTO, 1993). Otra forma, es mediante ecuaciones empíricas como la que propusieron Heukelom y Klomp (1962) (Ecuación 5).

$$M_R = 1500 \cdot CBR \quad (5)$$

donde

M_R = módulo resiliente, psi

CBR = índice de soporte California, %

El valor de 1500 de la Ecuación 5 puede variar de 750 a 3000 con un factor de 2. Provee mejores resultados con CBR menores a 20, es decir, con suelos de grano fino o subrasantes (Huang, 2004). Ninguna de estas formas de estimar el módulo resiliente da un resultado cercano al valor real que podría experimentar el material dentro de la estructura del pavimento, ya que, por ejemplo, no toma en consideración el comportamiento esfuerzo-dependiente, es decir, en condiciones reales de carga el material no exhibe un único valor de módulo resiliente, sino que esto va a depender del estado de esfuerzos bajo el cual este sometido en el pavimento.

El objetivo principal de la investigación, es la estimación de un modelo universal de módulo resiliente para materiales granulares, que considere variables relacionadas con los estados de esfuerzos y las características básicas de los materiales. Para lograr esto, se tomó una base de datos con 13 materiales granulares diferentes con resultados de ensayo

de módulo resiliente y caracterización básica. Con esta información se generó un modelo de regresión lineal mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO). El modelo se validó mediante diferentes indicadores estadísticos y se obtuvo una bondad de ajuste aceptable.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del modelo de predicción del módulo resiliente de materiales granulares, se analizaron 13 muestras provenientes de diferentes zonas de Costa Rica compuesta por 8 bases, 2 subbases y 3 préstamos; de las cuales se tienen datos de ensayo de: módulo resiliente, granulometría, densidad-humedad (Próctor modificado) e índice de soporte California (CBR). Para el análisis se seleccionaron inicialmente las variables mostradas en el Cuadro 1. En este mismo cuadro se indican los rangos de datos de cada variable para las muestras analizadas.

Cuadro 1. Variables para análisis de regresión

| Variable | Abreviatura | Unidades | Rango de datos | |
|---|-------------|-------------------|----------------|--------|
| | | | Mínimo | Máximo |
| Módulo resiliente | Mr | kPa | 48100 | 555000 |
| Esfuerzo desviador | σ_d | kPa | 10 | 966 |
| Esfuerzo de confinamiento | σ_c | kPa | 21 | 138 |
| Invariante de esfuerzos (suma de esfuerzos principales) | θ | kPa | 72 | 1381 |
| Contenido óptimo de humedad | %Opt | % | 5 | 15 |
| Densidad máxima seca (Próctor modificado) | Dmax | kg/m ³ | 1800 | 2282 |
| Porcentaje pasando el tamiz de 3/4" (19 mm) | Pas N°3/4 | % | 61 | 98 |
| Porcentaje pasando el tamiz N°4 (4,75 mm) | Pas N°4 | % | 35 | 93 |
| Porcentaje pasando el tamiz N°200 (0,075 mm) | Pas N°200 | % | 4 | 16 |
| Abertura de tamiz donde pasa el 60% | D60 | mm | 1 | 18 |
| Índice de soporte California | CBR al 95% | % | 29 | 140 |

Se generó la matriz de coeficientes de correlación Pearson con el objetivo de determinar el grado de asociación lineal entre pares de variables. Este análisis estadístico se utilizó como criterio para descartar variables explicativas que estuvieran correlacionadas (esto se detalla posteriormente en el Cuadro 2).

Con las variables definidas se aplicó un modelo clásico de regresión lineal mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para determinar el modelo de predicción. Para que los parámetros o predictores de la regresión sean consistentes (no sesgados) y eficientes (varianza mínima) se deben cumplir los siguientes supuestos:

- Los residuos tienen una media de cero.
- Todos los predictores no están correlacionados con los residuos.
- Los residuos no están correlacionados entre sí.
- Los residuos tienen una varianza constante (homocedasticidad).

- Ninguna variable predictora está correlacionada perfectamente ($r = 1$) con otra variable predictora (multicolinealidad).
- Los residuos están distribuidos normalmente.

Los supuestos se verificaron con el análisis de gráficos de residuos, histogramas e inferencia por medio de pruebas de hipótesis. Para considerar el no cumplimiento del supuesto de varianza constante de las perturbaciones se realizó una corrección de White de los errores estándar por heterocedasticidad con el fin de tener una inferencia robusta. Para garantizar la linealidad de las variables se aplicó una transformación logarítmica ya que algunas variables tienen un comportamiento no lineal.

Se evaluó la bondad de ajuste del modelo, es decir, el grado en que las variables independientes analizadas explicaban la variable dependiente (módulo resiliente) por medio del coeficiente de determinación ajustado.

En la Figura 2 se muestra el esquema que se siguió para validar el modelo de regresión.

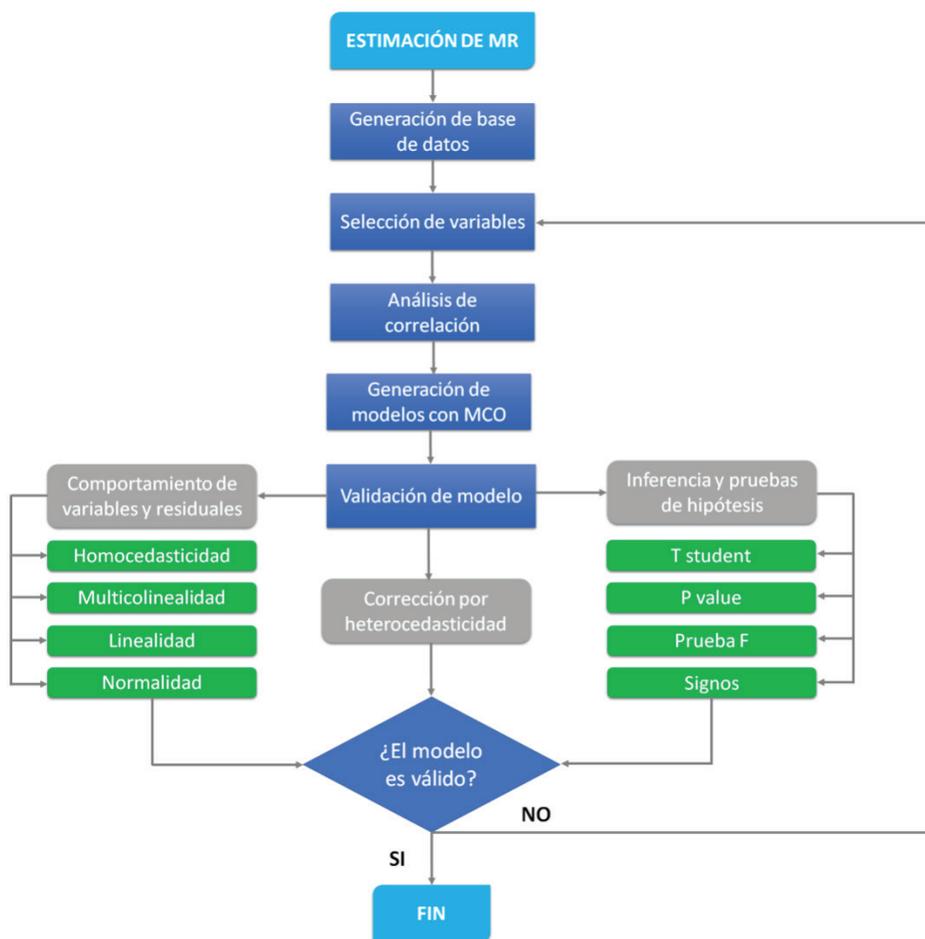


Figura 2. Esquema para la estimación de modelo

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Linealidad

Para garantizar la linealidad del modelo se realizó una transformación de variable de tipo logarítmica, debido a que el módulo resiliente con respecto al invariante de esfuerzos o el esfuerzo desviador, puede variar de forma no lineal. Por lo tanto, el modelo no lineal propuesto inicialmente se indica en la Ecuación 6. Los β corresponden a los coeficientes de regresión.

$$Mr = \beta_0 \cdot \sigma_d^{\beta_1} \cdot \sigma_c^{\beta_2} \cdot \theta^{\beta_3} \cdot \%Opt^{\beta_4} \cdot Dmax^{\beta_5} \cdot Pas3 / 4''^{\beta_6} \cdot PasN^{\circ}4^{\beta_7} \cdot PasN^{\circ}200^{\beta_8} \cdot D60^{\beta_9} \cdot CBR95\%^{\beta_{10}} \quad (6)$$

Aplicando la transformación de variable (log-log) el modelo lineal sería el mostrado en la Ecuación 7.

$$\log Mr = \log \beta_1 + \beta_2 \log \sigma_d + \beta_3 \log \sigma_c + \beta_4 \log \theta + \beta_5 \log \%opt + \beta_6 \log Pas3/4'' + \beta_7 \log PasN^{\circ}4 + \beta_8 \log PasN^{\circ}200 + \beta_9 \log D60 + \beta_{10} \log CBR95\% \quad (7)$$

Correlación Lineal entre Variables

Para seleccionar del Cuadro 1 las variables independientes a ser incluidas en el análisis de regresión, se calcularon los coeficientes de correlación entre todas las variables (Cuadro 2). Un coeficiente de correlación mayor a 0,70 se considera como una correlación significativa entre variables (Holicky, 2013).

