



# Cálculo de las penalidades por giro en modelos de transporte acorde al tipo de vehículo. Caso de estudio: Manizales, Colombia

## Calculation of turn penalties in transport models according to type of vehicle. Case study: Manizales Colombia

CARDONA, Santiago [1](#); ESCOBAR Diego A. [2](#) y MONCADA, Carlos A. [3](#)

Recibido: 16/07/2019 • Aprobado: 30/10/2019 • Publicado 04/11/2019

### Contenido

- [1. Introducción](#)
- [2. Metodología](#)
- [3. Resultados](#)
- [4. Conclusiones](#)

[Referencias bibliográficas](#)

#### RESUMEN:

En esta investigación se calculan las penalidades por giro a izquierda y derecha para vehículos livianos y pesados, que son el tiempo extra que les toma para realizar una maniobra de giro en una intersección vial, dadas las condiciones de tráfico, regulación y conflictos con los actores viales. Para esto, se tomaron videos en intersecciones, registrando el tiempo de giro y realizando un análisis estadístico, para luego calcular la accesibilidad media global y gradiente de ahorro en los escenarios evaluados.

**Palabras clave:** Penalidades por giro, accesibilidad media global, tipo de vehículo, gradiente de ahorro

#### ABSTRACT:

This investigation calculates the turn penalties to left and right for light and heavy vehicles. Turn penalties are the extra time it takes a vehicle to perform a turn maneuver at a road intersection given the conditions of traffic, regulation and conflicts. For this, videos were taken at road intersections, recording the turnaround time and carrying out a statistical analysis, to then calculate the global mean accessibility and the saving gradient per turn penalties scenarios studied.

**Keywords:** Turn Penalties, Global Mean Accessibility, Type of vehicle, Saving Gradient

## 1. Introducción

Los modelos son simplificaciones de la realidad que buscan representar e interpretar de la mejor manera diferentes escenarios, donde se simplifica su complejidad y diversidad alcanzando niveles de comprensión adecuados para su análisis (Ortúzar & Willumsen, 1994). Los modelos se dividen en físicos y abstractos. En el primer caso se construye a escala la situación que se desea representar con el fin de someterla a condiciones similares a las que se someterá cuando está se ponga en funcionamiento, por ejemplo, en ingeniería se hacen representaciones a escala menor de las situaciones a evaluar en proyectos como presas, puentes, edificios, entre otros y se someten a diferentes condiciones que soportarán durante su etapa de construcción y funcionamiento tales como flujos de agua, vientos o terremotos (Pérez, 2013). Por otro lado, los modelos abstractos son representaciones teóricas del sistema de interés a través de ecuaciones matemáticas, entre

los que se cuentan los modelos de transportes. Los modelos de transporte permiten hacer un análisis de la infraestructura vial actual en su nivel de oferta y de demanda con el fin de prever inversiones futuras y políticas operativas eficientes (Owens, 1995; Patriksson, 1994; Wright & Ashford, 1989). En el caso de los modelos de transporte de demanda, a lo largo de los años se ha utilizado el clásico modelo de cuatro pasos, el cual busca determinar las preferencias de viaje de los habitantes de una ciudad y su modo de transporte habitual con el fin de predecir la ruta más adecuada a través de la red vial (Ortúzar & Willumsen, 1994; Woldeamanuel, 1975). Esto permite evaluar diferentes intervenciones de infraestructura vial y la implementación de nuevos sistemas de transporte, además de que se puede evaluar la situación futura en movilidad de una ciudad por medio de proyecciones de tránsito y paquetes de proyectos y estrategias de intervención, lo que permite tomar medidas preventivas ante situaciones de congestión insostenible o el crecimiento desmedido del parque automotor y demanda de viajes (Owens, 1995; Te Brömmelstroet & Bertolini, 2011). Por otro lado, la oferta de infraestructura vial, modos de transporte o equipamientos se miden a través de los modelos de oferta de transporte como la accesibilidad (Cardona, Escobar, y Moncada, 2018b). La accesibilidad busca medir la capacidad de interacción que posee una persona a través de la red de infraestructura vial y de los modos de transportes hacia los equipamientos disponibles, estos como representantes de la oferta (Añez, De La Barra, & Pérez, 1996; Geurs & Ritsema van Eck, 2001; Hansen, 1959).

Por otra parte, desde el surgimiento de los modelos de transporte, estos se han desarrollado desde su perspectiva empírica y matemática, con el fin de acercarlos más a la realidad que representan mediante la utilización de softwares de sistemas de información geográfica (GIS) para la construcción de la red vial, sistemas de posicionamiento global (GPS) para el cálculo de velocidades de operación de los modos de transporte estudiados y la utilización de penalidades por giro, las cuales penalizan con tiempo los giros a izquierda, derecha, en U y para continuar recto en intersecciones viales, buscando representar las demoras que se dan por congestión, semáforos o señales de PARE y Ceda el Paso (Escobar y Garcia, 2012; Winter, 2002). Está última variable, las penalidades por giro, es estudiada en esta investigación debido a que juegan un papel relevante en los modelos de transporte determinando la elección de ruta de un usuario debido a que la ruta con menos giros es percibida como la óptima, sin embargo, en múltiples casos se presentan prohibiciones de giro en diversas intersecciones viales lo que obliga a la utilización de una ruta más larga con el fin de salvar dicho obstáculo (Volker, 2008; Winter, 2002).

Las penalidades por giro han sido estudiadas desde la segunda mitad del siglo XX, cuando Caldwell (1961) definió los parámetros matemáticos para el análisis de redes de transporte permitiendo incluir las penalidades por giro en el algoritmo de caminos mínimos de Dijkstra (1959). Más adelante, diversos investigadores lograron optimizar los algoritmos para encontrar las rutas mínimas utilizando las penalidades por giro, incluyendo una forma más simple de representar las redes de transporte en los softwares de análisis (Geisberger & Vetter, 2011; Wu, Qin, & Li, 2015). Propiamente, las penalidades por giro han sido utilizadas en modelos de demanda de transporte y oferta del transporte aplicados en Canadá, donde el valor de las penalidades respondía a la experiencia empírica de los investigadores y se tomaba de manera global en toda la red vial debido a que incluirla de manera específica en cada intersección resulta un proceso extenso y que no le suma precisión al análisis (Thériault, Vandersmissen, Lee-Gosselin, & Leroux, 1999; Yiannakoulis, Bland, & Svenson, 2013).

