

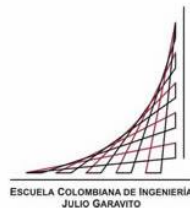


**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**  
**Programa de Ingeniería Civil**

**Análisis de la heterogeneidad espacial del tráfico vehicular en  
vías interurbanas en Colombia**

**Edna Samantha Rodríguez Pinzón**

**Bogotá, D.C., diciembre 2020**







## Resumen

Colombia a finales del *siglo XX* se encontraba rezagada en el desarrollo de infraestructura vial debido a falta de recursos destinados al área, es así como, el Ministerio de Transporte decide promover los programas de concesiones que permiten la inversión de entidades privadas en la construcción, mantenimiento y conservación de las futuras vías del País. Con el desarrollo de este tipo de contratos se buscó mejorar la eficiencia en la gestión de estos proyectos y reevaluar los intereses de los inversionistas. Por ello, es necesario reconocer la importancia de los métodos utilizados para estimar las proyecciones de la demanda durante la etapa de estudio para, así, evitar déficit financieros o reestructuraciones del proyecto. El objetivo de este trabajo es analizar la heterogeneidad del tráfico vehicular en diferentes niveles espaciales, a partir de un modelo panel multinivel y teniendo en cuenta variables explicativas útiles en etapas de estimación de tráfico como el PIB y la población. Dentro de este análisis se tiene en cuenta la temporalidad de las variables analizadas y se utilizan datos que abarcan el periodo comprendido entre el año 2015 y 2019.

**Palabras claves:** *concesión; tráfico vehicular, serie temporal; modelo panel multinivel; efectos aleatorios.*





## Indice general

Introducción.....	10
Objetivos .....	11
Objetivo Principal .....	11
Objetivos específicos .....	11
Estado del Arte.....	12
Caso de Estudio.....	15
Generalidades de algunas concesiones .....	16
Metodología.....	28
Resultados .....	32
Conclusiones.....	51
Referencias .....	52



## Indice de figuras

Ilustración 1. Mapa concesión Área Metropolitana de Cúcuta .....	16
Ilustración 2. Mapa concesión Armenia – Pereira – Manizales .....	18
Ilustración 3. Mapa concesión Bogotá – Villavicencio .....	19
Ilustración 4. Mapa concesión Bogotá (Fontibón) – Faca – Los Alpes .....	20
Ilustración 5. Mapa concesión Briceño – Tunja – Sogamoso .....	21
Ilustración 6. Mapa concesión Cartagena – Barranquilla – “Vía al mar” .....	22
Ilustración 7. Mapa concesión Córdoba – Sucre .....	23
Ilustración 8. Mapa concesión Girardot – Ibagué – Cajamarca .....	24
Ilustración 9. Mapa concesión Ruta Caribe .....	25
Ilustración 10. Mapa concesión Ruta del Sol – Sector 1 .....	26
Ilustración 11. Mapa concesión Santa Marta – Riohacha – Paraguachón .....	27
Ilustración 12. Mapa concesión Santafé de Bogotá (Puente el Cortijo) – Siberia – La Punta – El Vino – La Vega – Villeta .....	28
Ilustración 13. Esquema de jerarquización modelo multinivel .....	30
Ilustración 14. Listado variables analizadas en STATA .....	32
Ilustración 15. Efectos aleatorios Categoría I .....	34
Ilustración 16 Efectos Aleatorios Categoría II .....	37
Ilustración 17. Efectos Aleatorios Categoría III y IV .....	40





Ilustración 18. Efectos Aleatorios Categoría V .....	43
Ilustración 19. Efectos Aleatorios Categoría VI .....	46
Ilustración 20. Efectos Aleatorios todas las categorías. ....	49

## Introducción

En el desarrollo de un proyecto de infraestructura vial, evaluar la *demand*a de tráfico vehicular y su proyección es fundamental para su dimensionamiento. Para estimar la demanda se realiza una proyección del flujo vehicular teniendo en cuenta la implementación del proyecto a partir del flujo actual y considerando factores macroeconómicos y sociales. Este análisis es importante en la toma de decisiones durante el dimensionamiento del proyecto y en la determinación del beneficio/costo que dicha infraestructura va a tener.

En Colombia desde finales del siglo XX el desarrollo de la infraestructura vial se ha llevado a cabo por medio de programas de concesiones definidos en el documento CONPES 2597 y regulado por las leyes 105 y 80 del año 1993. Estas permiten la inversión de capital privado, aliviando la carga presupuestal del estado. Cabe resaltar que en este tipo de proyectos los riesgos referentes a la etapa de operación del proyecto son tomados por el ente privado, de manera que tener estimaciones de tráfico precisas permitirán que el proyecto cumpla su objetivo para el periodo en el que fue planeado y además no genere déficit financiero durante su operación, lo cual puede ocurrir debido a sobreestimaciones de tráfico.

Si bien en los últimos años los estudios e investigaciones que se han realizado alrededor de esta área han aumentado, éstos se inclinan a evaluar las causas que generan sesgo en las estimaciones de tráfico, conocer cómo se distribuye el tráfico espacialmente en el país e identificar las variables que tienen efectos en la generación de tráfico.

Es por esto por lo que por medio de este trabajo se analiza la heterogeneidad espacial del tráfico Vehicular en Colombia a partir de un modelo panel multinivel, a

incluyendo variables como el PIB y la población, jerarquizados en tres niveles administrativos, departamentos, municipios y peajes. Este análisis se realizó sobre las concesiones que se tienen registradas en operación actualmente en Colombia y en base a los reportes de tráfico de los peajes e información que suministrada por la Agencia Nacional de Infraestructura ANI.

Este documento se distribuye de la siguiente manera, en la prima parte, se presenta una breve revisión de la literatura especializada y la exposición del caso de estudio de este trabajo; la segunda parte, muestra los datos utilizados para el análisis al igual que la metodología; para finalizar en la tercera parte se presentan los resultados encontrados a partir del modelo y las conclusiones a las que se llegó a partir de ellos.

## **Objetivos**

### **Objetivo Principal**

Analizar la heterogeneidad espacial del tráfico Vehicular en Colombia a partir de un modelo panel multinivel, categorizado en departamentos, municipios y peajes.

### **Objetivos específicos**

- Generar una base de datos donde se consolide la información del tráfico hasta la fecha, clasificado en las distintas categorías.
- Aplicar el modelo multinivel para realizar la regresión de los datos por medio del programa STATA.
- Analizar los efectos aleatorios que tienen el PIB y la población en los diferentes niveles espaciales.



renegociaciones, siendo estas últimas la principal amenaza para el éxito de un proyecto.

Por otra parte, Odeck & Welde (Odeck & Welde, 2017) mencionan el hecho de que la inversión y participación de capital privado en este tipo de proyectos puede mejorar la exactitud de las estimaciones, pero realiza una salvedad y esta es que si el sector privado participa en la generación de dichas previsiones, la probabilidad de adjudicación del proyecto aumenta cuando se presentan buenas ofertas y se muestra una capacidad de recaudar cantidades importantes de deuda, hecho que puede traducirse en un incentivo para que se incrementen las previsiones de ingresos. Esta idea también es apoyada por Paranaíba de Carvalho et al. (Paranaíba de Carvalho et al., 2016) quienes de manera clara explican que el sesgo en las estimaciones de tráfico se produce durante la etapa de licitación y esto es debido al comportamiento oportunista, dado que las propuestas no dan una viabilidad económica.

Avanzando en este razonamiento y en búsqueda de investigaciones que evaluaran la exactitud de previsiones de tráfico dentro de proyectos viales se encontró algunos ejemplos:

En Noruega se tomaron en cuenta 68 proyectos que entraron en funcionamiento durante los años 1975 y 2014 (Odeck & Welde, 2017). La revisión se hizo basado en modelos econométricos. En esta investigación se mostró el contexto en el que se implementan los peajes en Noruega, dado que, las empresas que prestan este servicio no tienen fines de lucro y su único interés es recaudar fondos, por ende, esto permite la ejecución de proyectos más eficaces y rápidos. En este estudio se evaluó la exactitud a partir de dos conceptos, imparcialidad y eficiencia, mostró que la inexactitud causa una disminución de aproximadamente un 4% de la demanda y



## Caso de Estudio

Desde finales de los años 90s y debido a la escasa infraestructura vial en el país surgieron el programa de concesiones, consolidadas en los diferentes documentos CONPES, es así como por medio de la inyección de recursos provados se ha logrado tener en la actualidad tres generaciones de concesiones viales en Colombia y se está proyectando una cuarta generación. En esta investigación se analizarán todas las concesiones a nivel nacional a partir de los históricos de tráfico de sus peajes desde el año 2015 hasta el año 2019 sin discriminar su generación, en total, se contemplan 31 concesiones.