Se puede observar que las variables de esfuerzo desviador y esfuerzo de confinamiento están correlacionadas con el invariante de esfuerzos de forma positiva, esto se debe a que el invariante de esfuerzos es la suma de esfuerzos principales y estos incluyen al esfuerzo desviador y el esfuerzo de confinamiento. La densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad están correlacionadas de forma negativa, esto es esperable ya que una es función de la otra. Con respecto a las variables granulométricas todas entre ellas están correlacionadas positivamente. Esto es razonable ya que los porcentajes pasando son sumas acumuladas y el tamaño por el que pasa el 60%, es dependiente de los porcentajes pasando. El índice de soporte California se correlaciona negativamente con el porcentaje pasando el tamiz N°4 y positivamente con el tamaño por el que pasa el 60%, esto es esperable, ya que, a mayor contenido de partículas gruesas, mayor valor de CBR.

Con respecto a la correlación del módulo resiliente con las demás variables, este tiene una correlación alta positiva con respecto al esfuerzo desviador, el esfuerzo de confinamiento y el invariante de esfuerzos, siendo este último el que tiene mayor coeficiente de correlación. Se observa una correlación menor del módulo resiliente con las restantes variables.

Entre las variables asociadas al ensayo de Próctor modificado, el contenido óptimo de humedad tiene una mayor correlación con el módulo resiliente. Entre las variables granulométricas,

Cuadro 2. Coeficientes de correlación Pearson entre variables

| Variable | Mr | σ_d | σ_c | θ | %Opt | Dmax | Pas N°200 | Pas N°4 | Pas 3/4" | D60 | CBR 95% |
|------------------------------|-------|------------|------------|----------|-------|-------|-----------|---------|----------|------|---------|
| Mr | 1,00 | | | | | | | | | | |
| σ_d | 0,79 | 1,00 | | | | | | | | | |
| σ_c | 0,87 | 0,60 | 1,00 | | | | | | | | |
| θ | 0,93 | 0,89 | 0,88 | 1,00 | | | | | | | |
| %Opt | -0,18 | 0,03 | 0,00 | 0,02 | 1,00 | | | | | | |
| Dmax | 0,15 | -0,05 | 0,00 | -0,04 | -0,91 | 1,00 | | | | | |
| Pas N°200 | -0,19 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,37 | -0,29 | 1,00 | | | | |
| Pas N°4 | -0,13 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,37 | -0,25 | 0,88 | 1,00 | | | |
| Pas 3/4" | -0,13 | 0,05 | 0,01 | 0,04 | 0,33 | -0,26 | 0,72 | 0,86 | 1,00 | | |
| D60 | 0,09 | -0,03 | 0,00 | -0,02 | -0,34 | 0,25 | -0,73 | -0,90 | -0,81 | 1,00 | |
| CBR 95% | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,01 | -0,08 | -0,59 | -0,72 | -0,46 | 0,74 | 1,00 |

el porcentaje pasando el tamiz N°200 es el que tiene mayor coeficiente de correlación. El índice de soporte California tiene un bajo coeficiente de correlación con el módulo resiliente.

Del análisis realizado se seleccionaron para generar el modelo de regresión las variables independientes: invariante de esfuerzos, contenido óptimo de humedad y porcentaje pasando el tamiz N°200. Con esta selección, se elimina la multicolinealidad entre las variables explicativas.

Generación de Modelo

Con las variables independientes escogidas y bajo el cumplimiento de los supuestos, se realiza el modelo de regresión lineal múltiple con el método de mínimos cuadrados ordinarios. En el Cuadro 3 se presenta un resumen con los resultados obtenidos del análisis de regresión lineal múltiple realizado con el software Microsoft Excel.

Cuadro 3. Resumen de resultados de regresión lineal múltiple

| Variable | Coefficientes | Error estándar (S.E.) | t student | P value (normal) | P value (t student) |
|-------------------------------|---------------|-------------------------------|------------|----------------------|-------------------------------|
| Intercepto | 3,98927 | 0,04172 | 95,62702 | 0,00E+00 | 7,989E-248 |
| Log θ | 0,67350 | 0,01168 | 57,64553 | 0,00E+00 | 1,432E-177 |
| Log %Opt | -0,20049 | 0,02968 | -6,75529 | 1,43E-11 | 6,194E-11 |
| Log Pas N°200 | -0,25639 | 0,02458 | -10,43108 | 0,00E+00 | 2,760E-22 |
| $F_{\text{crítico } 1\alpha}$ | 5,5318E-179 | $t_{\text{crítico } 2\alpha}$ | 1,960 | | |
| SSR | SSE | SST | F | R² | R² ajustado |
| 17.92171 | 1,73011 | 19,65182 | 1173,98626 | 0,91196 | 0,91118 |

Análisis de Residuales

Se verificaron los supuestos que especifican el comportamiento de los residuos (diferencia entre los valores observados y los predichos): no correlación, normalidad y varianza constante para todas las observaciones (homocedasticidad). En la Figura 3, se muestra el gráfico de residuos vs los valores ajustados, se puede apreciar que inicialmente se cumple el supuesto de homocedasticidad ya que los residuos se ubican de forma aleatoria a ambos lados del cero, con patrones no detectables en los puntos. A su vez, en la Figura 4 se observa la variación de los residuos con el orden de los datos, se puede ver que no hay tendencias o patrones cuando se muestran en orden cronológico los residuales, esto indica que se cumple con el supuesto de independencia entre residuos (Montgomery & Runger, 2003).

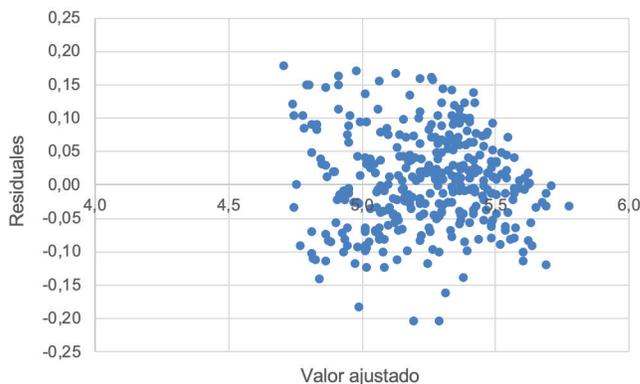


Figura 3. Residuales con respecto a los valores ajustados

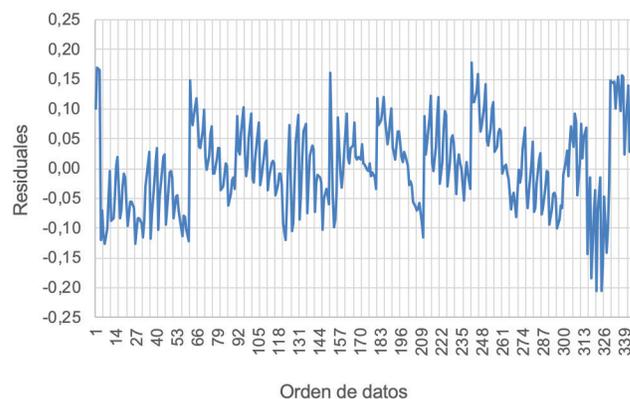


Figura 4. Residuales con respecto al orden de datos

Para verificar que los residuos están distribuidos normalmente, se elaboró un histograma de frecuencias y un gráfico de normalidad. En la Figura 5 se observa que los residuales tienden a seguir una distribución normal por la forma simétrica de campana de Gauss, que muestra la distribución de frecuencias. Sin embargo, en la Figura 6 se advierte que los residuos no están distribuidos normalmente puesto que no todos los puntos caen sobre la línea recta, el gráfico tiene forma de S que implica una distribución colas, esto puede indicar que existen pocas o demasiadas observaciones en las colas de la distribución.