En este artículo investigativo se presentan algunos de los resultados obtenidos a través de la tesis de maestría denominada "Propuesta metodológica para el cálculo de las penalidades por giro en modelos de accesibilidad" la cual fue financiada por la vicerrectoría de investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia y de la que se han presentado diferentes avances. En primer lugar, se describió la metodología utilizada y los resultados obtenidos para penalidades por giro globales a izquierda y derecha (Cardona, Escobar, y Moncada, 2018a) y en segundo lugar, se realizó una comparación entre dos modelos de accesibilidad media global donde se utilizaban las penalidades por giro calculadas mediante la metodología propuesta en la tesis contra las penalidades por giro que utilizadas en investigaciones previas, determinadas de manera subjetiva (Cardona et al., 2018b). En esta oportunidad, se busca obtener las penalidades por giro a izquierda y derecha según el modo de transporte estudiado (vehículos livianos y vehículos pesados), para luego analizar las diferencias que genera su uso en el cálculo de la accesibilidad media global a través del gradiente de ahorro. La accesibilidad media global es una medida de accesibilidad la cual calcula la relación en tiempo o distancia entre todos los nodos de la red vial, generando una evaluación de calidad de la red vial (Cardona, 2018; Talen & Anselin, 1998). Por otra parte, el gradiente de ahorro es un método que cuantifica las diferencias entre los vectores de tiempos medios de viaje calculados mediante la accesibilidad media global por lo que permitirá

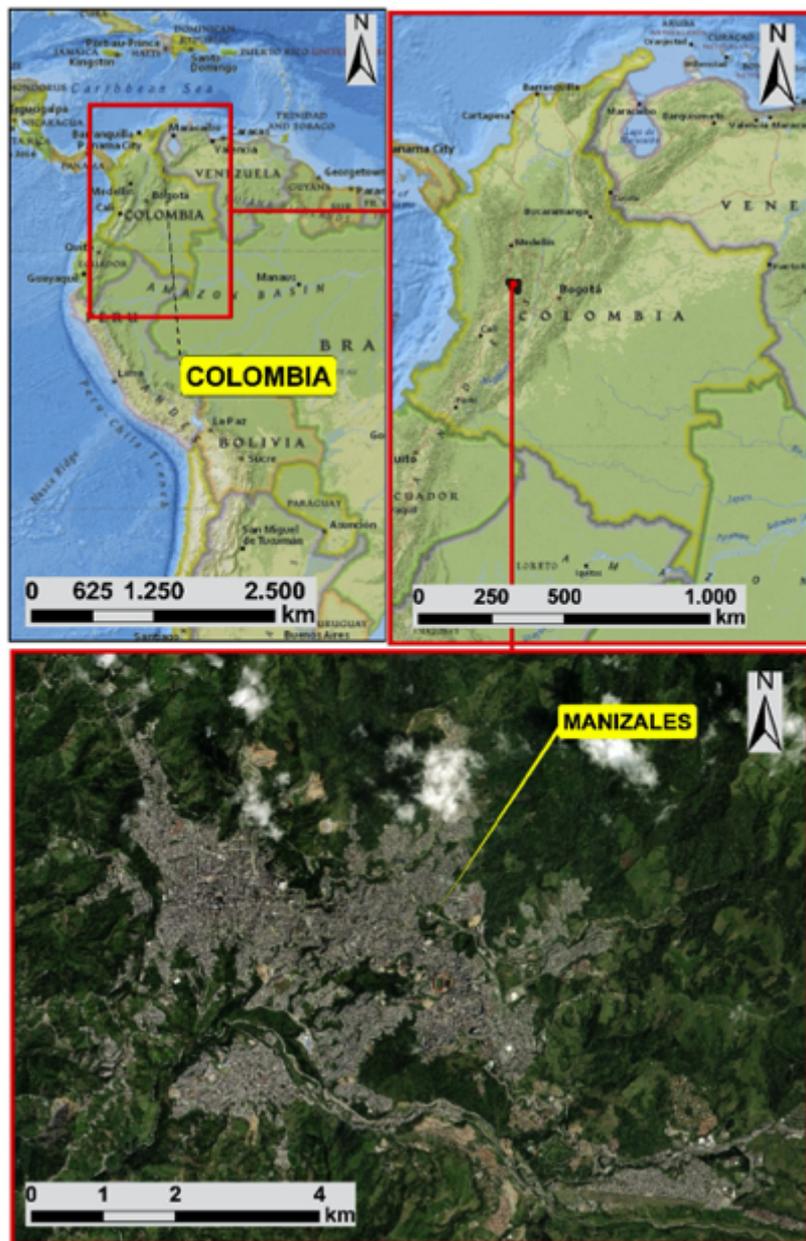
encontrar las diferencias generadas al utilizar las penalidades por giro según el tipo de vehículo. Asimismo, el gradiente de ahorro es una metodología utilizada para evaluar intervenciones en la red vial, tales como: nuevas obras de infraestructura vial (Moncada, Cardona, & Escobar, 2018), implementación de sistemas de transporte (Escobar, Tapasco, y Giraldo, 2015), redireccionamientos viales (Escobar, Duque, y Salas, 2015), entre otros.

La ciudad de estudio es Manizales (ver figura 1), capital del departamento de Caldas en Colombia ubicada en la zona centro occidente del país sobre la parte central de la cordillera de los Andes por lo que posee una topografía quebrada y abrupta donde se dificultan los procesos de expansión y urbanización de la ciudad. Por otro lado, en lo que respecta a movilidad urbana, según el informe de calidad de vida para el 2018 de la red de ciudades cómo vamos 2018, Manizales cuenta con una repartición de los modos de transporte donde el 49% de los habitantes usan el transporte público, representado en buses, busetas o colectivos, el 28% usan vehículo particular, donde el 15% usan motocicletas y el restante 13% carro particular. Teniendo en cuenta los modos de transporte no motorizados, la caminata representa el 14% de la repartición modal, lo que representa un descenso respecto a las mediciones anteriores y la bicicleta cuenta con un 3% de uso (Manizales cómo vamos, 2018). Esto es un indicativo de la variedad de modos de transporte utilizados en la ciudad, motivo por el cual se hace necesario el cálculo de las penalidades por giro según el tipo de vehículo permitiendo realizar modelos de transporte según el modo utilizado, cómo en el caso de transporte logístico dónde la mayor parte son camiones de gran envergadura y se tienen en cuenta las zonas industriales o transporte público cuando la mayor parte es ofertada por buses o colectivos.

Luego de la introducción se presentan los apartes más importantes de la metodología utilizada para la investigación, la cual ha sido publicada en artículos de investigación preliminares (Cardona, 2018) para luego enumerar los principales resultados y conclusiones.