<b>Nombre de la concesión</b>
Área Metropolitana de Cúcuta y Norte de Santander
Armenia – Pereira – Manizales
Autopista Conexión Pacífico 1, 2 y 3
Bogotá – Villavicencio
Bogotá (Fontibón) – Faca – Los Alpes
Briceño – Tunja – Sogamoso
Cartagena – Barranquilla – “Vía al mar”
Córdoba – Sucre
Desarrollo Vial del Oriente de Medellín – DEVIMED
Girardot – Ibagué – Cajamarca
IP – Accesos Norte a Bogotá
IP - Malla vial del Meta
IP - Neiva – Girardot
Pereira – La Victoria
Perimetral de Oriente de Cundinamarca
Ruta Caribe
Ruta del Sol – Sector 1 y 4
Santa Marta – Riohacha – Paraguachón
Santafé de Bogotá (Puente el Cortijo) – Siberia – La Punta – El
Vino – La Vega – Villeta
Villavicencio – Yopal
Córdoba – Sucre
Área metropolitana de Cúcuta
Ruta Caribe
Girardot – Ibagué – Cajamarca
Ruta del sol sector 1

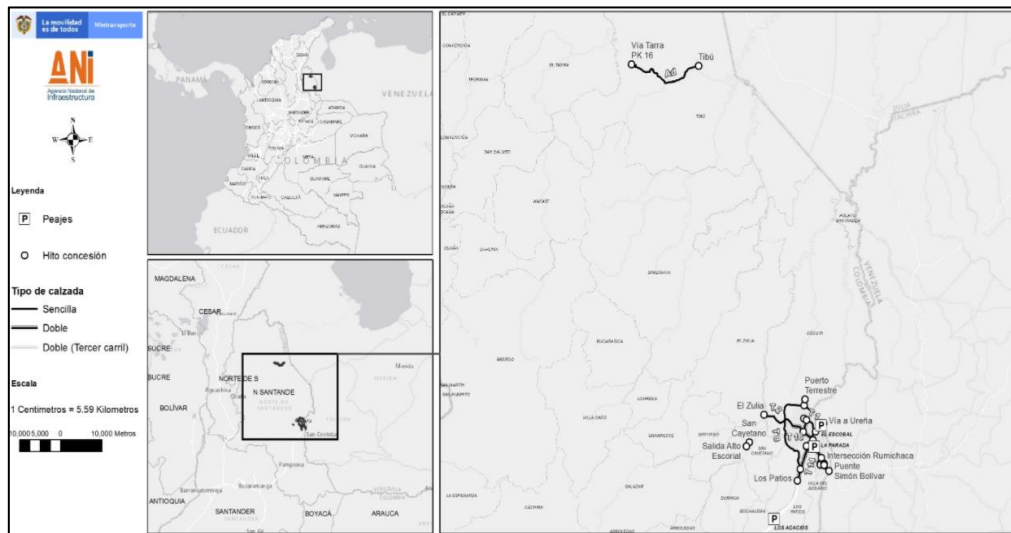
Tabla 1. Listado concesiones Fuente: Portal de la ANI - Elaboración propia.

## Generalidades de algunas concesiones

### ➤ Concesión del Área Metropolitana de Cúcuta y Norte de Santander

Este proyecto se adicionó al inventario de ejes viales nacionales, debido a su importancia en la conexión de las zonas fronterizas con el comercio y turismo de dicha región. Esta concesión se encuentra en el centro – oriente del departamento de Norte de Santander. Este proyecto se ejecutó en 16 tramos a los cuales se le adicionó un nuevo tramo apartado de este sector entre Tibú – El Tarra, el cual consta de 70 Km. El área metropolitana abarca los municipios de Villa del Rosario, La zulia, Puerto Santander, Los patios y San Cayetano, sectores que destacan por su gran productividad agrícola y minera.

*Ilustración 1. Mapa concesión Área Metropolitana de Cúcuta*



*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

En total se intervinieron 104 Km, de los cuales aproximadamente 49 Km correspondieron a infraestructura nueva construida, ocho puentes



construidos, y realizando obras de mantenimiento y rehabilitación a los kilómetros restantes. En esta concesión se incluyen tres peajes Los Acacios, La Parada y El Escobal.

➤ **Concesión Armenia – Pereira – Manizales**

Esta concesión hace parte de la troncal del eje cafetero, permite la conexión de toda esta región con las principales vías nacionales y algunas ciudades importantes del país. Este proyecto se desarrolla sobre cuatro departamentos, Valle de Cauca, Quindío, Risaralda y Caldas. Para su ejecución se dividió en ocho tramos que cruzan los municipios de Circasia, Finlandia, Armenia, Chinchiná, Pereira, Manizales entre otros. Dentro de la concesión se instalaron siete peajes Circasia, Corozal, Pavas, San Bernardo, Santágueda, Tarapacá I y Tarapacá II. La longitud intervenida es de un total de 189 Km, entre las obras entregadas se tiene un túnel, un puente peatonal y 14 puentes peatonales. Con respecto a la vía se entregaron un total de 64 Km de infraestructura nueva y se realizaron operaciones de mantenimiento y rehabilitación, en la figura 2 se presenta el trazado de la concesión.

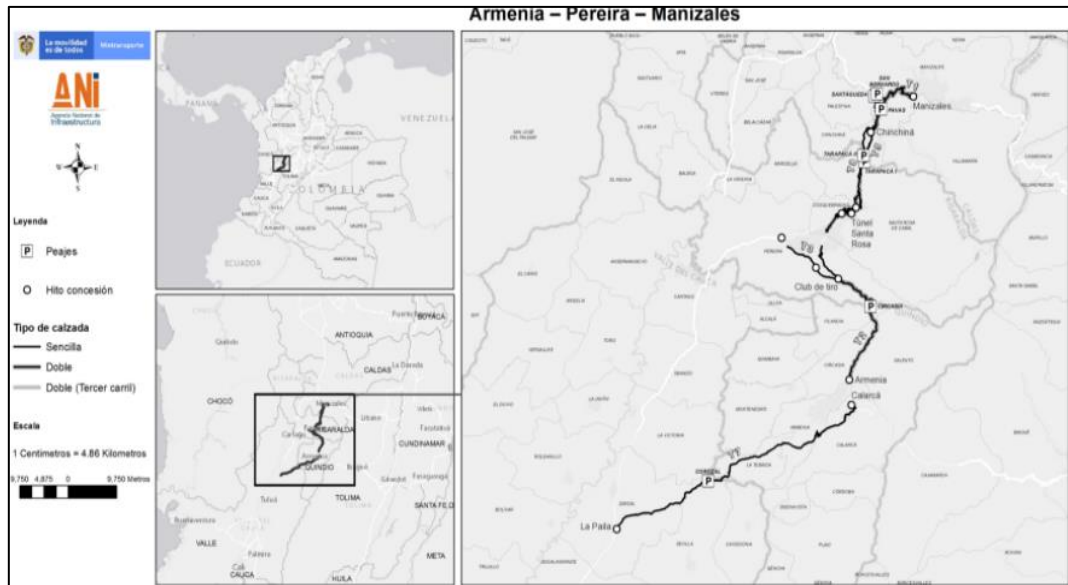
➤ **Concesión Autopista Conexión Pacífico 1, 2 y 3:** este es un importante proyecto ubicado en el suroeste del país, que beneficia principalmente a Medellín y a la región del eje cafetero, brindando un corredor de conexión más rápido con el puerto de Buenaventura, facilitando así el comercio internacional en este sector, consta de tres conexiones.

Pacífico 1, que es un corredor que conecta Bolombolo con la primavera y tiene una longitud de 50 Km, influye en municipios como Amagá, Venecia, Caldas y Titiribí.

Pacífico 2 es un corredor que recibiría todo el tráfico proveniente del norte del país y une Bolombolo con la Pintada con cerca de 43 Km intervenidos. Para terminar con la salida al pacífico colombiano se tiene 146 Km y en este

sector recibe el tráfico del occidente del país. A lo largo de estas tres autopistas se espera que se entreguen cuatro túneles que demandan un gran ingenio estructural dada la morfología del suelo. Los principales departamentos beneficiados con esta obra son Antioquia, Caldas y Risaralda, se tienen también dentro de este proyecto los peajes Amagá, Supia, la Pintada, primavera y Acapulco.

*Ilustración 2. Mapa concesión Armenia – Pereira – Manizales*



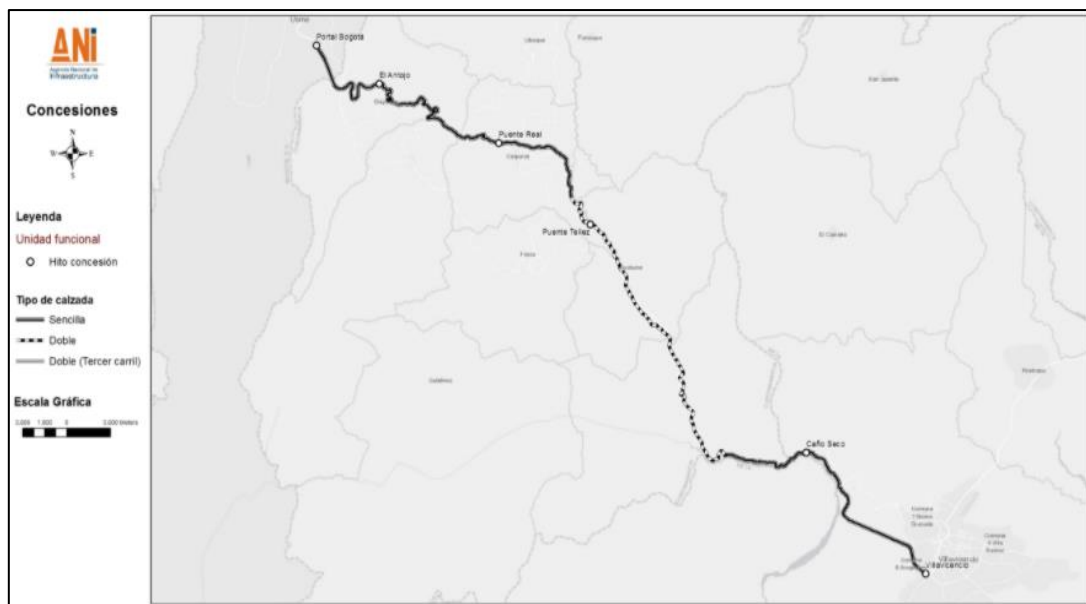
*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

### ➤ **Concesión Bogotá – Villavicencio**

Dentro de la red nacional de carreteras este proyecto hace parte de la Ruta Nacional 40, surgió como necesidad de adecuar la vía para el comercio de los llanos orientales, ya que, debido a la carencia de otros medios de transporte, este corredor es la única salida para comercializar los productos y suministra a la capital del país la mayor parte de los alimentos que se consumen. Es un proyecto que presenta grandes desafíos en el sector de

infraestructura debido al terreno que se está interviniendo. Los departamentos directamente implicados en este proyecto son Meta y Cundinamarca, se compone de un total de 86 Km, de los cuales cerca de 37 Km serian de doble Calzada, sumado a esto se espera que se entreguen 22 túneles y 48 puentes. En esta concesión se tienen dos peajes Boquerón I y Boquerón II.