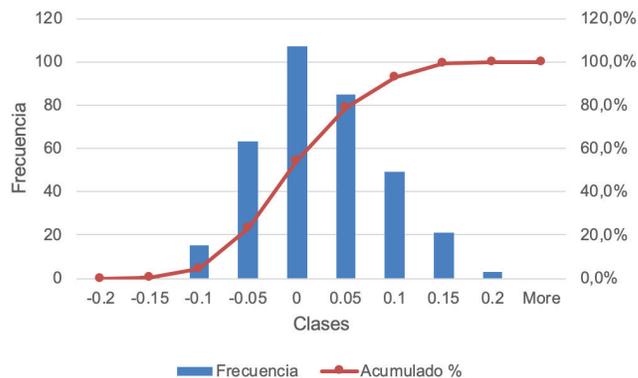


Figura 5. Histograma de frecuencia de los residuales

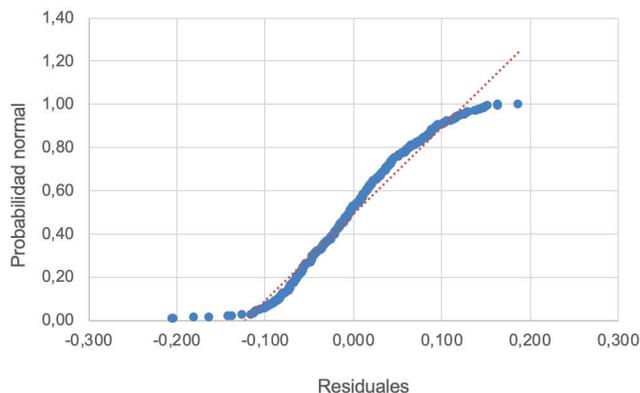


Figura 6. Gráfico de probabilidad normal de los residuos

La no normalidad de los residuos no implica que los estimadores MCO no sean insesgados (consistentes) y de varianza mínima (eficientes) (Gujarati & Porter, 2009). Con respecto a la inferencia, los estadísticos t y F tienen distribuciones que son aproximadamente distribuciones t y F, cuando las muestras son de tamaño grandes ($n - k > 30$) (Benavente, Otero, & Vásquez, 2007); es decir, que si se cumple con esta condición, la inferencia estadística sigue siendo confiable, a pesar del no cumplimiento de la normalidad de los residuos

Análisis de Estimadores

El intercepto tiene un coeficiente de regresión mayor que el de las variables explicativas, esto implica que una porción importante del modelo está siendo explicado por intercepto. Esto podría indicar que el modelo se podría mejorar incorporando otras variables explicativas. El invariante de esfuerzos tiene un coeficiente positivo, lo cual es esperable, ya que conforme aumenta el invariante de esfuerzos aumenta el módulo resiliente. El coeficiente del contenido óptimo de humedad tiene signo negativo. Esto también es razonable, ya que se espera que el módulo resiliente disminuya conforme mayor sea el contenido de humedad óptimo del material. De igual manera, el coeficiente del porcentaje pasando el tamiz N°200 tiene signo negativo, este comportamiento es aceptable, ya que se espera que un material con mayor porcentaje pasando el tamiz N°200 tenga un menor módulo resiliente.

Los valores de t-student calculados para cada estimador, son mayores al valor crítico de 1,96 para un nivel de confianza del 95%, esto quiere decir, que se rechaza la hipótesis nula H_0 de que alguno de los estimadores sea igual a cero. De igual forma, los p-value menores al nivel de significancia $\alpha = 0,05$ indican que estadísticamente ninguno de los estimadores considerados en el modelo sea igual a cero. El valor de F calculado es mayor que el crítico, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula H_0 de que todas las pendientes del modelo son iguales a cero.

Análisis de Bondad de Ajuste

La suma de cuadrados de la regresión (SSR) es mayor a la suma de cuadrados de errores (SSE), esto implica que la varianza de la variable dependiente se explica en su mayor parte por las desviaciones de las variables independientes y no por las desviaciones de los residuos. Este comportamiento es el deseado, y es por esto, que el coeficiente de determinación R^2 es cercano a 1. El R^2 ajustado brinda un valor más confiable de la bondad de ajuste del modelo ya que el R^2 tiende a sobreestimar el poder predictivo del modelo, aunque las variables no sean significativas.

En la Figura 7 se presenta un gráfico donde se comparan los módulos resilientes estimados vs los medidos, si los puntos pasan por la línea a 45°, implica que el modelo propuesto es efectivo prediciendo la variable dependiente y no presenta un sesgo; el modelo propuesto se ajusta satisfactoriamente a los datos medidos, no así la correlación de la Ecuación 5 comúnmente utilizada para estimar el módulo resiliente (Heukelom & Klomp, 1962), que presenta un sesgo importante y tiende a sobreestimar su valor.

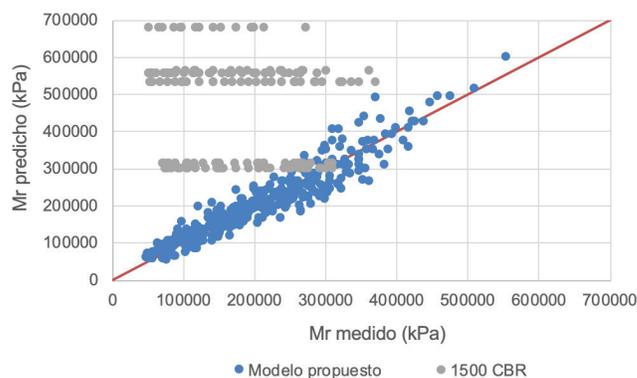


Figura 7. Módulo resiliente estimado vs el medido

Corrección por Heterocedasticidad

Suponiendo que no se cumpliera el supuesto de homocedasticidad (varianza constante de los residuos), se realizó una corrección de heterocedasticidad de White de los errores estándar para las inferencias estadísticas fueran asintóticamente válidas (es decir, para muestras grandes), sobre los verdaderos valores de los parámetros (Gujarati & Porter, 2009). En el Cuadro 4 se resumen los resultados.

Cuadro 4. Resumen de resultados de regresión lineal múltiple con corrección de White

| Variable | Coefficientes | Error estándar (S,E) | t student | P value (normal) | P value (t student) |
|---------------|---------------|----------------------|-----------|------------------|-------------------------|
| Intercepto | 3,98927 | 0,04210 | 94,76426 | 0,00E+00 | 1,558E-246 |
| Log θ | 0,67350 | 0,01273 | 52,91893 | 0,00E+00 | 3,344E-166 |
| Log %Opt | -0,20049 | 0,02552 | -7,85624 | 4,00E-15 | 5,251E-14 |
| Log Pas N°200 | -0,25639 | 0,02196 | -11,67264 | 0,00E+00 | 1,057E-26 |
| | SSR | SSE | SST | R ² | R ² ajustado |
| | 17,92171 | 1,73011 | 19,65182 | 0,91196 | 0,91118 |

Los valores t student calculados son menores al t crítico igual a 1,960 para un nivel de confianza del 95%, por lo tanto, hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que uno de los estimadores β sea igual cero. Los t student calculados del Cuadro 3 comparados con los del Cuadro 4 (sin corrección de White), no son apreciablemente diferentes, por lo tanto, el supuesto de homocedasticidad se puede con-firmar nuevamente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los datos analizados y de la validación del modelo de regresión propuesto para el módulo resiliente se obtuvo que:

- Para la base de datos y las variables consideradas inicialmente en el estudio, se determinó que las variables más significativas estadísticamente y que mejor describen el modelo de módulo resiliente son: el invariante de esfuerzos (θ), el contenido óptimo de humedad (%Opt) y el porcentaje pasando el tamiz N°200 (PasN°200).
- Se verificaron los supuestos y cumplimientos para la regresión por mínimos cuadrados ordinarios, excepto la normalidad de los residuos, sin embargo, esto no afecta la consistencia y eficiencia, ni tampoco la inferencia del estimador al tener una muestra grande. Este efecto sobre la normalidad de los residuos se puede mitigar aumentando el tamaño de la muestra.
- El modelo final propuesto se muestra en la Ecuación 8.

$$Mr = 9755,95975 \cdot \theta^{0,67350} \cdot \%Opt^{-0,20049} \cdot PasN^{\circ}200^{-0,25639} \quad (8)$$

- El modelo que se propone posee una bondad de ajuste satisfactoria, y se puede verificar con base en la muestra analizada que la correlación $M_r = 1500 \times CBR$, presenta un sesgo importante y tiende a sobrestimar los valores de módulo resiliente y no toma en cuenta el comportamiento esfuerzo-dependiente del material.
- Se recomienda aumentar la base de datos con más materiales para ampliar el espectro de materiales que incluye el modelo y así mejorar su confiabilidad.
- Aunque no se incluyó en el análisis debido a que algunas muestras carecían del dato, sería importante evaluar variables como límites de consistencia, compresión inconfiada y parámetros de resistencia al corte, entre otras variables que puedan describir mejor el modelo.
- El módulo resiliente varía según el contenido de humedad, por lo tanto, se recomienda evaluar esta variable de tal manera que el modelo contemple cambios de humedad a los que podría estar expuesto el material durante su tiempo de servicio.

RECONOCIMIENTOS

Los ensayos y resultados de laboratorio fueron generados en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelo Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica.