**Figura 1**

Localización geográfica de la ciudad de estudio

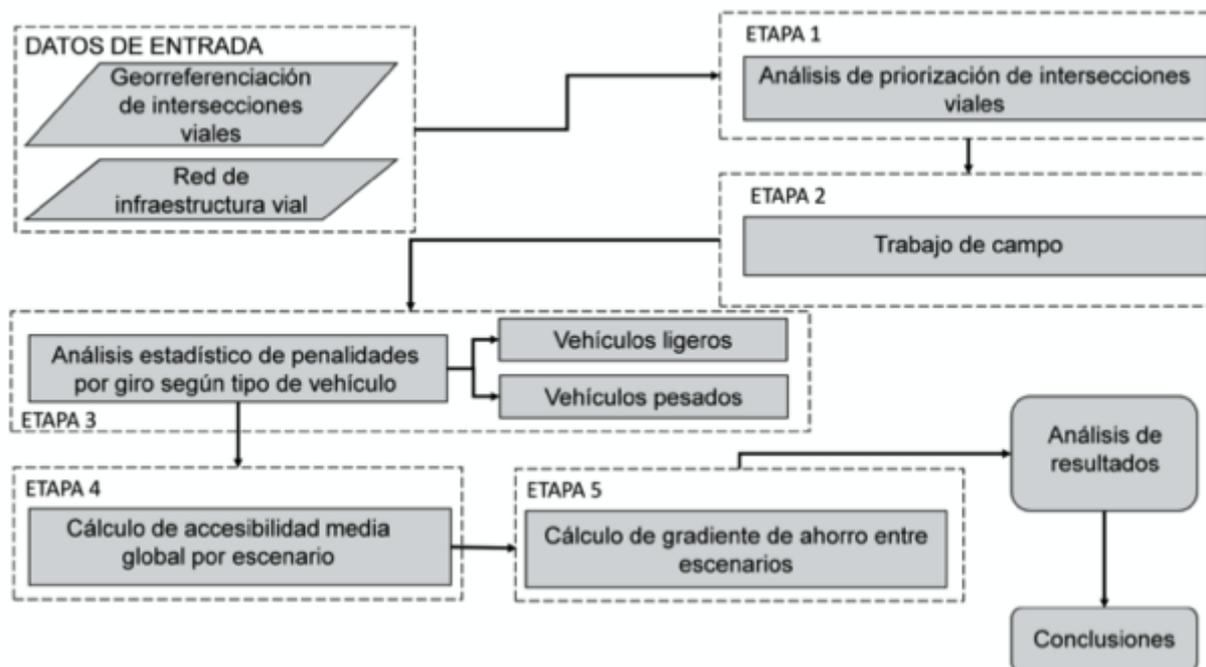


Fuente: Elaboración propia

## 2. Metodología

Para esta investigación se tomó como base la metodología y datos recolectados por Cardona (2018) en la cual se describe la propuesta metodológica para el cálculo de las penalidades por giro y la forma para encontrar las diferencias generadas en los modelos de accesibilidad media global. En este caso, se realizará el cálculo de las penalidades por giro globales a izquierda y derecha según el tipo de vehículo analizado a través de cinco etapas consecutivas, tomando como base los datos recolectados y se realizará el modelo de accesibilidad para cada uno relacionándolo a través del gradiente de ahorro.

**Figura 2**  
Metodología de investigación



Fuente. Elaboración propia con base en Cardona (2018)

## 2.1. Datos de entrada

En esta etapa, se realiza la georreferenciación de las intersecciones viales que serán objeto del análisis de priorización, el cual será realizado en la siguiente etapa, esto nos indica qué intersecciones viales son las adecuadas para realizar el trabajo de campo que consiste en tomar registro de video en cada una con el fin de su análisis posterior (Cardona, 2018). Por otro lado, se actualiza la red de infraestructura vial para la zona de estudio, incluyendo las últimas obras de infraestructura inauguradas y las diferentes modificaciones en direccionalidades realizadas (Cardona, 2018).

## 2.2. Etapa 1

Para el análisis de priorización de las intersecciones viales a estudiar se debe realizar la clasificación de cada una de ellas según las 5 variables definidas por Cardona (2018). Cabe destacar que para esta investigación se tienen en cuenta intersecciones viales a nivel debido a que los intercambiadores viales se construyen para eliminar la mayor cantidad de conflictos posibles por lo que disminuyen las maniobras de giro, las cuales son objeto de análisis en este artículo (Cardona, 2018).

La primera variable considerada es el tipo de canalización que posee la intersección vial: intersecciones viales simples, intersecciones viales canalizadas por señalización e intersecciones viales canalizadas mediante infraestructura. La segunda variable tiene en cuenta el tipo de regulación para el tráfico: intersecciones viales reguladas mediante semáforo e intersecciones viales reguladas mediante señal tipo PARE o CEDA el PASO. La tercera variable enumera los giros a izquierda o derecha que se podrían estudiar en cada intersección. La cuarta variable indica la ubicación de la intersección vial en el sistema de movilidad urbano de la ciudad, es decir, si se ubica sobre una vía arteria principal, secundaria, colectora o local. Por último, se tiene en cuenta los análisis de seguridad vial realizados en las intersecciones viales. Para finalizar el análisis de priorización cada variable tiene un peso por lo que las intersecciones viales que poseen mayor calificación son más propensas al estudio. En tesis de maestría de Cardona (2018) se puede revisar con mayor detalle el análisis de priorización, las variables utilizadas y su resultado.

## 2.3. Etapa 2

Luego de obtener las intersecciones viales producto del análisis de priorización, se procede a realizar el trabajo de campo el cual consiste en tomar registro de video, entre 45 y 60 minutos, tomando una perspectiva que permita observar en su totalidad la mayor cantidad de giros, es decir, que se logre apreciar el vehículo desde el inicio de la maniobra hasta que culmina. El registro de video se realizó con una cámara Canon T5 dispuesta en ángulo fijo (Cardona, 2018).

## 2.4. Etapa 3

En esta etapa se realiza el análisis de los videos registrados en campo donde se cuenta el tiempo que le toma a cada vehículo realizar la maniobra de giro a izquierda o derecha, según la intersección vial. Para este caso, se tendrá en cuenta el tipo de vehículo que realiza la maniobra de giro: vehículo liviano (carros particulares, taxis y motocicletas) y vehículo pesado (buses, busetas, camiones, entre otros). Por otro lado, las motocicletas son consideradas debido a la gran participación modal que poseen en la movilidad de la ciudad y por el gran crecimiento de su tasa de motorización en la última década (Manizales Cómo Vamos, 2018), además, por su tamaño pueden ser más versátiles que los vehículos livianos o pesados haciendo que su tiempo de giro sea menor. También, se calculan las penalidades por giro globales a izquierda y derecha para cada tipo de vehículo utilizando los datos registrados en la etapa previa. Este resultado se presenta como el tiempo que, en promedio, mediante análisis estadístico con tablas de frecuencia, le tomó a cada tipo de vehículo realizar la maniobra de giro a izquierda o derecha (Schwar y Huarte, 1975).

## 2.5. Etapa 4

En esta etapa de la investigación, se procede a realizar el modelo de accesibilidad media global, mediante los insumos recolectados en etapas previas. Los dos escenarios analizados tendrán como base la red de infraestructura vial actualizada para la zona de estudio junto a velocidades tomadas mediante GPS registradas en investigaciones anteriores (Escobar y Garcia, 2012) y las penalidades por giro calculadas en la etapa anterior, siendo el escenario uno el calculado con penalidades por giro para vehículos ligeros y el escenario dos el calculado con penalidades por giro para vehículos pesados.