*Ilustración 3. Mapa concesión Bogotá – Villavicencio*



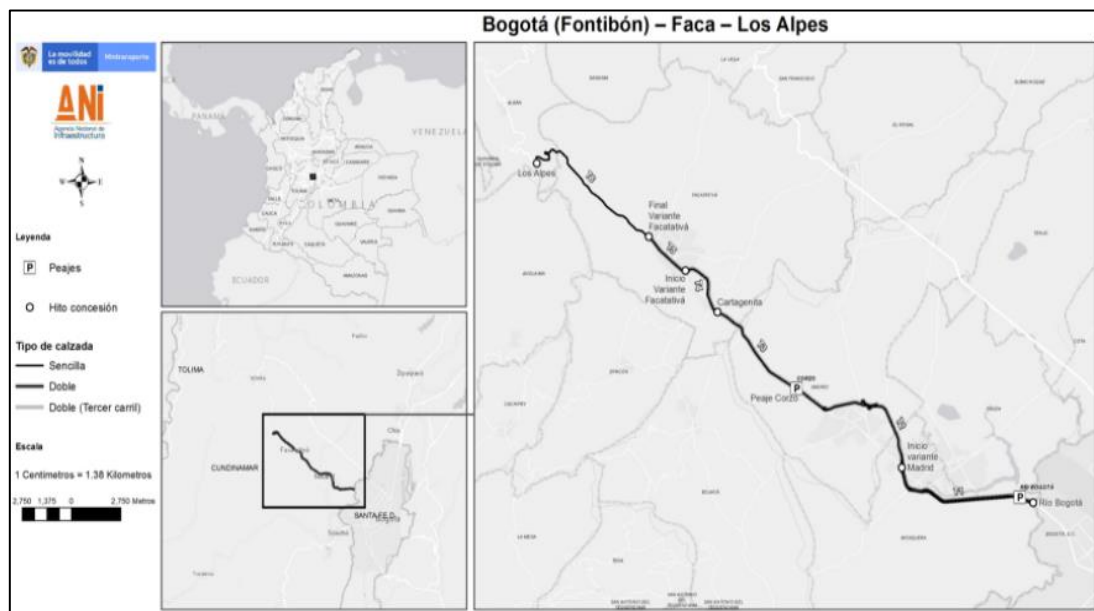
*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

➤ **Concesión Bogotá (Fontibón) – Faca – Los Alpes**

Esta concesión se proyectó con el fin de descongestionar la zona occidental del departamento de Cundinamarca, además tiene una gran influencia en la capital del país, debido a que aporta una mejora en el tráfico de entrada y salida de Bogotá por la calle 13 y beneficiando municipios de la sabana de

occidente. Esta comprendido por seis tramos que suman un total de 38 Km intervenidos en su mayoría doble calzada, se entregaron también nueve puentes peatonales y 15 puentes vehiculares. dentro de este proyecto se tienen dos peajes Río Bogotá y Corzo.

*Ilustración 4. Mapa concesión Bogotá (Fontibón) – Faca – Los Alpes*



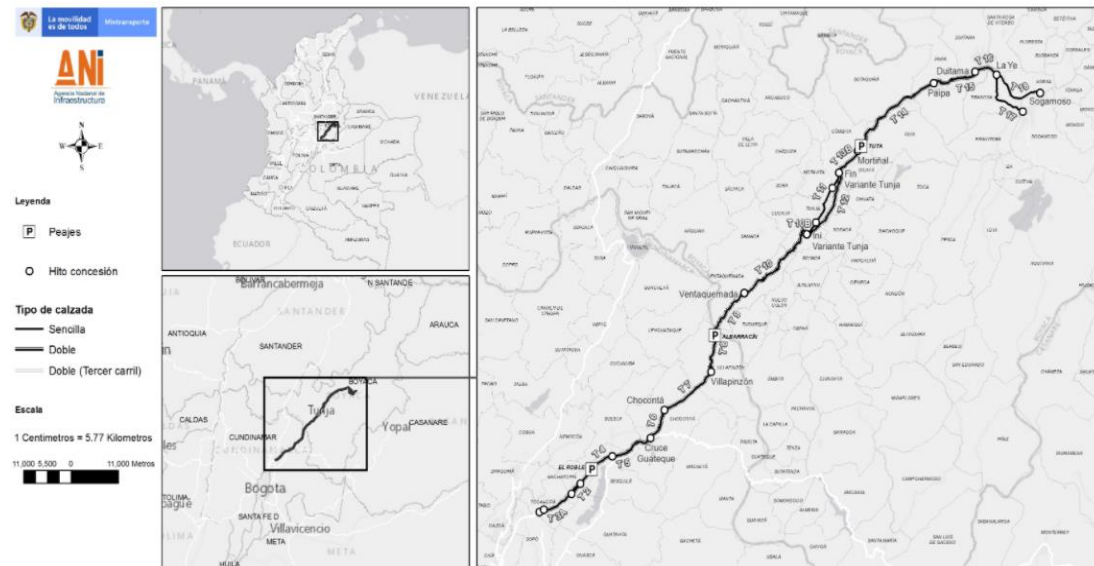
*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

➤ **Concesión Briceño – Tunja – Sogamoso**

Este proyecto se planteó con la finalidad de conectar toda la zona industrial del departamento de Boyacá con Bogotá, además, completo las obras que se tenían pendientes en el puente de Boyacá, contribuyendo a la reducción en los tiempos de viaje debido a la construcción de doble calzada que se realizó. En este proyecto para su ejecución se dividieron en diferentes etapas (18 trayectos), el proyecto tiene una totalidad de 206 Km intervenidos, de los cuales aproximadamente 174 Km correspondieron a rehabilitación de la

calzada sencilla existente y 21 Km contemplan la nueva doble calzada, también se construyeron 37 puentes a lo largo del eje vial y se implementaron tres peajes, Albarracín, El Roble, y Tuta. Esta concesión se localiza entre los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, y beneficia principalmente a municipios como Briceño, Chocontá, Villapinzón, Tunja, Paipa, Duitama, Sogamoso, entre otros.

*Ilustración 5. Mapa concesión Briceño – Tunja – Sogamoso*



*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

➤ **Concesión Cartagena – Barranquilla – “Vía al mar”**

Este corredor vial tuvo como propósito entregar al país una vía de altas especificaciones técnicas, de manera que la conexión entre Cartagena y Barranquilla tuviera un mejor nivel de servicio. Aportó un gran desarrollo urbanístico con la construcción del viaducto Gran Manglar que es el más largo de Colombia y reconocido en Latinoamérica. Se intervinieron 93 Km a lo largo de los departamentos de Atlántico y Bolívar y se instalaron los peajes

Marahuaco, Papiros y Puerto Colombia. Actualmente, se contempla dentro de la cuarta generación de concesiones terminar la construcción de la doble calzada en todo el recorrido.