REFERENCIAS

1. AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for design of pavement structures*. Washigton, D.C.: American Association of State Highway and transportation Officials.
2. AASHTO. (2019). *Determining the resilient modulus of soils and aggregate aaterials*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
3. Benavente, J., Otero, A., & Vásquez, J. (2007). *Econometría I*. Santiago: Universidad de Chile.
4. Gujarati, D., & Porter, D. (2009). *Econometría*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A de C.V.
5. Heukelom , W., & Klomp, J. (1962). Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. *Proceedings, (1st) International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, 667-685.
6. Holicky, M. (2013). *Introduction for probability and statistics for engineers*. Prague: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
7. Huang, Y. (2004). *Pavement analysis and design*. New Yersey: Pearson Education, Inc.
8. Jiménez, M. (2009). *Implementación del ensayo de módulo resiliente en bases granulares para pavimentos*. San José: LannammeUCR.
9. Montgomery, D., & Runger, G. (2003). *Applied statistics and probability for engineers*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
10. NCHRP. (2004). *Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design*. Washigton, D.C.: National Cooperative Highway Research Program.
11. Popov, E. (1990). *Engineering mechanics of solids*. New Yersey: Prentice-Hall, Inc.

Evaluación de la zona de influencia de la troncal de transporte público San José-Sabanilla-La Campiña

Mediante la metodología del desarrollo orientado al transporte público

*Assessment of the area of influence of San José-Sabanilla-La Campiña public transportation trunk corridor
Applying the transit oriented development methodology*

Daniela Segura-Segura

Ingeniera Civil, Costa Rica

danielasegurasegura09@gmail.com

Diana Jiménez-Romero

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte,

PITRA-LanammeUCR, Costa Rica

diana.jimenez@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 28 de enero 2020 / **Fecha de aprobación:** 17 de abril 2020

RESUMEN

La falta de ordenamiento territorial en la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica ha provocado que el crecimiento urbano se haya dado de forma dispersa y desordenada (Rodríguez, 2017). Además de esto, la ineficiencia del sistema de transporte público masivo ha causado una dependencia al vehículo privado, lo que genera grandes costos al país en términos económicos, sociales y ambientales (PEN, 2015). Por tanto, el principal desafío que tiene la GAM es planificar el uso del suelo, en conjunto con un sistema eficiente de transporte.

Las principales propuestas de desarrollo urbano van encaminadas en la planeación conjunta entre transporte y usos de suelo, así como favorecer los desplazamientos peatonales (Cardozo, Gutiérrez, & García, 2010). Una forma de evaluar si la ciudad está planificada en función de la movilidad es mediante la metodología Estándar DOT (Desarrollo Orientado al Transporte), la cual constituye una herramienta para evaluar si los planes y productos de desarrollo urbano se apegan a los principios de movilidad urbana (ITDP, 2017).

En este artículo se presentan los resultados de una investigación (Segura, 2019), en la que se aplicó la metodología Estándar DOT (ITDP, 2017) para evaluar el área de influencia de cinco paradas de autobús en un tramo de la troncal de transporte público masivo San José-Sabanilla-La Campiña, la cual forma parte del proyecto de modernización del transporte público masivo de la GAM. A partir de la puntuación obtenida, se determinó que la zona de estudio no fue planificada en función de la movilidad y se determinaron algunas intervenciones que la podrían mejorar significativamente.

Además, se presentan algunas recomendaciones que se deben implementar en la planificación del corredor, tales como densificar la zona, invertir en el espacio público y en usos de suelo mixto, para que, una vez implementado el proyecto de modernización del transporte público masivo de la GAM, los usuarios se vean incentivados a usar este sistema.

PALABRAS CLAVE: transporte público, sectorización, troncal, movilidad, planificación urbana

ABSTRACT

The lack of territorial planning in the Great Metropolitan Area (GMA) has led to urban growth so dispersed and disordered (Rodríguez, 2017). In addition to this, the inefficient public transport system has caused a dependency on the private vehicle, which generates large costs to the country in economic, social and environmental terms (PEN, 2015). Thus, the main challenge for GAM is to plan land use in conjunction with an efficient transport system.

The main proposals for urban development are aimed at joint planning between transport and land use, as well as favouring pedestrian movements (Cardozo, Gutiérrez, & García, 2010). One way of evaluating if the city is planned in terms of mobility is through the TOD (Transit Oriented Development) Standard methodology, which is a tool for assessing whether urban development plans and products adhere to the principles of urban mobility (ITDP, 2017).

This article presents the results of a research (Segura, 2019) in which the Standard TOD methodology was applied (ITDP, 2017) to evaluate the area of influence of five bus stops in a section of the San José-Sabanilla-La Campiña mass transit trunk, which is part of the GAM mass transit modernization project. Based on the score obtained, it was determined that the study area was not planned in terms of mobility and were identify some interventions that could significantly improve it.

In addition, some recommendations are presented that should be implemented in the planning of the corridor, such as densifying the area, investing in public space and mixed land uses, so that, once the GAM mass transit modernization project is implemented, users will be encouraged to use this system.

KEY WORDS: public transport, sectorization, trunk corridor mobility, urban planning

INTRODUCCIÓN

La movilidad en Costa Rica está caracterizada por el alto consumo de recursos, tal es el caso de los tiempos de viaje; lo anterior, dado que las alternativas de transporte público son débiles, hay una creciente flota vehicular y limitaciones en infraestructura. Por otra parte, la situación se agrava dado que las ciudades se expanden sin una adecuada planificación (PEN, 2018).

Con la expansión de las ciudades sin un control apropiado, se generan costos sociales, tales como la congestión, la degradación ambiental, la segregación espacial, entre otros. Una forma de minimizar esta problemática es a través del desarrollo de alta densidad, uso de suelo mixto, y un diseño peatonal urbano amigable, principalmente cerca de un corredor de transporte público masivo (Sung & Oh, 2011).

El autobús y el vehículo privado son los principales medios para trasladarse en la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica. Se requiere un sistema de transporte público masivo que sea eficiente, seguro e interconectado, para incentivar su uso frente al del vehículo privado y de esta forma, reducir los tiempos de viaje (PEN, 2018).

Se estima que, con el proyecto de modernización del transporte público masivo de la GAM: Decreto N° 28337-MOPT (MOPT, 1999), el cual está constituido por varias etapas, como son: la sectorización, las rutas intersectoriales, la troncalización, la integración de servicios y la priorización del transporte público, se va a reducir el tiempo de viaje de los buses, lo que generará beneficios para los usuarios.

La modernización del transporte público masivo debe ir acompañada de una adecuada planificación urbana, que permita densificar la ciudad, de modo que se realicen menos viajes y más cortos; además, se debe fomentar la movilidad integral sostenible, que considere como prioridad a los peatones y ciclistas (Segura, 2019).

Es importante que, en paralelo a la implementación del proyecto de modernización del transporte público masivo de la GAM, se evalúen las áreas de influencia de las paradas de autobús en los corredores viales, respecto a un sistema de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT), ya que como indica el Plan Nacional de Transporte de Costa Rica 2011-2035 (INECO, 2011) los municipios actualmente no orientan el desarrollo urbano en torno a la movilidad.

De acuerdo con lo anterior, el estudio de Segura (2019), evalúa mediante la metodología Estándar DOT, la zona de influencia de un tramo del corredor San José-Sabanilla-La Campiña, debido a que este corredor se encuentra entre las troncales involucradas en la primera parte del *Plan de Implementación de la Primera Etapa del Proyecto de Sectorización y Modernización del Transporte Público Masivo Modalidad Autobús del Área Metropolitana de San José (AMSJ)* (MOPT, 2018) y además, es uno de los corredores viales de mayor congestión vehicular en el cantón de Montes de Oca (ProDUS, 2005).

La metodología empleada fue desarrollada por el Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo (ITDP, por sus siglas en inglés). En esta metodología, llamada Estándar DOT, se consideran ocho principios: CAMINAR, PEDALEAR, CONECTAR, TRANSPORTAR, MEZCLAR, DENSIFICAR, COMPACTAR y CAMBIAR. La metodología se utiliza para evaluar proyectos que se consideren un pilar fundamental de la expansión urbana y que sean objeto de decisión de inversión pública, como es el caso del corredor en estudio. Con la aplicación de esta metodología, se busca aumentar la densidad poblacional y compactar la ciudad para generar menor cantidad de viajes y que sean más cortos, dando prioridad a los peatones y ciclistas.

En este artículo, se presenta la calificación, por área de influencia, de cinco paradas del corredor San José-Sabanilla-La Campiña, tramo donde se habilitará un carril exclusivo de buses. La evaluación está distribuida en 100 puntos porcentuales, a partir de 23 indicadores, algunos de los cuales fueron adaptados a la realidad de Costa Rica. El principal cambio fue que se propuso un indicador distinto para la medición del principio DENSIFICAR, que se ajustara al contexto nacional.