La accesibilidad media global, se calcula a través del vector de tiempos medios de viaje ( $Tv$ ) el cual se obtiene de la matriz de tiempos de viaje ( $Mtv$ ) la cual minimiza los tiempos de viaje entre todos los nodos de la red de infraestructura vial a través del algoritmo de caminos mínimos, que incluye las penalidades por giro globales como factor (Caldwell, 1961; Dijkstra, 1959; Yiannakoulías et al., 2013). La accesibilidad media global puede tomar tres enfoques: origen, destino y total. El primero considera los nodos ( $n$ ) de la red de infraestructura vial como origen ( $i$ ) de los viajes (ecuación 1), mientras el segundo los considera como el destino ( $j$ ) de los mismos (ecuación 2) (Cardona, 2018). Por otra parte, el tercer enfoque considera un promedio entre los dos anteriores (ecuación 3), generando un análisis de la calidad de la oferta de la red de infraestructura vial. Para este artículo se utilizará el enfoque tres para ambos escenarios.

### Ecuación 1

Vector de tiempo promedio de viaje, presunción origen

$$\overline{Tv_i} = \frac{\sum_{j=1}^n tv_{ij}}{n - 1}$$

Fuente: Elaboración propia

-----

### Ecuación 2

Vector de tiempo promedio de viaje, presunción destino

$$\overline{Tv_j} = \frac{\sum_{i=1}^n tv_{ji}}{n - 1}$$

Fuente: Elaboración propia

-----

### Ecuación 3

Vector de tiempo promedio de viaje, presunción total

$$\overline{Tv_t} = \frac{Tv_i + Tv_j}{2}$$

Fuente: Elaboración propia.

## 2.6. Etapa 5

El gradiente de ahorro es una relación entre los vectores de tiempos medios de viaje para los dos escenarios estudiados que permite encontrar el porcentaje que los diferencia (ecuación 4) (Cardona, 2018).

**Ecuación 4**  
Gradiente de ahorro

$$SG(\%) = \frac{\overline{Tvb} - \overline{Tva}}{\overline{Tvb}} * 100$$

Fuente: Elaboración propia.

## 3. Resultados

### 3.1. Penalidades por giro, según el tipo de vehículo

En la figura 3 se pueden observar las intersecciones viales resultado del análisis de priorización realizado por Cardona (2018). Allí se ubican 20 intersecciones viales de las cuales 10 son reguladas por semáforo, al igual que las reguladas por señal tipo PARE o Ceda el Paso. Asimismo, el 45% de las intersecciones viales se ubican en vías arterias principales donde se tiene un flujo de vehículos mayor. En Cardona (2018) se puede apreciar con más detalle el resultado del análisis de priorización junto las penalidades por giro obtenidas para cada intersección vial y las penalidades por giro globales y según el tipo de regulación de tráfico.

Por otro lado, en la tabla 1 se aprecia el resultado del análisis estadístico de tiempo de giro a izquierda y derecha para los vehículos livianos (escenario 1) según los datos recolectados en las veinte intersecciones viales. Para el giro a la derecha se obtuvo un tiempo de giro promedio de 32,45 segundos, mientras que para el giro a la izquierda fue de 39,46 segundos lo que nos indica que el tiempo de giro a la izquierda es 21% mayor respecto al tiempo de giro a la derecha para vehículos livianos.

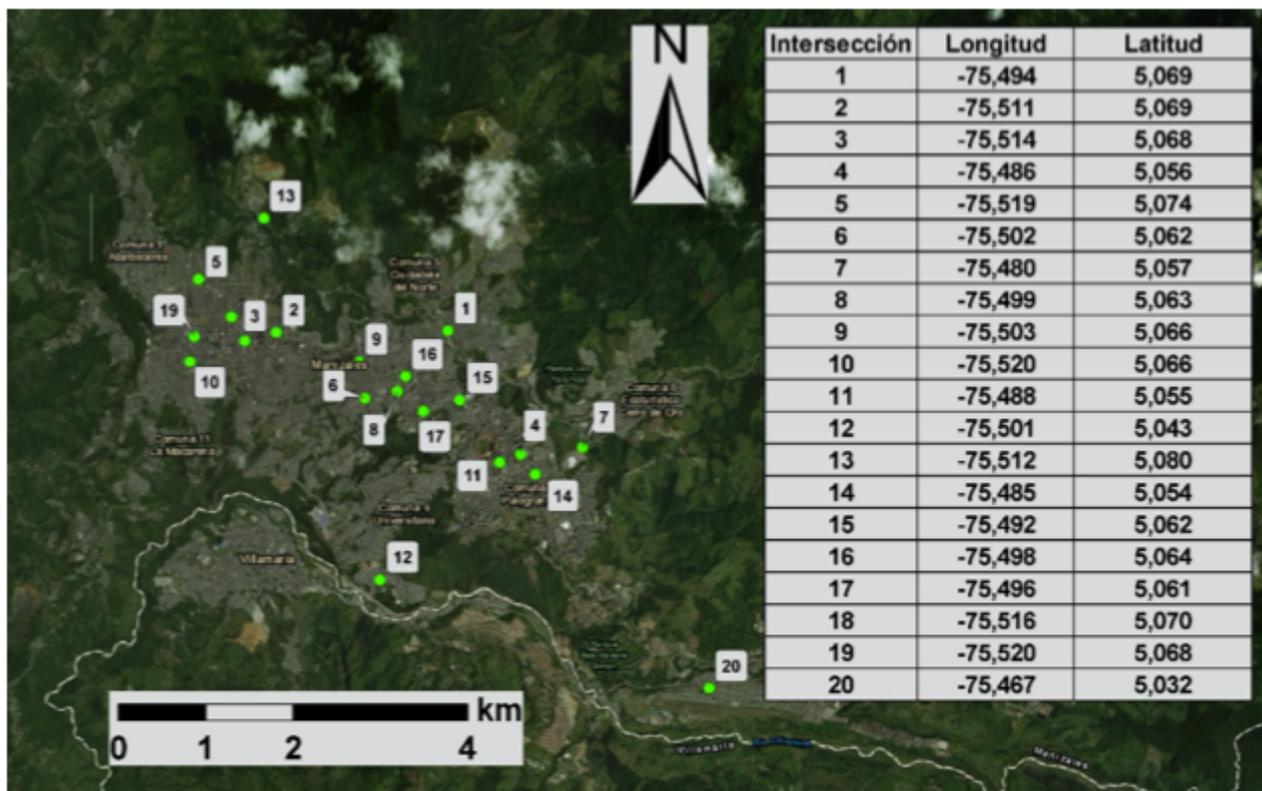
**Tabla 1**  
Penalidades por giro  
para vehículos ligeros.

Vehículos ligeros			
Giro	Número de datos analizados	Tiempo (segundos)	Desviación estándar
Derecha	1362	28,73	5,34
Izquierda	2306	35,95	5,84

Fuente: Elaboración propia

-----

**Figura 3**  
Georreferenciación de intersecciones  
viales analizadas



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2 podemos observar el análisis estadístico de tiempo de giro a izquierda y derecha para los vehículos pesados (escenario 2). En primer lugar, cabe destacar que el número de datos registrados para vehículos pesados es inferior respecto al número de datos registrados para los vehículos livianos. Esto es congruente con lo reportado en el Plan Maestro de Movilidad de Manizales de 2017 donde el 49,8% del volumen vehicular son vehículos livianos, mientras que el 10,8% del volumen equivale a vehículos pesados, entre los que se cuentan buses, busetas, colectivos y camiones de todo tipo. Por otro lado, el tiempo de giro a la derecha alcanzó 39,9 segundos y el tiempo de giro a la izquierda 35,31 segundos (Alcaldía de Manizales, 2017). Este caso es particular debido a que el giro a la derecha resulta con un tiempo mayor en 11,5% respecto al giro a la izquierda presumiblemente porque el giro a la derecha posee ángulos más cerrados de maniobra y estos vehículos poseen dimensiones mayores a los vehículos livianos. Además, cuantitativamente sus tiempos de giro, tanto a izquierda como a derecha, son mayores a los registrados para los vehículos livianos.