*Ilustración 6. Mapa concesión Cartagena – Barranquilla – “Vía al mar”*



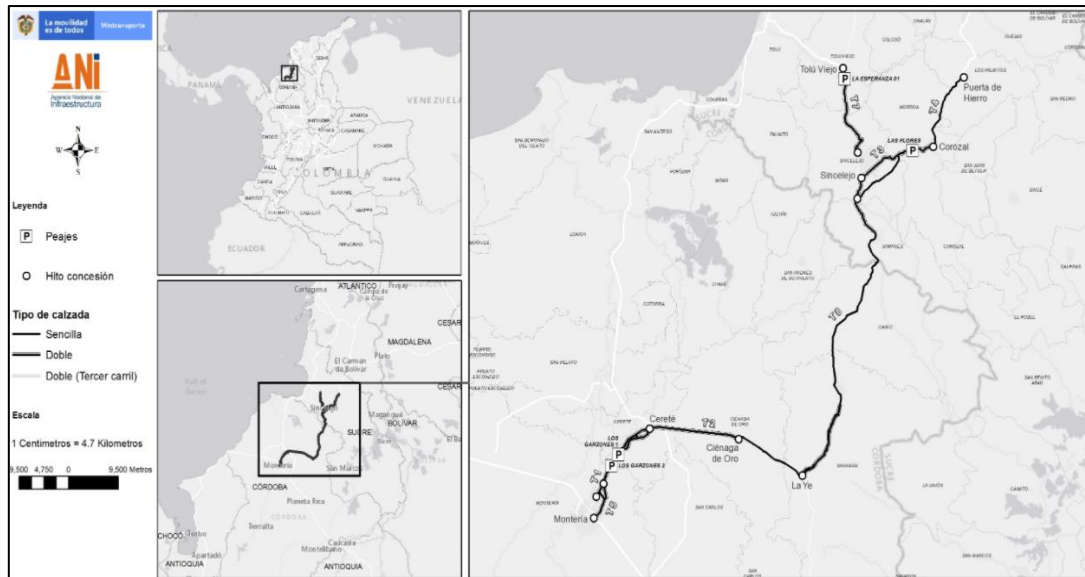
*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

### ➤ **Concesión Córdoba – Sucre**

Esta concesión buscó hacer una mejora de la infraestructura disponible para así contribuir con el intercambio comercial que se maneja entre estos dos departamentos. Se convirtió en un importante eje vial en este sector porque comunica importantes ciudades que tienen un gran atractivo turístico, además de destacarse por ser zonas de alta productividad y comercio.



*Ilustración 7. Mapa concesión Córdoba – Sucre*



*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

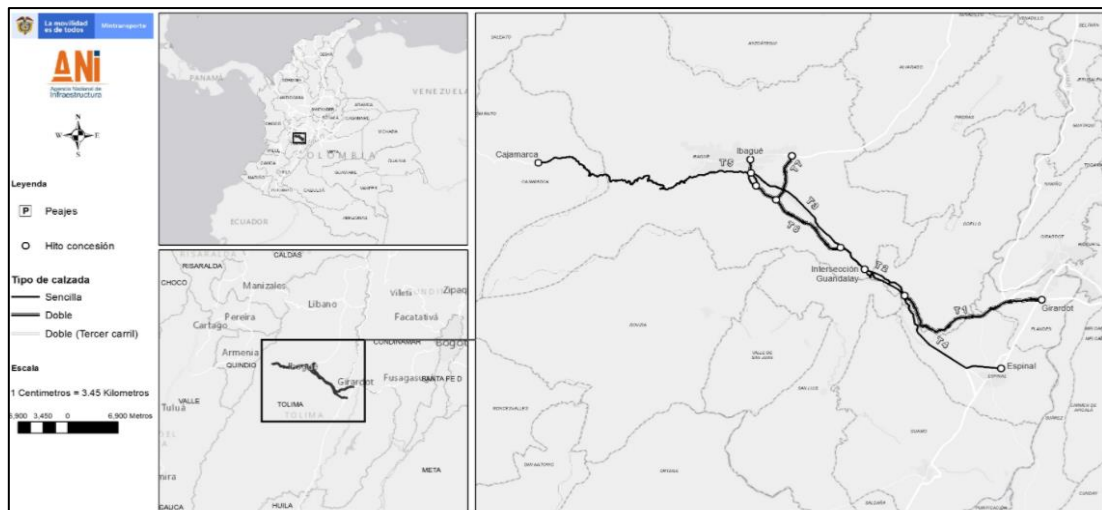
Este proyecto se ejecutó en ocho tramos, de los cuales destacan los tramos comprendidos entre La Ye y Corozal, y permite el tránsito de un gran número de vehículos de carga pesada que tienen como destino los principales puertos de la costa caribe. Esta concesión es de 177 Km intervenidos, de los cuales 104 Km de infraestructura son totalmente nuevos y rehabilitó 92 Km de ejes viales tanto de calzada sencilla como doble y 3 puentes. Se implementaron cuatro peajes La Esperanza, Las Flores, Los Garzones 1 y Los Garzones 2. Entre los municipios directamente beneficiados se encuentran Puerta de Hierro, Tolu Viejo, Sincelejo, Cereté, Montería, entre otros.

➤ **Concesiones Girardot – Ibagué – Cajamarca**

Esta concesión está incluida dentro del corredor vial que conecta Bogotá con Buenaventura, está ubicada en el departamento del Tolima, su objetivo es

contribuir a desarrollar este eje vial para que así mejorar la conectividad de los principales centros productivos del país con el puerto de Buenaventura.

*Ilustración 8. Mapa concesión Girardot – Ibagué – Cajamarca*



*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

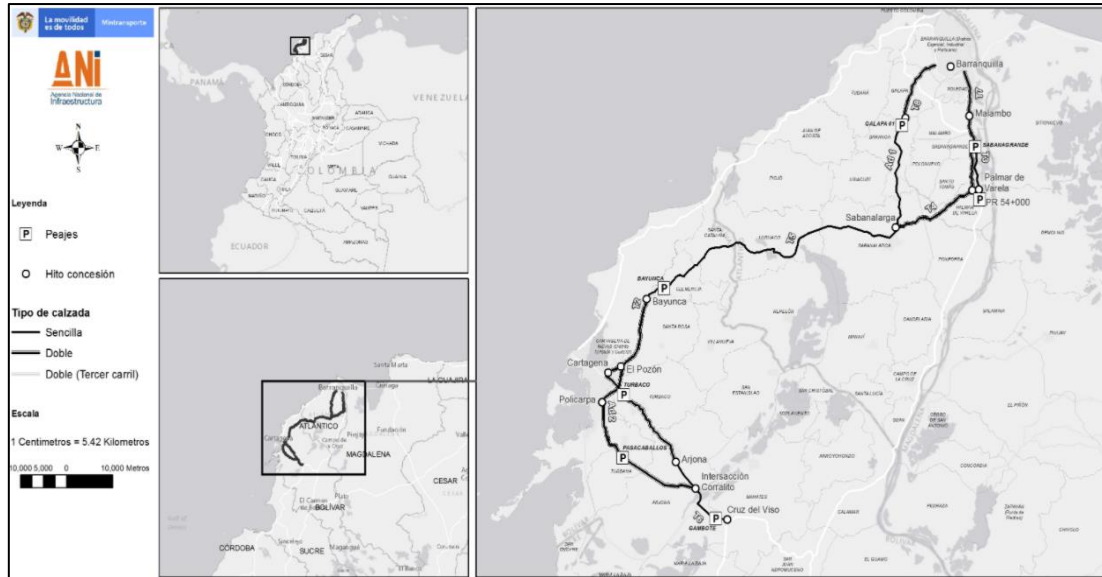
Este proyecto consta de siete tramos, es un eje vial que tiene un recorrido por los sectores y municipios de Flandes, Girardot, Espinal, conectando con Ibagué y Cajamarca. Reúne un total de 146 Km intervenidos, de los cuales 72 Km son de nuevas calzadas, un túnel y seis puentes. Esta concesión cuenta con dos peajes Chicoral y Gualanday.

➤ **Concesión Ruta Caribe**

Este proyecto buscó fortalecer la infraestructura de transporte comercial que se tiene en esta región, se desarrolla entre los departamentos de Bolívar y Atlántico. Debido a la importancia de este corredor vial lo que se buscaba era aumentar su nivel de servicio.



*Ilustración 9. Mapa concesión Ruta Caribe*



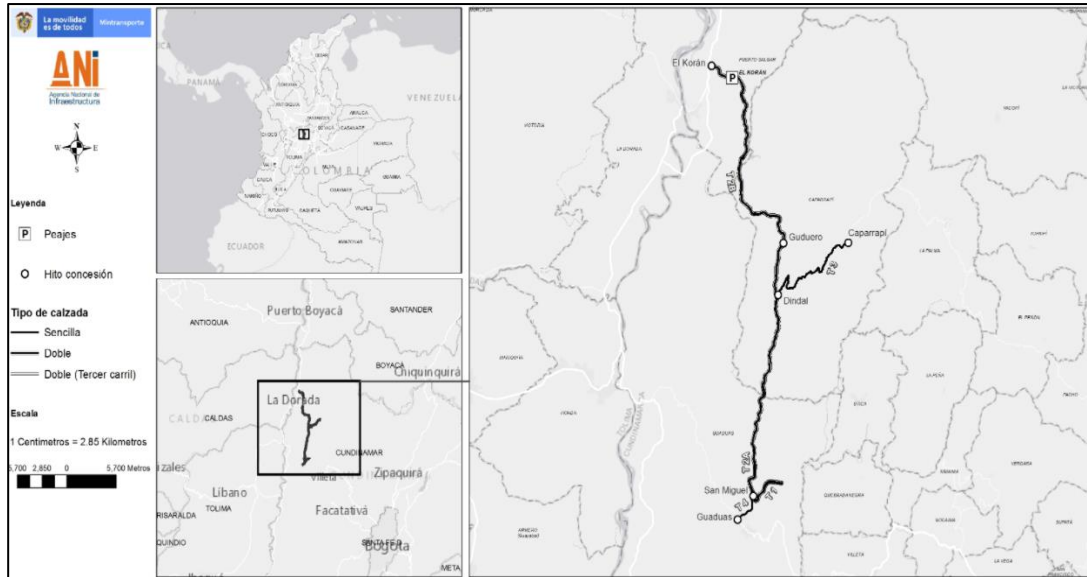
*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

Dentro de la concesión se trabajaron siete trayectos y se adjudicaron dos intervenciones adicionales sobre la Ruta 90 que suman aproximadamente 57 Km. Este proyecto proporcionó mejor conectividad entre Cartagena, Sabanalarga y Barranquilla. Consta de 288 Km aproximadamente, en los cuales se realizaron trabajos de rehabilitación (249 Km), construcción de calzadas nuevas 164 Km y se entregaron tres puentes. Adicionalmente, se incluyeron seis peajes Bayunca, Galapa 2, Gambote, Pasacaballos, Sabanagrande y Turbaco.