El objetivo de la investigación de Segura (2019) fue evaluar el área de influencia de las cinco paradas seleccionadas del corredor de transporte público masivo San José-Sabanilla-La Campiña para determinar, según la metodología Estándar DOT, el nivel de planificación urbana de la zona en relación con la movilidad.

En las siguientes secciones se presenta la metodología empleada en el estudio, así como un resumen de los resultados encontrados y las principales conclusiones y recomendaciones.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio se seleccionó el Estándar DOT del Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo (ITDP, por sus siglas en inglés), en su versión más reciente; se escogió esta metodología debido a que se adapta al contexto de la zona de estudio.

Es importante indicar que se modificó la calculadora DOT (herramienta facilitada por el ITDP para la evaluación), dado que el Estándar DOT se basa en 25 indicadores que evalúan los ocho principios de movilidad (CAMINAR, PEDALEAR, CONECTAR, TRANSPORTAR, MEZCLAR, DENSIFICAR, COMPACTAR y CAMBIAR), sin embargo, para el estudio se tuvieron que hacer algunas modificaciones que permitieran un mejor ajuste a la realidad nacional, por lo que finalmente se evaluaron 23 indicadores.

El principio DENSIFICAR se modificó por completo debido a que no se contaba con las condiciones requeridas en los indicadores originales del ITDP. Por tanto, se tomaron las Unidades Geoestadísticas Mínimas (UGM's) de la GAM obtenidas del último censo nacional 2011 con las cuales se determinó la densidad poblacional en cada una. Se calculó el percentil 85 y el percentil 50 con el fin de realizar un indicador que permitiera comparar cada área de influencia en un contexto nacional.

Para la aplicación de la metodología Estándar DOT se delimitó el área de estudio basado en información obtenida del *Plan de Implementación de la Primera Etapa del Proyecto de Sectorización y Modernización del Transporte Público Masivo Modalidad Autobús del Área Metropolitana de San José (AMSJ)* (MOPT,

2018), se escogió el tramo del corredor San José-Sabanilla-La Campiña, entre la Rotonda Betania hasta el Centro Universitario Miravalles (cerca de las Instalaciones Deportivas de la Universidad de Costa Rica), ya que corresponde al tramo donde se habilitará un carril exclusivo de buses.

El Estándar DOT (ITDP, 2017) propone evaluar el área de influencia de cada parada de transporte público mediante ocho principios de movilidad. La suma del cumplimiento de todos los indicadores da un total de 100 %, por lo que en el Cuadro 1 se muestra el porcentaje máximo que puede obtenerse en cada principio. El principio TRANSPORTAR no presenta porcentaje debido a que es un requisito, es decir, se debe tener carril exclusivo de transporte público para aplicar la metodología.

Cuadro 1. Porcentaje máximo de cada principio de movilidad DOT

| Principio | Porcentaje máximo |
|-------------|--------------------------|
| CAMINAR | 16% |
| PEDALEAR | 5% |
| CONECTAR | 16% |
| TRANSPORTAR | Es requisito obligatorio |
| MEZCLAR | 18% |
| DENSIFICAR | 15% |
| COMPACTAR | 14% |
| CAMBIAR | 16% |

Por su parte, en la Figura 1 se observa el diagrama resumen de los indicadores evaluados y de los ocho principios de movilidad del DOT.

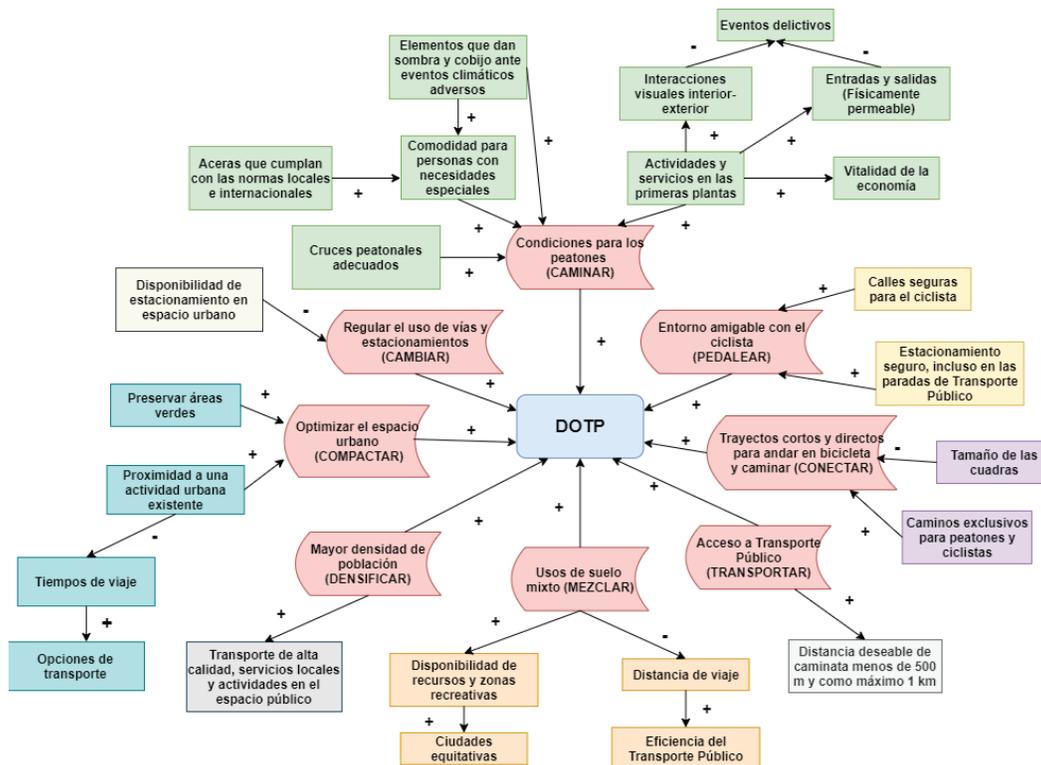


Figura 1. Diagrama resumen de los 23 indicadores y los ocho principios DOT
Nota: Tomada de Segura, 2019

Para definir el área de influencia de las paradas de transporte público en el tramo de estudio, se utilizó un sistema de información geográfico, mediante el método de análisis de redes (utilizando la herramienta *Network Analysis - Service Area*). El área caminable alrededor de cada parada se estableció en 500m, dado que, de acuerdo con la metodología Estándar DOT, es la distancia máxima que están dispuestos a caminar los usuarios. En la Figura 2 se observan las cinco áreas de influencia delimitadas para cada parada (Betania, La Paulina, UNED, Soda Chechi e Instalaciones Deportivas) en el tramo en estudio.

Para cada una de las cinco áreas de influencia definidas, se aplicó la metodología DOT, evaluando los 23 indicadores, de los ocho principios básicos de movilidad, y determinando el porcentaje de cumplimiento total. En cada una de las zonas se

evaluó la **zona adyacente** y la **zona aledaña**, la primera corresponde al tramo que forma parte de la vía principal, mientras que la segunda corresponde a las demás vías caminables que se ubican dentro del área de influencia.

La información de la zona de influencia de la troncal de transporte público masivo San José-Sabanilla-La Campiña, se obtuvo de la Municipalidad de Montes de Oca, de la Unidad Ejecutora del proyecto de modernización del transporte público masivo de la GAM, del Consejo de Transporte Público (CTP), del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC).

Adicionalmente, se realizó el trabajo de campo, recolectando información de las características de la zona, según el Estándar DOT. Así, por ejemplo, se cuantificaron los segmentos de vías