**Tabla 2**  
Penalizaciones por giro  
para vehículos pesados.

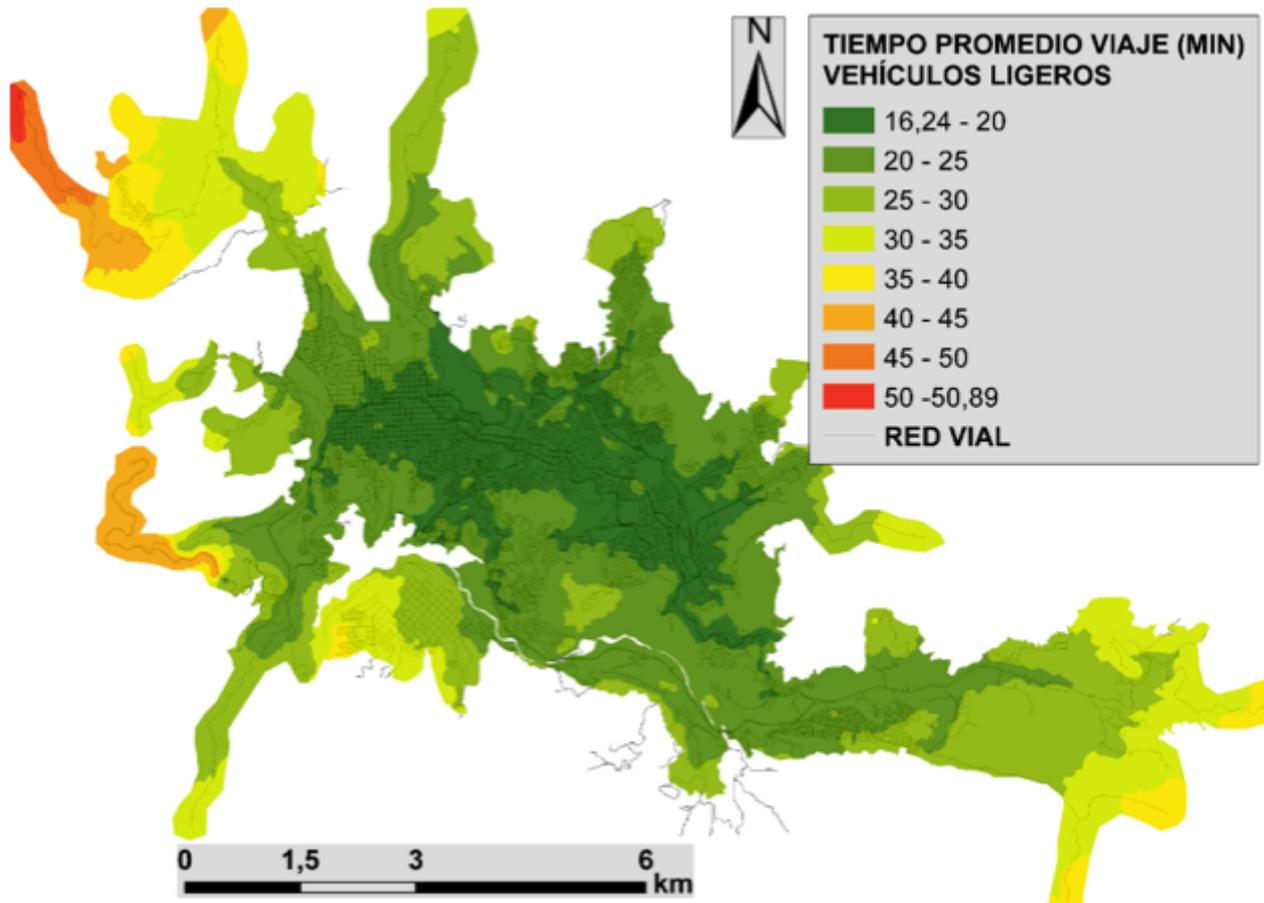
Vehículos pesados			
Giro	Número de datos analizados	Tiempo (segundos)	Desviación estándar
Derecha	171	39,9	9,19
Izquierda	254	35,31	11,01

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Accesibilidad media global

Para el primer escenario calculado, se presentan las curvas isócronas de accesibilidad media global en la figura 4, donde se tienen tiempos promedio de viaje entre 16,24 minutos y 50,89 minutos. Por otro lado, las curvas isócronas de accesibilidad media global para el escenario 2 se observa en la figura 5 donde se obtuvieron tiempos promedio de viaje entre 17,17 minutos y 53,14 minutos.