➤ **Concesión Ruta del Sol – Sector 1**

Hace parte del megaproyecto de la Autopista Ruta del Sol, que busca conectar el interior del país con la costa Atlántica, pasando por más de 39 municipios.

*Ilustración 10. Mapa concesión Ruta del Sol – Sector 1*



*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

Esta concesión se ubica en el departamento de Cundinamarca. En la ejecución de este proyecto se ejecutaron cuatro tramos, los cuales recorren los municipios de Villeta, Guaduas, San Miguel, Caparrapí, el Korán entre otros. Consta de 63 Km de doble calzada y cuatro túneles. Este proyecto incluye la operación de un peaje, El Korán.

➤ **Concesión Santa Marta – Riohacha – Paraguachón**

Este proyecto buscó consolidar las relaciones económicas entre la parte norte del Colombia, con la zona noroccidental de Venezuela con la ayuda de la rehabilitación de la vía existente, mejorando las condiciones de este importante corredor que conecta importantes ciudades de los departamentos de Magdalena y la Guajira con la frontera. La rehabilitación se realizó para 285 Km, que se distribuyeron en tres tramos, el primero Santa Marta – Río Palomino con cerca de 72 Km intervenidos, seguido por el tramo Palomino –

Riohacha con una longitud de 90 Km y por último Riohacha – Paraguachón con 88 Km aproximadamente. En este corredor se tienen los peajes Naganje, El Ebanal, Alto Pino y Paraguachón.

*Ilustración 11. Mapa concesión Santa Marta – Riohacha – Paraguachón*

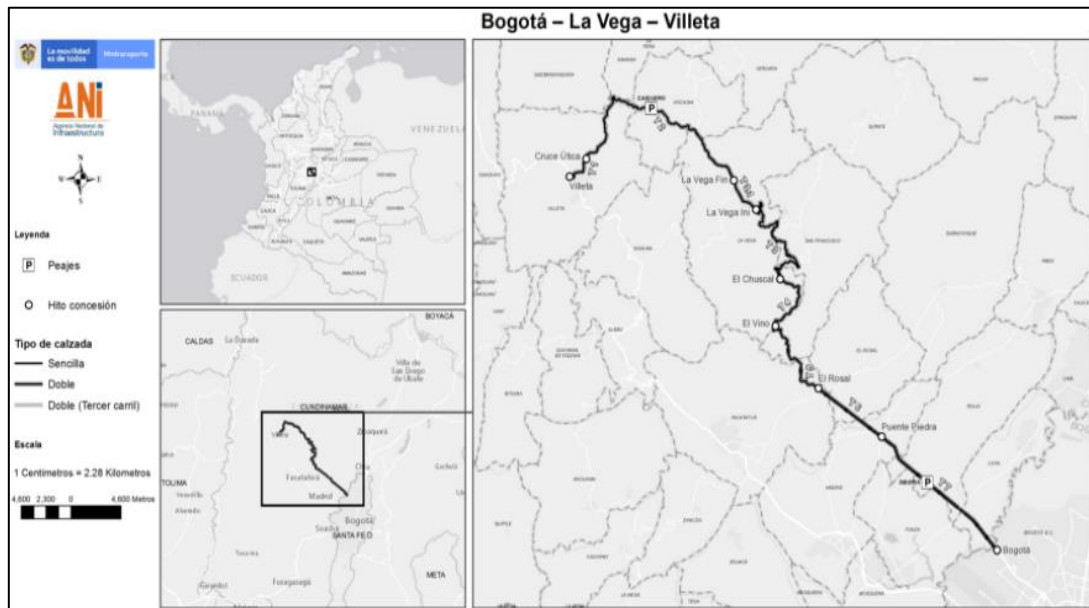


*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

➤ **Concesión Santafé de Bogotá (Puente el Cortijo) – Siberia – La Punta – El Vino – La Vega – Villeta**

Es un proyecto que se plateo con el fin de rehabilitar esta autopista y recuperarla, para así mejorar los tiempos de viaje, brindando la posibilidad de que los costos operacionales para camiones de carga disminuyan y se vuelva un corredor de constante flujo. En total se intervinieron 82 Km de los cuales se dispone de 77Km de doble calzada, beneficiando así a municipios pertenecientes al occidente de la sabana. Se tienen los peajes Caiquero y Siberia en esta autopista.

*Ilustración 12. Mapa concesión Santafé de Bogotá (Puente el Cortijo) – Siberia – La Punta – El Vino – La Vega – Villeta*



*Fuente: Mapas Agencia Nacional de Infraestructura ANI.*

## Metodología

Para realizar la presente investigación y analizar los efectos del PIB y la población en la demanda de tráfico a distintos niveles y teniendo en cuenta su distribución espacial, en una primera etapa se elaboró una base de datos por categorías de vehículos, donde se consolidaron datos entre los años 2015 y 2019 de tráfico, PIB departamental y población municipal.

Estos datos se obtuvieron del portal de la Agencia Nacional de Infraestructura ANI, que es la encargada de coordinar, contratar, ejecutar y administrar todos los proyectos de concesiones en Colombia. A continuación, se muestra la categorización utilizada por la ANI.





$$T_{ijk} = \mu + D_i + M_{ij} + P_{ijk}$$

$D_i$  → corresponden a la desviación de la media departamental respecto a la media muestral

$M_{ij}$  → corresponden a la desviación de la media del municipio respecto a la media departamental

$P_{ijk}$  → corresponden a la desviación de la observación respecto a la media del municipio

La anterior expresión no tiene en cuenta la temporalidad de los datos, de manera que, si se tuviese en cuenta, la media muestral ya no sería una constante sino entraría a ser una regresión lineal, debido a lo anterior el comportamiento del tráfico dentro de cada municipio y por ende departamento no va a ser el mismo. Para garantizar esa diferencia, el tiempo también debería tenerse en cuenta en los componentes aleatorios como variable explicativa de alguna de ellos (Rabe-Hesketh & Skrondal, 2008), el modelo resultante con estas condiciones es:

$$T_{ijk} = \mu + \beta_1(\text{Año}) + D_i + M_{ij} + P_{ijk}(\text{Año})$$

Para la aplicación de este modelo a los datos que se tienen, se observó que dada la naturaleza de estos y con el fin de buscar que el modelo fuera confiable, es necesario encontrar nuevas variables que expliquen mejor el comportamiento del tráfico en los distintos niveles. Por ello, en el caso del departamento se trabajó con PIB y para el caso del municipio con la cantidad de población local que se tenía, para los diferentes años de análisis.

En segundo lugar, como se trabajaban con valores de diferentes ordenes de magnitud, se ajustó el modelo estandarizando algunas de las variables y posteriormente aplicando logaritmo. Por último, con el fin de revisar realmente que efectos causaban estas variables dentro del tráfico en el modelo utilizado se decidió no tener en cuenta las constantes en las componentes aleatorias.

$$\log(T_{ijk}) = \mu + \beta_1 * \text{Añoc} + D_{i_{PIB}} * \log(PIB\ est) + M_{ij} * \log(Pob) + P_{ijk} * \text{Añoc}$$

*3 nivel*
*2 nivel*
*1 nivel*

Organizadas ya las bases de datos y habiendo establecido el modelo que se utilizará, lo que procede es ingresar los datos al programa STATA y ejecutar el modelo. La ilustración 14 muestra la salida del modelo.

*Ilustración 14. Listado variables analizadas en STATA*

variable name	storage type	display format	value label	variable label
AÑO	int	%10.0g		Años 2015 - 2019
TRAFICOVEHICU~R	long	%10.0g		Tráfico vehicular ocurrido entre los año 2015 a 2019
PIB	double	%10.0g		PIB departamental en miles de millones de pesos
POBLACIÓN	long	%10.0g		Cantidad de habitantes por municipio
AÑOC	float	%9.0g		Variable de tiempo centrada con el fin de ajustar el modelo
PIB_Z	float	%9.0g		Valor del PIB estandarizado
PIB_L	float	%9.0g		Logaritmo del PIB estadarizado, variable utilizada en este modelo
POB_Z	float	%9.0g		Valor de la población estandarizado
POB_L	float	%9.0g		Logaritmo de la poblacion estadarizada, variable utilizada en este modelo
T_Z	float	%9.0g		Logaritmo del tráfico , varible que se utilizo en la regresión
MEDMUESTRAL_LOG	float	%9.0g		Media muestral Log(Tráfico)
EFFECTODEPARTA~L	float	%9.0g		Efectos causados por el PIB a nivel Departamento
EFFECTOMUNICIP~L	float	%9.0g		Efectos causados por el Población a nivel Municipio
EFFECTOPEAJE	float	%9.0g		Efecto de variable y regresivo sobre cada observación

*Fuente: Propia*

## Resultados

### ➤ Categoría I

Regresión ML de efectos mixtos      Número de obs      =      310

Variable Grupal	No. de Grupos	Observaciones por Grupo		
		Mínimo	Promedio	Máximo
DEPARTAMENTO	19	5	16.3	40