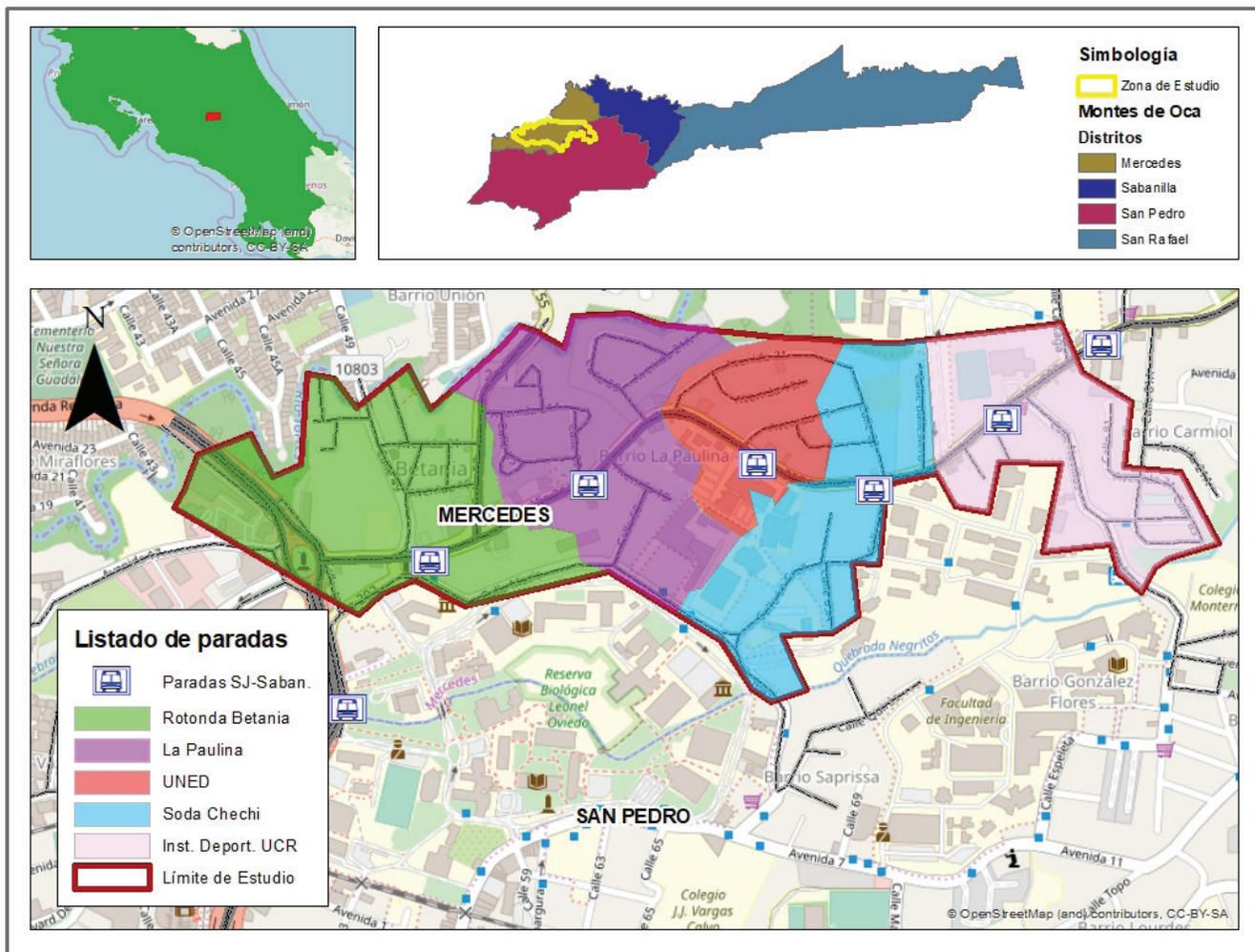


Figura 2. Área de estudio y ubicación

Nota: Tomada de Segura, 2019



Figura 4. Obstrucciones en las vías peatonales del área de influencia de la parada de autobús en las Instalaciones Deportivas
Nota: Fotografías tomadas de Segura, 2019

Por su parte, los principios PEDALEAR, CONECTAR y DENSIFICAR también presentaron una calificación muy baja; “no hay un entorno amigable para el ciclista, no hay trayectos cortos y directos para medios de transporte sostenible, y hay poca densidad poblacional” (Segura, 2019, p.156).

La falta de dispositivos adecuados para el estacionamiento de las bicicletas, la ausencia de reglamentación al respecto en el Plan Regulador y la poca priorización en las vías públicas, hicieron que el porcentaje de cumplimiento del principio PEDALEAR fuera casi nulo, exceptuando las zonas cercanas a centros universitarios que cuentan con ciclo parqueos.

Por otra parte, el enfoque de la planificación urbana hacia los vehículos privados, ha promovido la construcción de

carreteras, en vez de vías peatonales o ciclistas, lo que ha generado poca conectividad, por lo que el principio CONECTAR obtuvo baja calificación.

En lo que se refiere al principio DENSIFICAR, se definió como zona densa si la densidad del área de influencia de la parada es mayor al percentil 85 de la GAM que es de 304 hab/ha, se asigna como zona media densa si se encuentra entre la mediana que es 122 hab/ha y el percentil 85; y finalmente, si es inferior a la mediana se considera poco denso, este último se evidenció en todos los casos. En la Figura 5 se muestra un mapa en el cual persiste el tono verde, lo que significa que la zona de análisis es poco densa.

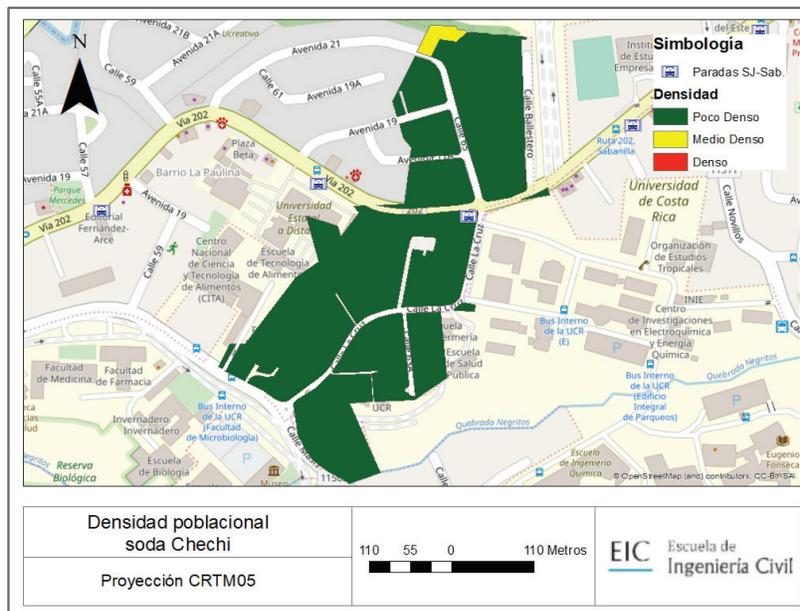


Figura 5. Mapa de densidad poblacional en el área de influencia de la parada soda Chechi
Nota: Tomada de Segura, 2019

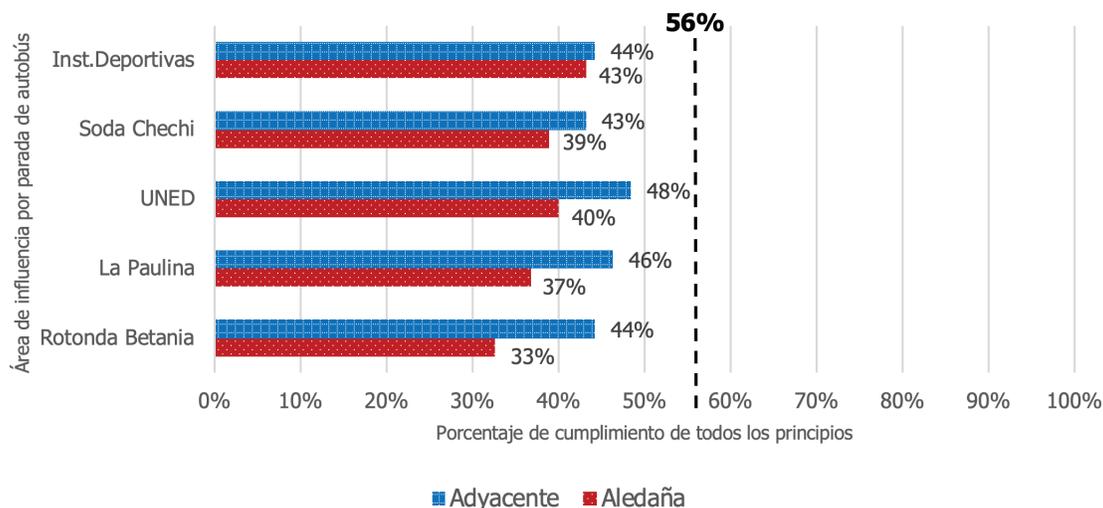


Figura 6. Comparación del promedio total entre áreas de influencia por parada
 Nota: Tomada de Segura, 2019

En la Figura 6 se muestra el valor del porcentaje total (considerando los ocho principios DOT) para cada una de las áreas de influencia de las cinco paradas estudiadas, tanto en el área adyacente al corredor como en la zona aledaña. Se observa que, en todos los casos, el puntaje total es menor a 50% y en general presentan un comportamiento similar; hay un mejor puntaje en la zona adyacente que en la aledaña.

De acuerdo con la metodología Estándar DOT, dado que el resultado de las cinco paradas evaluadas es menor a 56 puntos,

se considera que el corredor San José-Sabanilla-La Campiña, entre la Rotonda Betania hasta el Centro Universitario Miravalles, no se ha planificado en función a la movilidad.

En el Cuadro 2 se muestran los porcentajes obtenidos con base en el 100% de cada principio tanto en la zona adyacente como aledaña para las cinco paradas analizadas. En la última fila se tiene el puntaje total de cada parada, el mismo que se graficó en la Figura 6.