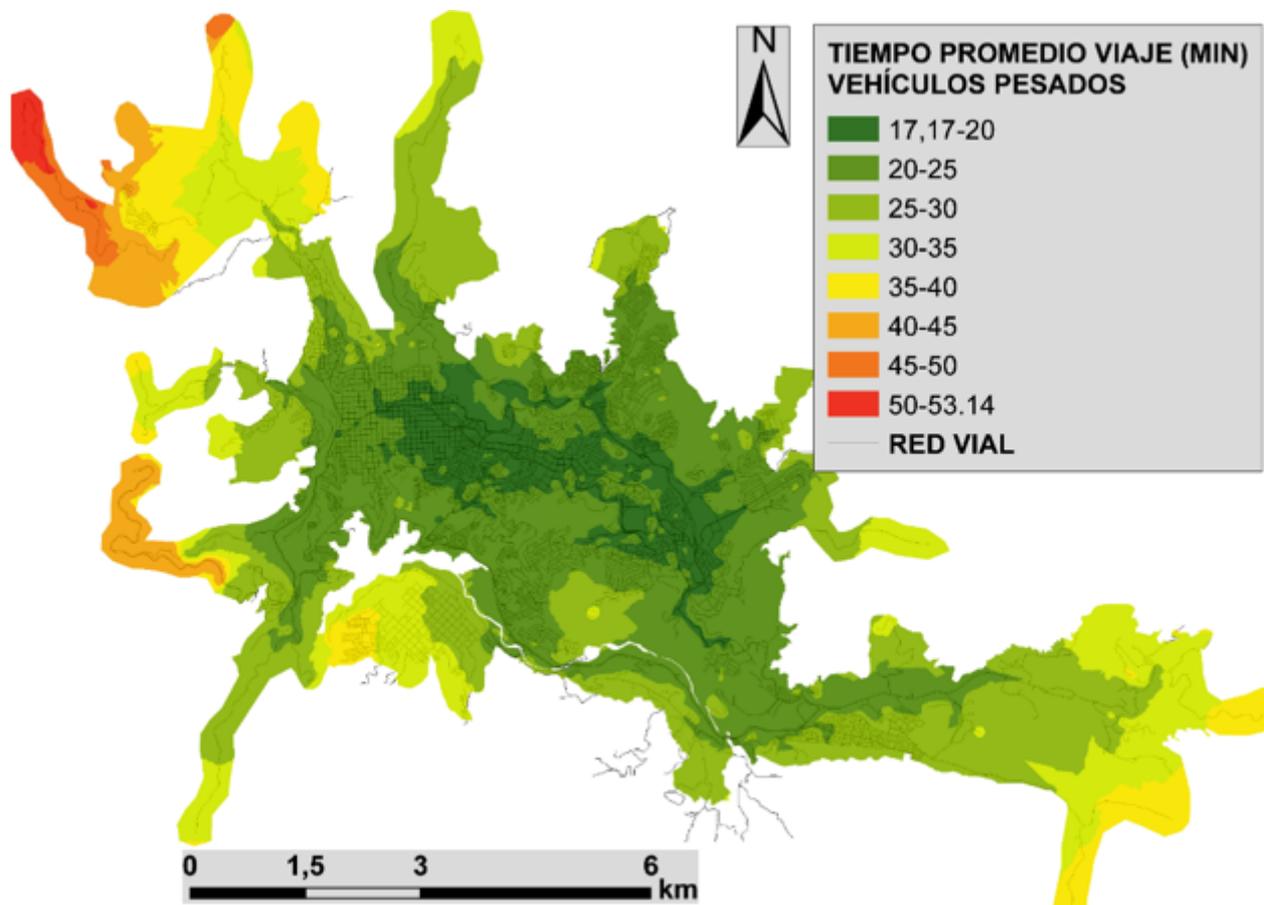
**Figura 4**  
Accesibilidad media  
global, escenario 1.



Fuente: Elaboración propia.

Se observa un aumento significativo para el tiempo promedio de viaje máximo en el escenario 2 respecto al escenario 1, producto de las diferencias en las penalidades por giro. Asimismo, en la figura 6 se presentan las ojivas de cobertura que relacionan el porcentaje de población con las curvas isócronas de accesibilidad para cada escenario estudiado. En este caso, se aprecia cómo para tiempos promedio de viajes menores a 20 minutos, la cobertura de población para el escenario 1 es mayor, con 35,6% respecto al 19,25% para el escenario 2. Asimismo, para tiempos promedio de viaje menores a 25 minutos, se sigue apreciando que para el escenario 1 la cobertura es mayor, alcanzando 83,3% respecto al 75,33% que alcanza el escenario 2. La tendencia es similar durante toda la curva de cobertura, siendo más alto el porcentaje de población en tiempos promedio menores para el escenario 1 que el escenario 2.

**Figura 5**  
Accesibilidad media  
global, escenario 2

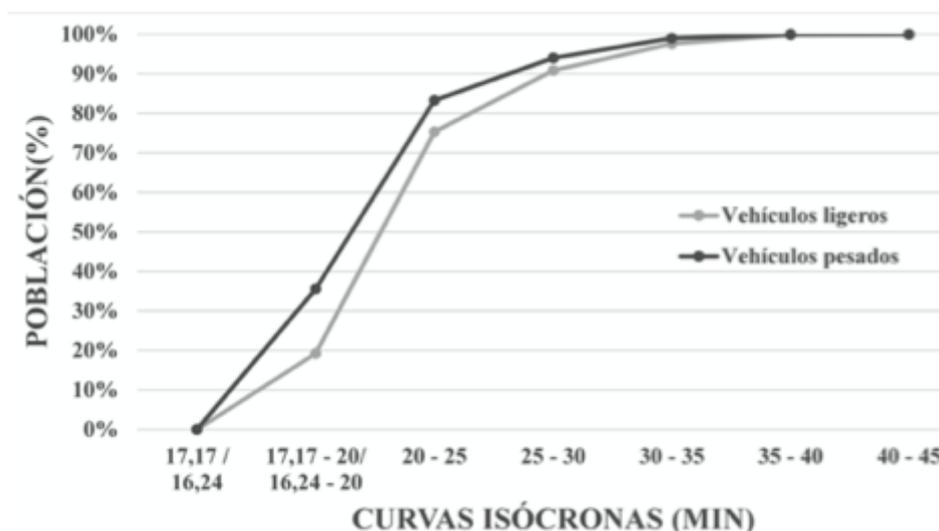


Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Gradiente de ahorro

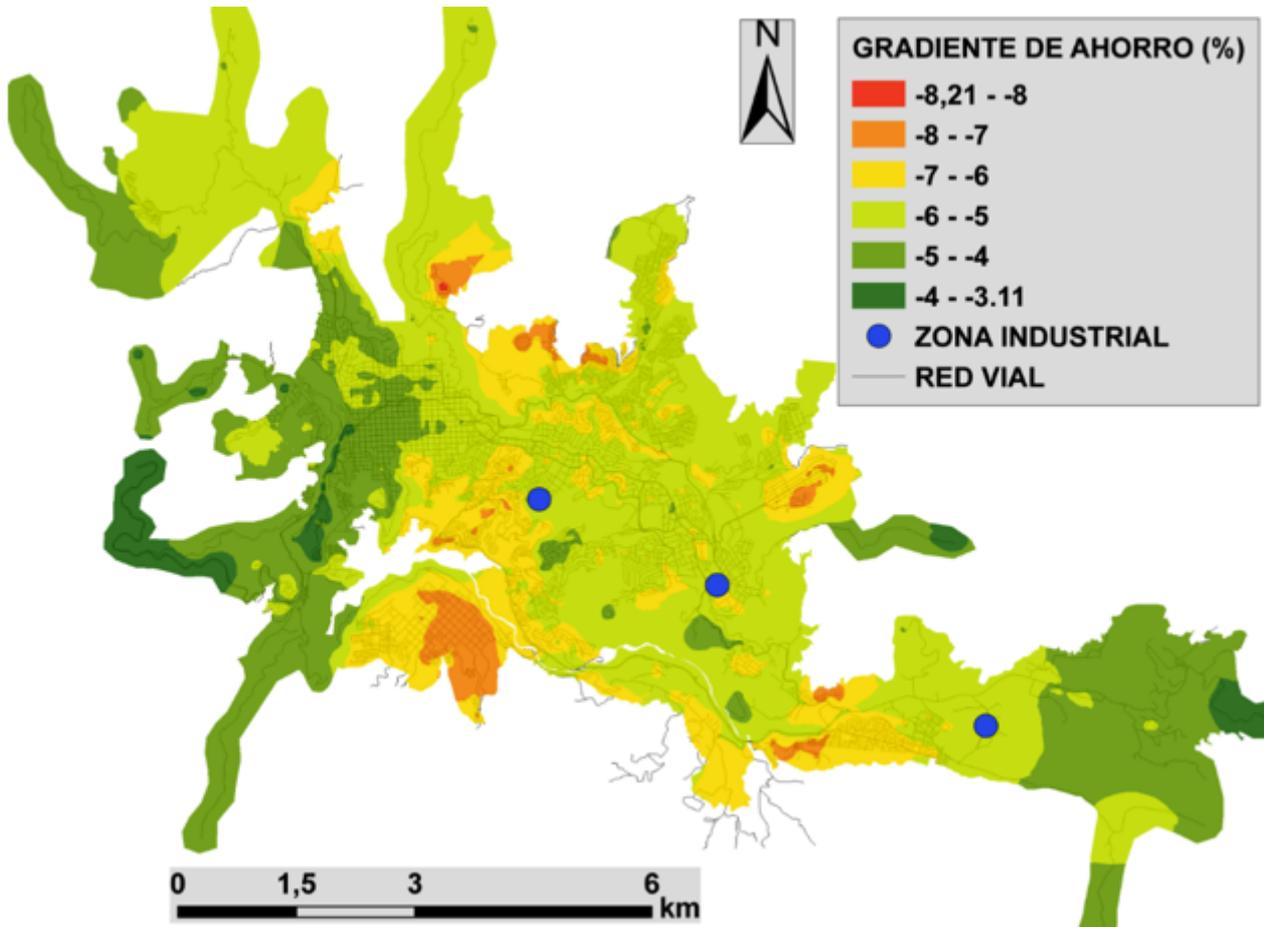
En la figura 7 se puede observar el gradiente de ahorro generado al comparar los dos escenarios de estudio, obteniéndose unas diferencias desde -3,11% hasta -8,21% en los tiempos promedio de viaje del escenario 1 al escenario 2. Esto nos indica que los tiempos promedio de viaje aumentaron en el escenario donde se incluyen las penalidades por giro para los vehículos pesados, particularmente en los nodos ubicados cerca de las intersecciones viales. Por otro lado, en la figura 8 se presenta la gráfica de cobertura de población según el gradiente de ahorro generado. En ésta, se muestra que el 100% de la población percibió una disminución de por lo menos el 3,11% en sus tiempos promedios de viaje. También, el 48% de la población se vio afectada en la disminución de por lo menos el 5% de sus tiempos promedio de viaje.