MUNICIPIO	54	5	5.7	15
PEAJE	62	5	5	5
Log probabilidad = -297.91312		Wald chi2(1) = 11.59		Prob > chi2 = 0.0007

	Coef.	Err. Est.	z	P>z	[95% Conf. Intervalo]
AÑOC	-0.0795811	0.0233784	-3.4	0.001	-0.1254019 -0.0337603

<b>Efectos aleatorios</b>					
Parámetros	Estimado	Err. Est.	[95% Conf. Intervalo]		
DEPARTAMENTO:					
sd(PIB_L)	1.418787	0.2306289	1.031695	1.951116	
MUNICIPIO:					
sd(POB_L)	0.0751462	0.0097398	0.0582882	0.0968796	
PEAJE:					
sd(AÑOC)	0.1487852	0.0162983	0.1200375	0.1844178	
sd(Residual)	0.3374671	0.0163774	0.3068473	0.3711424	

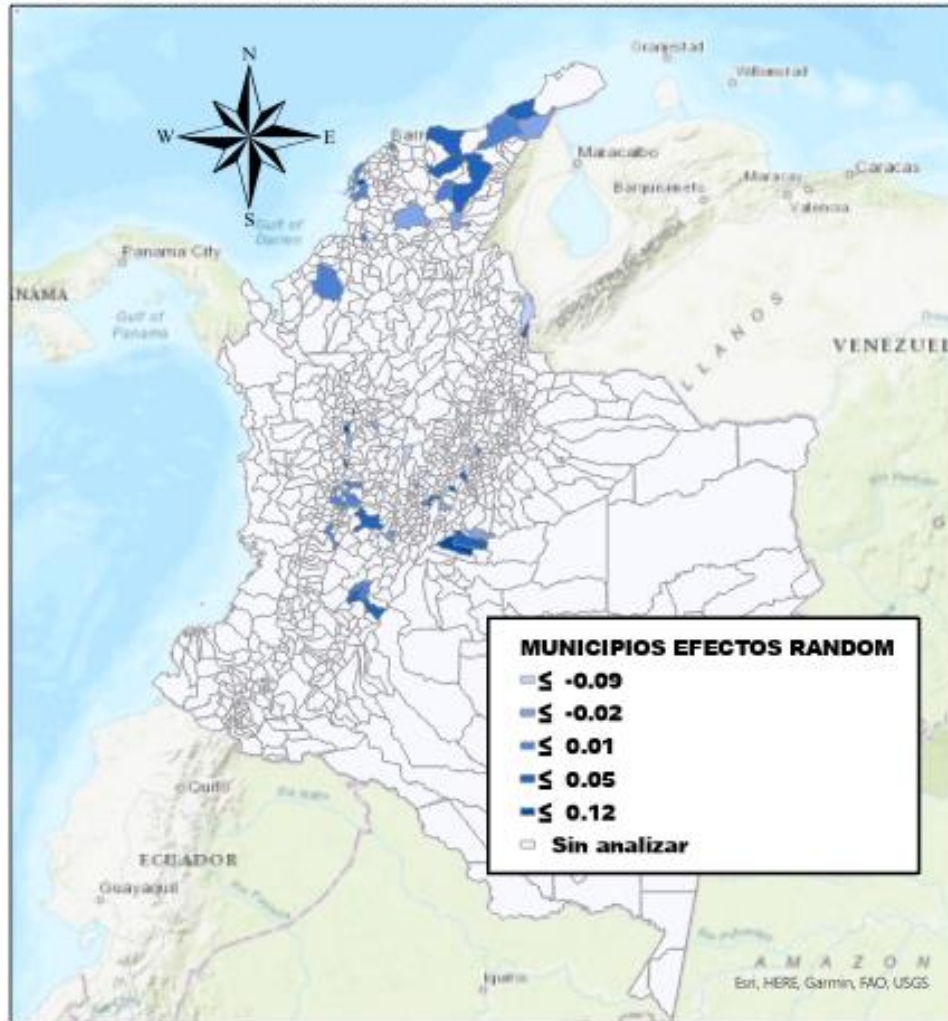
Prueba LR vs. modelo lineal:  $\chi^2(3) = 1579.64$  Prob >  $\chi^2 = 0.0000$

Tabla 3. Resultados modelo para la categoría I, Fuente: Propia

Analizando la variabilidad espacial del tráfico vehicular para la categoría I, se calculó los efectos aleatorios tanto para departamentos, municipios y en ultimo nivel para los peajes, se hallaron valores significativos para el modelo utilizado ( $\chi^2(3) = 1579.64$  Prob >  $\chi^2 = 0.0000$ ). Dichos efectos se presentan en la figura 15. La heterogeneidad se distribuye a lo largo del territorio, en el caso de los departamentos si bien no se pueden reconocer a simple vista regiones con un comportamiento similar, si es posible notar que por ejemplo en el caso de Sucre se tienen efectos aleatorios mayores, en comparación al departamento de Antioquia.



**TRÁFICO VEHICULAR CATEGORÍA I  
EFECTOS RANDOM EN MUNICIPIOS DEBIDO A LA POBLACIÓN**



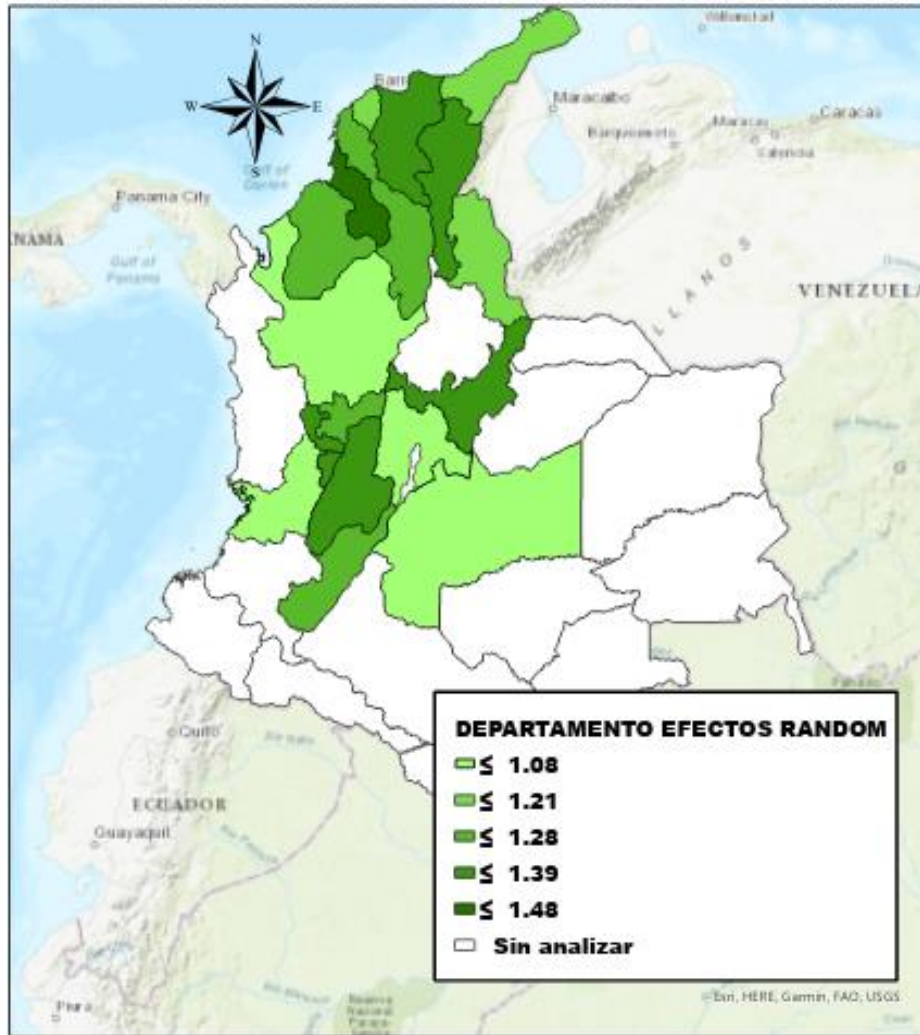
*Programa ArcGIS, Fuente: Propia*

➤ **Categoría II**



Ilustración 16 Efectos Aleatorios Categoría II.

**TRÁFICO VEHICULAR CATEGORÍA II  
EFECTOS RANDOM EN DEPARTAMENTOS DEBIDO AL PIB**







de los municipios, destacan algunos en la zona céntrica del país con valores altos de estos coeficientes aleatorios, es el caso de Villapinzón y Sesquilé, en la ilustración 16 se evidencian estos efectos.