Cuadro 2. Porcentajes de cumplimiento en cada principio DOT

| Principios | Betania | | La Paulina | | UNED | | Soda Chechi | | Inst. Deportivas | |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------------|------------|
| | adyacente | aledaña | adyacente | aledaña | adyacente | aledaña | adyacente | aledaña | adyacente | aledaña |
| Caminar | 0% | 0% | 33% | 13% | 47% | 27% | 0% | 20% | 20% | 0% |
| Pedalear | 0% | 0% | 0% | 20% | 0% | 0% | 0% | 20% | 0% | 20% |
| Conectar | 0% | 0% | 0% | 27% | 0% | 7% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Mezclar | 94% | 47% | 82% | 53% | 94% | 47% | 94% | 47% | 82% | 88% |
| Densificar | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Compactar | 85% | 69% | 85% | 38% | 69% | 85% | 85% | 85% | 85% | 85% |
| Cambiar | 100% | 93% | 93% | 93% | 93% | 93% | 93% | 93% | 93% | 93% |
| PUNTAJE TOTAL | 44% | 33% | 46% | 37% | 48% | 40% | 43% | 39% | 44% | 43% |

Nota: Tomado de Segura, 2019

Se indican en rojo los resultados de la evaluación con una puntuación de cero, principalmente en los principios DENSIFICAR, CONECTAR, PEDALEAR Y CAMINAR. Los principios con mayor calificación obtenida, los cuales presentan puntajes superiores a 90 % (se señalan en verde) son CAMBIAR y MEZCLAR. Por otro lado, COMPACTAR presenta valores intermedios de calificación, tanto en el área adyacente como en el área aledaña de cada parada. De acuerdo con lo anterior, en general, se deben priorizar las intervenciones que mejoren la movilidad, enfocadas en los principios de DENSIFICAR, CONECTAR, PEDALEAR y CAMINAR.

La metodología permite identificar las necesidades particulares de cada zona; por ejemplo, según el Cuadro 2, para el caso de Soda Chechi, además de mejorarse los principios CAMINAR, PEDALEAR, CONECTAR y DENSIFICAR, debe mejorarse el principio MEZCLAR (este último sólo en la zona aledaña).

El Estándar DOT también permite hacer una evaluación previa del impacto en la movilidad que tendrán las intervenciones que se planifiquen en cierta zona. Así, por ejemplo, en la zona de influencia de la parada de Instalaciones Deportivas de la Universidad de Costa Rica (UCR), se determinó que al construir o restaurar las aceras, proporcionar iluminación adecuada para los peatones, cumplir con los pasos peatonales mínimos, exigir en el Plan Regulador estacionamientos adecuados para bicicletas en parqueos públicos y privados, fomentar planes de densificación como el uso de suelos mixtos e implementar dos pasos peatonales o ciclistas en la zona adyacente, se obtendría una calificación aceptable (mayor a 56%). Específicamente se pasaría de 44% a 71% en la zona adyacente y en la zona aledaña de 43% a 60%.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos de la evaluación mediante el Estándar DOT coinciden con las características observadas en sitio. Por tanto, se debe poner especial atención en mejorar las condiciones de accesibilidad de la zona, principalmente porque un acceso ágil al transporte público es un factor determinante para los usuarios en la elección de ese modo de transporte (Puebla, Pinto, & Cerdá, 2000). Según cita Talavera & Valenzuela (2012): “La accesibilidad peatonal es un factor clave cuyo análisis debe ser considerado en profundidad para lograr el éxito en la integración de cualquier modo de transporte público”.

En el estudio efectuado por la Contraloría General de la República (2019), en el cual analiza la integración en el servicio de transporte público, se evidencia el bajo nivel de integración física, debido a poca accesibilidad peatonal, lo cual coincide con nuestros resultados.

En futuras evaluaciones, se podría emplear alguna metodología específica para el análisis de la movilidad peatonal, como por ejemplo el método de caracterización peatonal de los entornos de movilidad (CPEM), mediante el cual se miden las características de los entornos de movilidad y su influencia sobre el desplazamiento peatonal (Talavera, Soria, & Valenzuela, 2014).

Otra forma de evaluar la accesibilidad peatonal, es mediante los índices de caminabilidad, para poder determinar la compatibilidad peatonal con el entorno (Schlossberg & Brown, 2004). El Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM), desarrolló (para uso de las Municipalidades), el Índice de Movilidad Activa. Uno de sus componentes es el índice de caminabilidad, este incluye la evaluación de anchos de acera, obstáculos para peatones, condiciones de rampas, iluminación, entre otros. Esta metodología permite hacer un diagnóstico de la condición de las aceras, con base en el cual se pueden priorizar intervenciones para mejorarlas (IFAM, 2019).

El grado de accesibilidad está determinado por la relación entre la infraestructura de transporte y el uso del suelo (Curtis & Scheurer, 2010). Una ciudad que se haya planificado bajo los principios del DOT, ofrece infraestructura de calidad para peatones y ciclistas, lo que conlleva a que el transporte sea más sostenible (Cervero & Dai, 2014), generando menos costos económicos, sociales y ambientales.

Kamruzzaman, Baker, Washington & Brisbane (2014) demostraron que las personas que viven en ciudades planificadas bajo los principios del DOT, con más probabilidad utilizan el transporte público y propician movilidad activa; por lo que se puede indicar que el DOT es un medio para generar transporte sostenible.

Ejemplo de lo anterior, lo constituye Ørestad, en Copenhague, esta área de la ciudad está diseñada para ser altamente accesible al transporte público y al uso de bicicletas, además, el estacionamiento es restringido. La zona posee fuentes de empleo, viviendas, comercio, instalaciones educativas y actividades de ocio, por lo tanto, los viajes son más cortos. La sostenibilidad del transporte en la zona se evidencia por el cambio modal del automóvil a los modos de transporte público masivo (Knowles, 2012).

Muchos países desarrollados como el anterior han optado por reclamar el espacio urbano lo que los ha convertido en ejemplos de desarrollo urbano sostenible. Como indica Pojani & Stead (2015) entre las estrategias claves que han impulsado están: calles con intervenciones de poco

costo como el mantenimiento de aceras y restricciones de velocidad vehicular; zonas exclusivas para peatones donde hay mucha afluencia; líneas exclusivas para buses y bicicletas; tarifas razonables de estacionamiento; mayor atención al mantenimiento de calles más que la construcción de nuevas vías; así como sensibilización y campañas de educación.

Sin embargo, para la adecuada aplicación del DOT se necesita voluntad de parte de los tomadores de decisión, quienes desarrollan las políticas públicas. Entre estas se deben incluir la diversificación del uso del suelo, mayor enfoque en la planificación del transporte público, aumento de restricciones vehiculares, viviendas más asequibles cerca de las paradas de autobús, mejorar la accesibilidad peatonal, entre otras. Como estas políticas tienden a generar oposición se debe tener una visión clara y entender los beneficios que conlleva el DOT (Mu & Jong, 2012).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de la puntuación obtenida al aplicar el Estándar DOT, se determinó que el tramo entre la Rotonda Betania hasta el Centro Universitario Miravalles no cumple con los principios del DOT. Por tanto, se puede indicar que la zona de estudio no fue planificada en función de la movilidad, lo cual coincide con las observaciones realizadas en el sitio.

Los principios de movilidad del DOT que obtuvieron calificaciones más bajas fueron PEDALEAR, CONECTAR y DENSIFICAR, lo que significa que no hay un entorno amigable para el ciclista por la falta de ciclovías y estacionamientos, no hay trayectos cortos y directos para medios de transporte sostenible, y hay poca densidad poblacional.

Otro de los principios que tuvo una baja calificación fue CAMINAR, principalmente porque las aceras no son accesibles para todos los usuarios; lo cual es crítico, dado que este principio constituye la base de la movilidad sostenible. Principalmente, las aceras presentan agrietamiento excesivo o son inexistentes, muchas no cumplen con el ancho mínimo establecido por normativa, no cuentan con iluminación adecuada para peatones, hay obstrucciones como árboles o postes, poca sombra e incluso edificaciones que afectan el derecho de vía peatonal; asimismo, hay un faltante significativo de pasos peatonales. Por su parte, para generar un entorno más amigable y con mayor percepción de seguridad se debe permitir mayor conexión con el interior de los edificios mediante ventanas, cortinas o materiales transparentes a una distancia aproximada de 2,5 m de altura desde el nivel de piso,

así como desarrollar tiendas, restaurantes, parques, plazas y *lobbies* de edificios en las primeras plantas que posibiliten que los peatones puedan ingresar.

Para lograr que la zona de estudio cumpla con la nota mínima establecida por el Estándar DOT se requiere, además, DENSIFICAR. Dependiendo de la estrategia de gestión que se impulse, esta medida también puede beneficiar el principio MEZCLAR, ya que para densificar se pueden construir edificios de uso mixto con área residencial en los pisos superiores y en la primera planta comercio y servicios.