**Figura 6**  
Relación entre cobertura de población y accesibilidad media global.



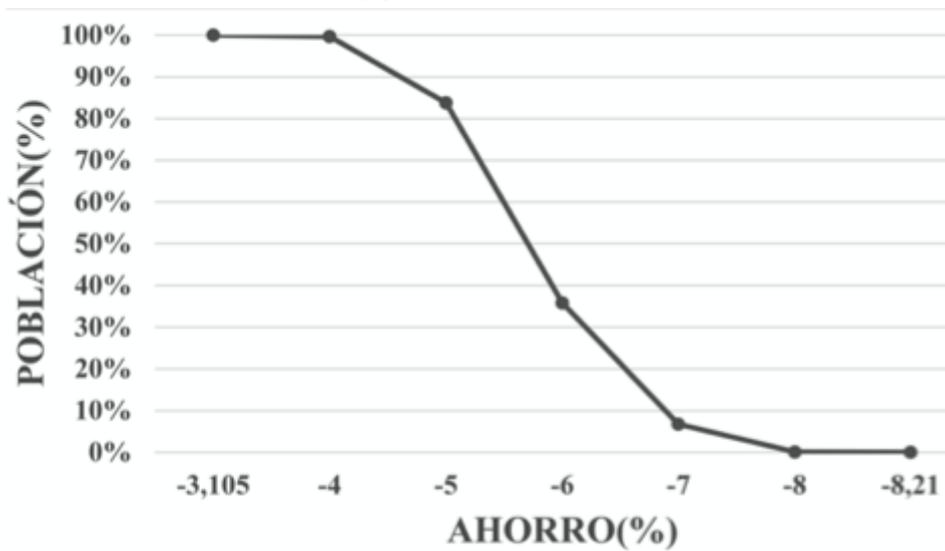
Fuente: Elaboración propia

-----  
**Figura 7**  
Gradiente de ahorro.



Fuente: Elaboración propia

-----  
**Figura 8**  
Relación entre cobertura de población  
y gradiente de ahorro.



Fuente: Elaboración propia

## 4. Conclusiones

Es importante resaltar que al comparar los resultados obtenidos de tiempo de giro por tipo de vehículo con los dados por Cardona (2018) para tiempo de giro globales (29,69 segundos para la derecha y 34,84 segundos para la izquierda) encontramos que para los vehículos pesados los tiempos de giro son mayores respecto los resultados a nivel global, mientras que para los vehículos livianos el tiempo de giro para el giro a la derecha es menor y el giro a la izquierda es mayor.

Por otro lado, para los vehículos livianos el tiempo de giro a la izquierda es mayor que el tiempo de giro a la derecha en un 20%. En el caso de los tiempos de giro para los vehículos pesados, el tiempo de giro a la derecha es mayor en un 13% respecto al giro a la izquierda. Esto se genera debido a los ángulos de giro cerrados que se deben realizar para el giro a la derecha por lo que las dimensiones de este tipo de vehículos generan que esta maniobra tome más tiempo respecto a la maniobra de giro a la izquierda.

Por otra parte, el gradiente de ahorro nos muestra las diferencias generadas en los tiempos promedio de viaje a partir de la inclusión de penalidades por giro según el tipo de vehículo por lo que es importante realizar las modelaciones de transporte con las penalidades de giro particulares según el tipo de vehículos, por ejemplo, utilizar las penalidades por giro o tiempos de giro dadas para vehículos pesados si se desea realizar una modelación para transporte público o transporte logístico, asimismo, utilizar los resultados dados para vehículos livianos y motocicletas si el análisis es para transporte privado y por último utilizar las penalidades por giro globales si se realizará una modelación general. En el caso particular del transporte logístico, donde sus vehículos son de gran envergadura y se concentran en lugares de la ciudad denominados zonas industriales (azules en figura 7), podemos observar cómo sufren un aumento significativo en sus tiempos de viaje, por lo que hay un indicativo de que en estas zonas las maniobras de giro son de importancia,

También es importante que esta metodología de cálculo para las penalidades por giro sea adaptada y calculada en el caso particular de cada ciudad al momento de realizar las modelaciones de transporte debido a que cada una posee dinámicas propias en cuanto a lo que movilidad respecta. Por esto, se recomienda que todas las etapas que incluye esta metodología, desde el análisis de priorización de intersecciones viales, trabajo de campo, análisis de datos y cálculo de penalidades por giro, sean incluidas como un apartado más al momento de realizar los Planes de Maestros de Movilidad con el fin de enriquecer la etapa de diagnóstico y las modelaciones de transporte con datos reales tomados en campo para las penalidades por giro y no con datos supuestos basados en la experiencia o subjetividad de los consultores.