➤ **Categoría III y IV**

Regresión ML de efectos mixtos      Número de obs = 310

Variable Grupal	No. de Grupos	Observaciones por Grupo		
		Mínimo	Promedio	Máximo
DEPARTAMENTO	19	5	16.3	40
MUNICIPIO	54	5	5.7	15
PEAJE	62	5	5	5

Log likelihood = -357.05188      Wald chi2(1) = 2.41  
 Prob > chi2 = 0.0436

	Coef.	Err. Est.	z	P>z	[95% Conf. Intervalo]
AÑOC	-0.0478843	0.02246	-1.71	0.0436	-0.1082837 0.0125152

**Efectos aleatorios**

**Parámetros      Estimado      Err. Est. [95% Conf. Intervalo]**

DEPARTAMENTO:

sd(PIB\_L) 1.202769      0.1960813      0.8738065      1.655577

MUNICIPIO:

sd(POB\_L) 0.1004472      0.0128638      0.0781498      0.1621753

PEAJE:

sd(AÑOC) 0.1291063      0.1291063      0.1291063      0.1291063

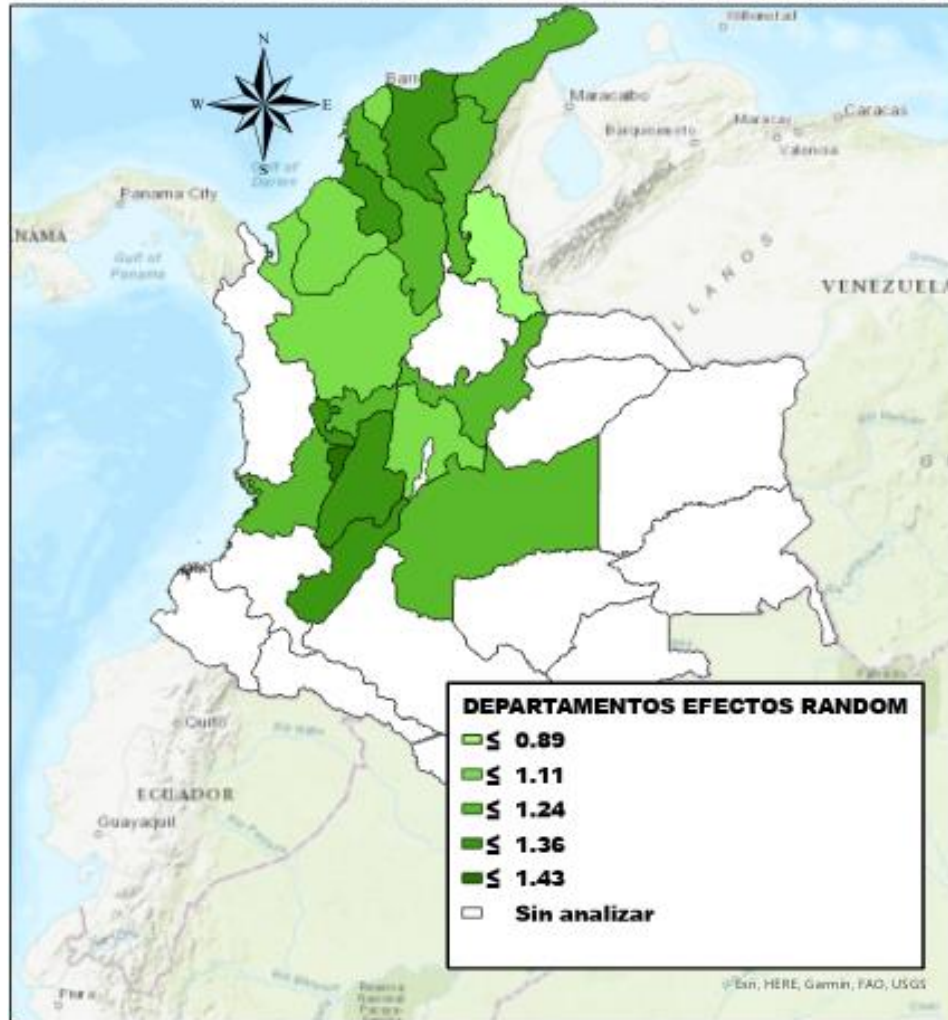
sd(Residual) 0.3374671      0.0163774      0.3068473      0.3711424

Prueba LR vs. modelo lineal: chi2(3) = 1314.76      Prob > chi2 = 0.0000

Tabla 5. Resultados modelo para la categoría III y IV, Fuente: Propia

Ilustración 17. Efectos Aleatorios Categoría III y IV

**TRÁFICO VEHICULAR CATEGORÍA III Y IV  
EFECTOS RANDOM EN DEPARTAMENTOS DEBIDO AL PIB**







presenta un valor bajo de coeficiente aleatorio en esta categoría, acompañado de municipios como Valledupar y Sopó.

➤ **Categoría V**

Regresión ML de efectos mixtos      Número de obs    =    300

Variable Grupal	No. de Grupos	Observaciones por Grupo		
		Mínimo	Promedio	Máximo
DEPARTAMENTO	18	5	16.7	40
MUNICIPIO	52	5	5.8	15
PEAJE	60	5	5	5

Log likelihood = -403.86362      Wald chi2(1) = 0.76  
 Prob > chi2 = 0.0655

	Coef.	Err. Est.	z	P>z	[95% Conf. Intervalo]
AÑOC	-0.0282648	0.0324144	-1.51	0.0655	-0.0917959    0.0352663

**Efectos aleatorios**

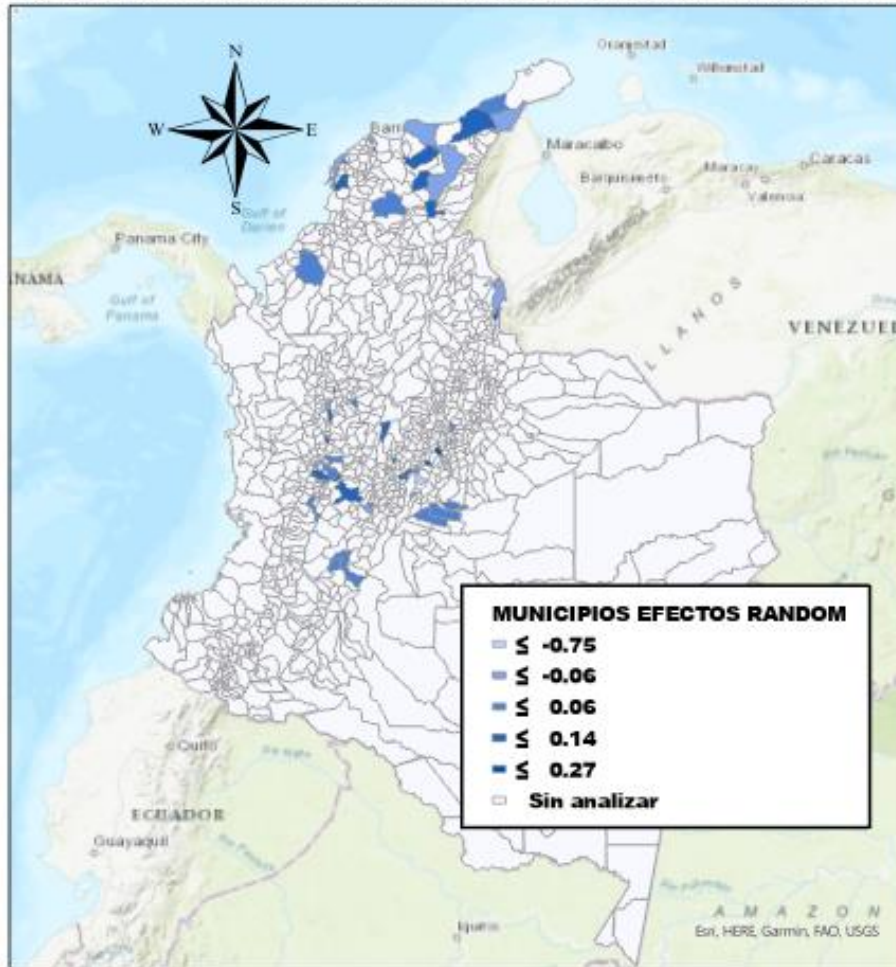
Parámetros	Estimado	Err. Est.	[95% Conf. Intervalo]
DEPARTAMENTO:			
sd(PIB_L)	1.076689	0.18313	0.7714589    1.502685
MUNICIPIO:			
sd(POB_L)	0.1928661	0.0239584	0.1511879    0.2460337
PEAJE:			
sd(AÑOC)	0.1940887	0.0229605	0.1539232    0.2447352
sd(Residual)	0.4946689	0.0242814	0.4492958    0.5446241

Prueba LR vs. modelo lineal: chi2(3) = 1154.82      Prob > chi2 = 0.0000

Tabla 6. Resultados modelo para la categoría V, Fuente: Propia



**TRÁFICO VEHICULAR CATEGORÍA V  
EFECTOS RANDOM EN MUNICIPIOS DEBIDO A LA POBLACIÓN**



*Programa ArcGIS, Fuente: Propia*

Los resultados encontrados en el modelo de esta categoría evidencian que la parte fija del modelo no resulta significativa para explicar el tráfico ocurrido, esta constante general que representa la regresión lineal con respecto al tiempo de la media no se ajusta correctamente al comportamiento del tráfico, sin embargo, los datos calculados en la parte aleatoria de los modelos presentan resultados significativos para explicar la variabilidad espacial del tráfico en los tres niveles analizados. Como

se observa en la figura 18, el departamento de Cesar presenta el mayor valor de efecto aleatorio, en comparación con el departamento de Antioquia que presenta el valor más bajo, además se observa que, la parte occidental del país mantiene valores de efectos aleatorios similares entre ellos. A nivel de municipios en general aquellos ubicados cerca a grandes centros poblados y en la parte central del país experimentan mayores cambios por los efectos aleatorios, lo que demuestra que la variable población tiene un alto impacto en los niveles de tráfico.