Por otro lado, el principio CAMBIAR presentó el mejor puntaje en las cinco paradas, principalmente en los indicadores donde se mide el porcentaje de área dedicada a estacionamiento fuera de la vía pública, a la circulación de vehículos y estacionamiento dentro de la vía pública. Sin embargo, la evaluación no consideró la gran cantidad de vehículos estacionados en los costados de la vía, donde no está permitido; para futuras evaluaciones se recomienda penalizar este factor en la puntuación.

El uso del Estándar DOT permite identificar, para cada una de las zonas evaluadas, cuáles son los principios de movilidad que ofrecen mayor oportunidad de mejora, por lo tanto, se pueden priorizar las intervenciones y calcular el impacto que tendría cada una de las medidas que se piensen implementar. Tal y como indica Segura (2019), es importante identificar las áreas críticas y hacer un plan de mejora para cada una, que incluya los diseños de la infraestructura requerida, con su ubicación real.

Es necesario que el desarrollo urbano se planifique en función del transporte, lo que permite democratizar el espacio público, de forma que también se ofrezcan condiciones adecuadas para el desplazamiento de modos de transporte alternativos al vehículo privado, es decir, a peatones y ciclistas, dado que esto favorece el uso del transporte público y medios no motorizados, generando un transporte sostenible, con menos impactos en la sociedad y el ambiente.

El Desarrollo Orientado al Transporte requiere políticas públicas, para lograr una adecuada regulación de uso de suelo, viviendas asequibles cerca de las paradas de transporte público y una adecuada planificación del sistema de transporte. No obstante, es fundamental permitir la continuidad de estas, tanto a nivel país como de gobierno local, con el fin de promover la integración interinstitucional y que el país se dirija en una misma dirección a largo plazo, es decir que no dependa de las decisiones de cada gobernante.

Como se menciona anteriormente, la integración interinstitucional es fundamental para llevar a cabo proyectos de esta envergadura debido a que las troncales de transporte público involucran múltiples cantones. Esto conlleva a la necesidad del trabajo en conjunto entre municipalidades e instituciones gubernamentales como el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH), Casa Presidencial, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), el Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM), por mencionar algunas entidades. Estos esfuerzos se asemejan a los realizados actualmente en el desarrollo del proyecto del Tren Eléctrico el cual ha involucrado 15 municipalidades y una serie de instituciones que trabajan en la elaboración de un plan de gestión con el fin de generar una visión común de ciudad que trascienda el territorio (Gobierno de Costa Rica, 2019).

Se recomienda desarrollar, mediante un grupo multidisciplinario, un manual de diseño de calles completas, que se adapte a la realidad nacional y permita establecer los

parámetros de cómo diseñar espacio público. Además, que considere los ocho principios de la movilidad y permita que las vías se diseñen de acuerdo con las necesidades de todas las personas.

Para futuras evaluaciones se recomienda complementar la metodología DOT con otros métodos, tales como el de caracterización peatonal de los entornos de movilidad (CPEM) o el índice de caminabilidad; de modo que se evalúe el entorno en función del desplazamiento peatonal y se puedan priorizar las intervenciones que requiere una zona, para que permita mayor accesibilidad.

Finalmente, se recomienda que la metodología utilizada en este trabajo sea replicada en las otras troncales de transporte público masivo, para identificar oportunidades de mejora en las zonas de influencia de los corredores y poder priorizar las inversiones que integren el uso del suelo, el transporte y las personas, con el fin de realizar planes de gestión de gran impacto que favorezcan el uso del transporte público y con ello, beneficien a la sociedad.

REFERENCIAS

1. MOPT. (1999). *Decreto N° 28337-MOPT Reglamento sobre Políticas y Estrategias para la Modernización del Transporte Colectivo Remunerado de Personas Por Autobuses Urbanos para el Área Metropolitana de San José y zonas aledañas que la afecta directa o indirectamente*. Recuperado de: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=42773&nValor3=45090&strTipM=TC
2. Cardozo, O., Gutiérrez, J., & García, J. (2010). Influencia de la morfología urbana en la demanda de transporte público: Análisis mediante SIG y modelos de regresión múltiple. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 10, 82-102. Recuperado de http://geofocus.rediris.es/2010/Articulo4_2010.pdf
3. Cervero, R., & Dai, D. (2014). BRT TOD: Leveraging transit oriented development with bus rapid transit investments. *Transport Policy*, 36, 127–138. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X14001802>
4. Contraloría General de la República. (2019). Informe N.° DFOE-IFR-IF-00012-2019. Informe de auditoría operativa sobre la eficacia en la integración operacional y física de los servicios de transporte público y su contribución a la eficiencia del servicio. Recuperado de: https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs_cgr/2019/SIGYD_D_2019021438.pdf
5. Curtis, C., & Scheurer, J. (2010). Planning for sustainable accessibility: Developing tools to aid discussion and decision-making. *Progress in Planning*, 74, 53–106. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305900610000516>
6. Gobierno de Costa Rica. (2019). *15 MUNICIPALIDADES SE CONSTITUYEN EN TERRITORIO DEL TREN ELÉCTRICO*. Recuperado de <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2018/12/15-municipalidades-se-constituyen-en-territorio-del-tren-electrico/>
7. IFAM. (2 de diciembre 2019). Índice de Movilidad Activa. Presentado en el V Congreso Nacional de Movilidad Segura y Sostenible: cantones intermodales, cantones para la gente. [Arquivo de video]. Recuperado de <https://www.facebook.com/ifamcostarica/videos/1442834372540929/>
8. INECO. (2011). *Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035: Propuesta de Desarrollo Vial*. San José: PNT.
9. ITDP. (2017). *DOT Estándar versión 3.0*. México: ITDP.
10. Kamruzzaman, M., Baker, D., Washington, S., & Turrell, G. (2014). Advance transit oriented development typology: case study in Brisbane, Australia. *Journal of Transport Geography*, (34), 54-70. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/259519632_Advance_transit_oriented_development_typology_case_study_in_Brisbane_Australia

11. Knowles, R. D. (2012). Transit oriented development in Copenhagen, Denmark: from the finger plan to Ørestad. *Journal of transport geography*, 22, 251-261. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692312000130>
12. MOPT. (2018). *Plan de Implementación de la Primera Etapa del Proyecto de Sectorización y Modernización del Transporte Público Masivo Modalidad Autobús del AMSJ*. San José, Costa Rica: MOPT.
13. Mu, R., & Jong, M. (2012). Establishing the conditions for effective transit-oriented development in China: the case of Dalian. *Journal of Transport Geography*, 24, 234-249. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692312000592>
14. PEN. (2015). *Informe 2015*. Obtenido de Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Recuperado de <https://estadonacion.or.cr/informes/>
15. PEN. (2018). *Informe 2018*. Obtenido de Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Recuperado de <https://estadonacion.or.cr/informes/>
16. Pojani, D., & Stead, D. (2015). Sustainable Urban Transport in the Developing World: Beyond Megacities. *Sustainability*, 7(6), 7784-7805. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/6/7784>
17. ProDUS. (2005). *Plan Regulador Montes de Oca*. San José: Universidad de Costa Rica.
18. Puebla, J., Pinto, C., & Cerdá, G. (2000). Accesibilidad peatonal a la red de metro de Madrid: efectos del Plan de Ampliación 1995-99. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 20, 451-464. Recuperado de <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/download/AGUC0000110451A/31339/0>
19. Rodríguez, T. (2017). *¿Es posible una movilidad urbana sostenible?* San José: ECP-CIEP.
20. Schlossberg, M., & Brown, N. (2004). Comparing transit-oriented development sites by walkability indicators. *Transportation research record*, 1887 (1), 34-42. Recuperado de <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1887-05>
21. Segura, D. (2019). *Evaluación de la zona de influencia de la troncal de transporte público San José-Sabanilla-La Campiña mediante la metodología del Desarrollo Orientado al Transporte Público*. (Tesis de graduación de licenciatura inédita, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica).
22. Sung, H., & Oh, J. (2011). Transit-oriented development in a high-density city: Identifying its association with transit ridership in Seoul, Korea. *Cities*, 28(1), 70-82. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275110001332>
23. Talavera, R., & Valenzuela, L. (2012). La accesibilidad peatonal en la integración espacial de las paradas de transporte público. *Bitácora* 21, 2, 97-109. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/748/74826255014.pdf>
24. Talavera, R., Soria, J., & Valenzuela, L. (2014). La calidad peatonal como método para evaluar entornos de movilidad urbana. *Documents d'anàlisi geogràfica*, 60 (1), 161-187. Recuperado de <https://dag.revista.uab.es/article/viewFile/v60-n1-talavera-soria-valenzuela/pdf-es>

UCR