Agradecimientos: Los investigadores agradecen a la vicerrectoría de investigación y a la dirección de investigación y extensión de la Universidad Nacional de Colombia por la ayuda dada a través del proyecto de código 41064 denominado "Propuesta metodológica para el cálculo de las penalidades por giro en modelos de accesibilidad" a través de la convocatoria "Convocatoria Nacional para el Apoyo al Desarrollo de Tesis de Posgrado o Trabajos Finales de Especialidades en el área de la Salud de la Universidad Nacional de Colombia 2017-2018". Al Grupo de Trabajo Académico en Movilidad Sostenible de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, especialmente al estudiante de ingeniería civil Juan Camilo Ocampo y al Centro de producción audiovisual (CEPAUN) en cabeza de su director Jaime Buitrago Alba y su asistente Natalia Osorio Grajales. Se agradece a los pares académicos asignados por la Revista Espacios 4.

---

## Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Manizales. (2017). *Plan Maestro de Movilidad de Manizales: Línea base y diagnóstico de la situación actual de la movilidad de Manizales*. Manizales.
- Añez, J., De La Barra, T., & Pérez, B. (1996). Dual graph representation of transport networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(3), 209–216. [http://doi.org/10.1016/0191-2615\(95\)00024-0](http://doi.org/10.1016/0191-2615(95)00024-0)
- Caldwell, T. (1961). On Finding Minimum Routes in a Network With Turn Penalties. *Communications of the ACM*, 4(2), 107–108. <http://doi.org/10.1145/366105.366184>
- Cardona, S. (2018). *Propuesta metodológica para el cálculo de las penalidades por giro en modelos de accesibilidad* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Cardona, S., Escobar, D. A., y Moncada, C. A. (2018a). Calculation of Turns Costs in Accessibility Models . Case Study : Manizales , Colombia, 11(56), 2777–2791.
- Cardona, S., Escobar, D., y Moncada, C. (2018b). Comparison on Turn Costs in Accessibility Models. Case Study: Manizales, Colombia. *Modern Applied Science*, 12(8), 59.

<http://doi.org/10.5539/mas.v12n8p59>

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerical Mathematics*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01386390>

Escobar, D. A., Duque, J. P., y Salas, A. (2015). Accesibilidad como herramienta de planeación urbana. Caso de estudio : Redireccionamiento vial en Riosucio ( Caldas - Colombia ). *Avances Investigación En Ingeniería*, 11(2), 9–18.

Escobar, D. A., y Garcia, F. J. (2012). Diagnostico de la Movilidad Urbana de Manizales (Primera ed). Manizales.

Escobar, D. A., Tapasco, O., y Giraldo, J. (2015). Medición de Desempeño del Sistema de Transporte Cable Aéreo de la Ciudad de Manizales en Colombia, usando Tres Enfoques: Analítico, Simulado y de Accesibilidad Urbana. *Informacion Tecnologica*, 26(6), 199–210. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000600020>

Geisberger, R., & Vetter, C. (2011). Efficient routing in road networks with turn costs. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6630 LNCS, 100–111. [http://doi.org/10.1007/978-3-642-20662-7\\_9](http://doi.org/10.1007/978-3-642-20662-7_9)

Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. (2001). Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact. *RIVM Report*, 787, 1–265. Retrieved from <https://rivm.openrepository.com/rivm/handle/10029/9487>

Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. <http://doi.org/10.1080/01944365908978307>

Manizales Cómo Vamos. (2018). Informe de Calidad de Vida manizales 2018.

Moncada, C., Cardona, S., y Escobar, D. (2018). Saving Travel Time as an Urban Planning Instrument . Case Study : Manizales, Colombia. *Modern Applied Science*, 12(6), 44–57. <https://doi.org/10.5539/mas.v12n6p44>

Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (1994). *Modelling Transport. Modelling Transport* (Fourth Edi). John Wiley & Sons, Ltd. <http://doi.org/10.1002/9781119993308>

Owens, S. (1995). From “predict and provide” to “predict and prevent”?: Pricing and planning in transport policy. *Transport Policy*, 2(1), 43–49. [http://doi.org/10.1016/0967-070X\(95\)93245-T](http://doi.org/10.1016/0967-070X(95)93245-T)

Patriksson, M. (1994). *The traffic assignment problem : models and methods*. New York: Dover Publications.

Pérez, J. M. (2013). *Estado del arte de la modelación física en ingeniería civil*. Universidad de la Salle. Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/22227/T40.13P415e.pdf?sequence=2>

Schwar, J. F., y Huarte, J. P. (1975). Métodos estadísticos en ingeniería de tránsito. México: Representaciones y servicios de ingeniería S.A.

Talen, E., & Anselin, L. (1998). Assessing spatial equity: An evaluation of measures of accessibility to public playgrounds. *Environment and Planning A*, 30(4), 595–613. <https://doi.org/10.1068/a300595>

Te Brömmelstroet, M., & Bertolini, L. (2011). The role of transport-related models in urban planning practice. *Transport Reviews*, 31(2), 139–143. <http://doi.org/10.1080/01441647.2010.541295>

Thériault, M., Vandersmissen, M.-H., Lee-Gosselin, M., & Leroux, D. (1999). Modelling Commuter Trip Length and Duration Within GIS: Application to an O-D Survey. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* , 3(1), 40–56.

Volker, L. (2008). Route Planning in Road Networks with Turn Costs, 1–30.

Winter, S. (2002). Modeling costs of turns in route planning. *GeoInformatica*, 6(4), 345–361. <http://doi.org/10.1023/A:1020853410145>

Woldeamanuel, M. G. (1975). *Concepts in urban transportation planning : the quest for mobility, sustainability and quality of life*.

Wright, P. H., & Ashford, N. J. (1989). *Transportation Engineering: Planning and Design* (Fourth Edi). New York: Jhon Wiley & Sons, Ltd.

Wu, Q., Qin, G., & Li, H. (2015). An Improved Dijkstra’s algorithm application to multi-core processors. *Metallurgical & Mining Industry*, (9), 76–81.

Yiannakoulias, N., Bland, W., & Svenson, L. W. (2013). Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care. *Applied Geography*, 39, 172–182. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.003>

---

1. Ingeniero Civil. Magister en Ingeniería – Infraestructura y Sistemas de Transportes. Joven Investigador COLCIENCIAS. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. [scardonau@unal.edu.co](mailto:scardonau@unal.edu.co)

2. Doctorado en Gestión del Territorio e Infraestructura del Transporte. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil, Grupo de Trabajo Académico en Movilidad Sostenible. Carrera 27 # 64 – 60, Manizales, 170004 - Colombia. [daescobarga@unal.edu.co](mailto:daescobarga@unal.edu.co)

3. Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Programa de Investigación en Tránsito y Transporte – PIT. Ciudad Universitaria, edificio 214, oficina 321, Bogotá, 111321 - Colombia. [camoncadaa@unal.edu.co](mailto:camoncadaa@unal.edu.co)

4. Este artículo de investigación ha sido sometido individualmente a revisión de pares académicos externos por parte de la Revista Espacios.

---

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015  
Vol. 40 (Nº 38) Año 2019

[\[Índice\]](#)

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a [webmaster](#)]