➤ **Categoría VI y Más**

Regresión ML de efectos mixtos      Número de obs = 175

Variable Grupal	No. de Grupos	Observaciones por Grupo		
		Mínimo	Promedio	Máximo
DEPARTAMENTO	14	5	12.5	25
MUNICIPIO	29	5	6	15
PEAJE	35	5	5	5

Log likelihood = -325.14187      Wald chi2(1) = 1.66  
 Prob > chi2 = 0.0749

	Coef.	Err. Est.	z	P>z	[95% Conf. Intervalo]
AÑOC	-0.1055267	0.0817835	-1.44	0.0749	-0.2658195    0.0547661

**Efectos aleatorios**

Parámetros	Estimado	Err. Est.	[95% Conf. Intervalo]
DEPARTAMENTO:			
sd(PIB_L)	1.093426	0.2123127	0.7473254    1.599812
MUNICIPIO:			
sd(POB_L)	0.1824673	0.0364805	0.1233119    0.2700008



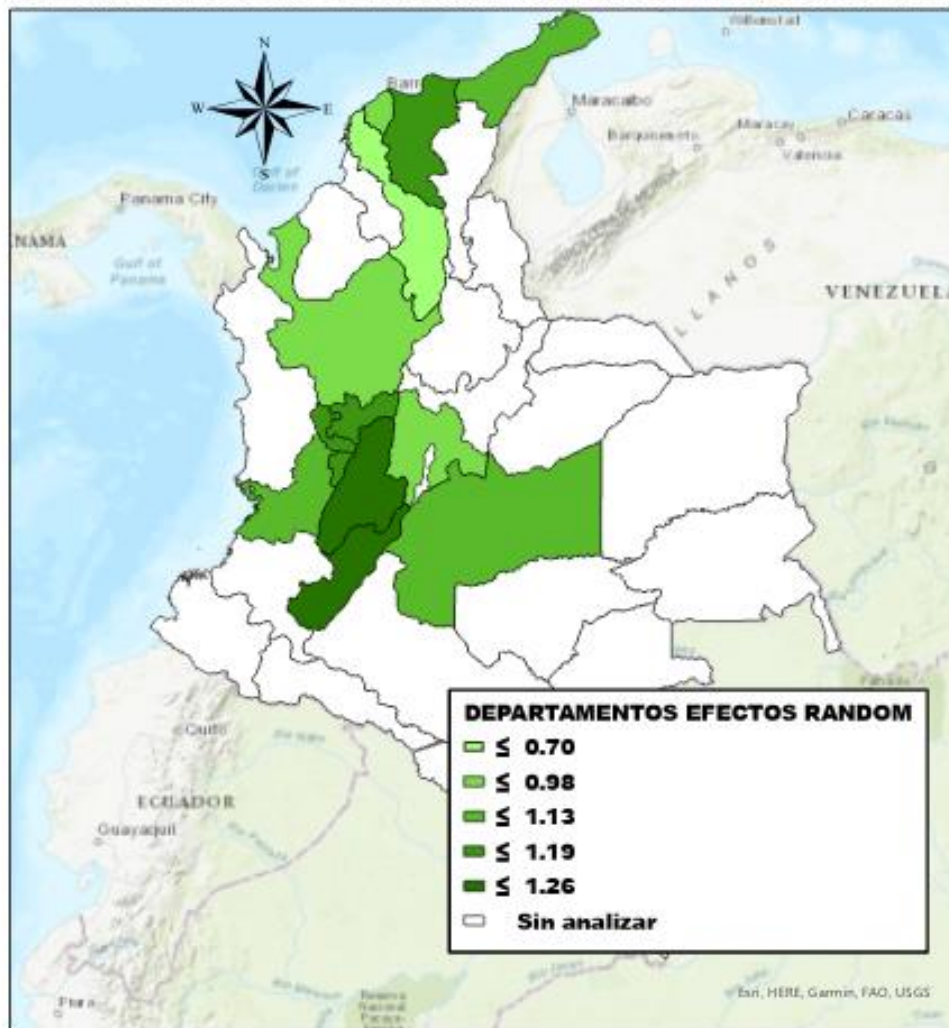
PEAJE:

sd(AÑOC)	0.393671	0.0590096	0.2934553	0.5281107
sd(Residual)	0.8767216	0.0562311	0.7731564	0.9941594
Prueba LR vs. modelo lineal: $\chi^2(3) = 509.73$		Prob > $\chi^2 = 0.0000$		

Tabla 7. Resultados modelo para la categoría VI, Fuente: Propia

Ilustración 19. Efectos Aleatorios Categoría VI

**TRÁFICO VEHICULAR CATEGORÍA VI  
EFECTOS RANDOM EN DEPARTAMENTOS DEBIDO AL PIB**





municipios, la variabilidad es notoria, por ejemplo, los municipios de Funza, Madrid y Tenjo presentan valores de efectos aleatorios altos, en comparación a municipios cercanos como la Calera y Chipaque.

➤ **Todas las categorías**

Regresión ML de efectos mixtos      Número de obs = 300

Variable Grupal	No. de Grupos	Observaciones por Grupo		
		Mínimo	Promedio	Máximo
DEPARTAMENTO	19	5	16.3	40
MUNICIPIO	54	5	5.7	15
PEAJE	62	5	5	5

Log likelihood = -313.70135      Wald chi2(1) = 9.32  
 Prob > chi2 = 0.0023

	Coef.	Err. Est.	z	P>z	[95% Conf. Intervalo]
AÑOC	-0.0742249	0.024312	-3.05	0.002	-0.1218756 -0.0265742

**Efectos aleatorios**

Parámetros	Estimado	Err. Est.	[95% Conf. Intervalo]
DEPARTAMENTO:			
sd(PIB_L)	1.465332	0.2380894	1.065692 2.01484
MUNICIPIO:			
sd(POB_L)	0.0675947	0.009022	0.0520356 0.087806
PEAJE:			
sd(AÑOC)	0.1509671	0.0171266	0.1208696 0.1885592
sd(Residual)	0.3666344	0.0177555	0.3334347 0.4031397

Prueba LR vs. modelo lineal: chi2(3) = 1565.78      Prob > chi2 = 0.0000

Tabla 8. Resultados modelo para todas las categorías, Fuente: Propia







0.0023) como en la parte aleatoria ( $\chi^2(3) = 1565.78$  Prob >  $\chi^2 = 0.0000$ ). en la figura\_ se muestra cómo se distribuyen espacialmente en el territorio colombiano dichos efectos, en general se pudo notar que los valores de coeficientes aleatorios en los departamentos de Sucre y Quindío fueron más altos que en el resto de los departamentos, indicando una gran influencia del PIB, siendo esta positiva dentro del tráfico vehicular. Para el caso de los municipios se observa que Cúcuta y Chipaque son los que poseen los más bajos valores efectos aleatorios y siendo estos efectos negativos para el tráfico vehicular, teniendo para este nivel como variable explicativa la población.

## Conclusiones

Se logró consolidar la información recolectada en un total de siete bases de datos, las cuales contenían información de tráfico, PIB departamental y la población municipal para los años comprendidos entre 2015 y 2019. La información también se filtró de acuerdo con la categoría de los vehículos. se Aplicó un modelo panel multinivel con ayuda del programa STATA teniendo en cuenta la temporalidad en los datos, realizando así un análisis completo de los efectos aleatorios causados espacialmente en los diferentes niveles de evaluación y teniendo en cuenta solamente la variabilidad causada por las variables del producto interno bruto PIB en el departamento, la población en los municipios y para el caso de los peajes se tuvo en cuenta el tiempo, variable que ayudo para que en todo los modelos se estimara efectivamente una línea de regresión distinta para cada uno de los peajes. En general se confirmó que tanto espacial como jerárquicamente en los niveles los efectos aleatorios cambian, en los departamentos se mantuvieron valores de coeficientes aleatorios positivos en los modelos analizados por categorías y en forma general, indicando así que el PIB es una variable que puede llegar a explicar

e influir positivamente en la generación de tráfico a nivel departamental. En el caso de los municipios de igual forma se mantuvo la variabilidad de los efectos aleatorios, persistiendo siempre que los municipios analizados en la parte céntrica del país tenían valores de coeficientes aleatorios positivos.

Este trabajo es un ejemplo de análisis espacial del comportamiento del tráfico que podría complementarse y ajustarse aún más con la inclusión de otras variables en los distintos niveles de análisis, además de que es importante tener en cuenta que también es posible a partir del modelo planteado y con los cálculos de los efectos causados por las variables explicativas que se trabajen, llegar a calcular o estimar el tráfico vehicular futuro que se tendrá y como éste se distribuye espacialmente.

## Referencias

Ley 80 de 1993, (1993).

Cruz, C. O., & Sarmiento, J. M. (2019). Traffic forecast inaccuracy in transportation: a literature review of roads and railways projects. In *Transportation* (Issue 0123456789). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s11116-019-09972-y>

Odeck, J., & Welde, M. (2017). The accuracy of toll road traffic forecasts: An econometric evaluation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 101, 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.001>

Paranaíba de Carvalho, A., Fonseca Pallavicini, A., & Costa De Jesus Barros, A. (2016). Review and suggestions to the demand forecast model in highway concessions projects in Brazil. *Journal of Research in Economics and International Finance (JREIF)*, 5(1)(October), 008–013.

