

ANÁLISIS SOCIOESPACIAL DE LA RED VIAL PRIMARIA DE COLOMBIA

Por:

WILLIAM ALBERTO MARTÍNEZ DÍAZ

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Presentado a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en cumplimiento  
de los requisitos para el grado de

MAGÍSTER EN GEOGRAFÍA

Programa de Estudios de Posgrado en Geografía EPG, Convenio UPTC - IGAC

Tutora: Doctora NOHRA LEÓN

Bogotá, D. C., 2015

## RESUMEN

En el presente trabajo se aborda el tratamiento estructural - morfológico de la red vial primaria de Colombia, identificando su accesibilidad como la variable principal, de manera que ésta pueda ser explicada a partir de variables de tipo socioeconómico disponibles para los municipios nodales, como lo son la población, el Índice de Pobreza Multidimensional, la ocurrencia de eventos asociados al conflicto armado interno, el potencial de población y los flujos generados por ésta.

Los métodos de análisis se fundamentan en el análisis de grafos para representar y describir estructuralmente la red, contándose entre ellos la variable accesibilidad. De otra parte, se recurre a los métodos de análisis espacial sobre Sistemas de Información Geográfica, concretamente las medidas de centralidad, medidas de interacción espacial y métodos de correlación espacial para construir una explicación de la accesibilidad a partir de las demás variables enunciadas, las cuales se consideran explicativas.

Los resultados alcanzados permiten satisfacer estadísticamente de manera parcial los objetivos propuestos, hecho que se puede explicar a partir de las limitaciones encontradas en la disponibilidad de información tanto en el sentido espacial como el temporal. No obstante, el trabajo recorre un camino metodológico de tipo experimental que sirve como base para la implementación de trabajos futuros en esta dirección.

Desde el punto de vista geográfico, el trabajo aborda el tema de las redes viales desde una perspectiva estructural y genera elementos de utilidad para el análisis de las interacciones espaciales entre municipios, así como la articulación del territorio y su relación con el sistema reticular conformado por las redes de transporte. Su campo de aplicación permite considerar otros modos de transporte, así como diferentes esquemas espacio-temporales.

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a las personas más importantes de mi vida: Sofía, Vilma, Daniel, Luis, Mery y Eyi, quienes de una u otra forma me alentaron y brindaron el soporte para continuar, a pesar de las dificultades, y supieron disculpar mi distanciamiento durante este tiempo.*

*Doy infinitas gracias a la vida por contar con ellos, mi hermosa familia.*

## **AGRADECIMIENTO**

Para realizar este trabajo conté con el invaluable apoyo, motivación y confianza de una serie de personas quienes desde los ámbitos personal y profesional me acompañaron y me colaboraron en las diferentes etapas del proceso. A todas ellas muchas gracias, muy especialmente a la Doctora Nohra León.

Al profesor Johan Avendaño y a Liliana Baquero, por su ayuda, su paciencia y su especial calidez.

A las ingenieras Sandra Y. Rodríguez y Sandra P. Rincón, por su comprensión y respaldo.

A los colegas quienes aportaron datos y bibliografía.

A los profesores Alberto Boada y Mauricio Ramírez quienes amablemente revisaron y evaluaron este proyecto.

A los profesores de la Maestría en Geografía de la UPTC.

## TABLA DE CONTENIDO

1	OBJETIVOS .....	11
1.1	Objetivo General .....	11
1.2	Objetivos específicos .....	11
2	HIPÓTESIS.....	12
3	MARCO TEÓRICO.....	13
3.1	Geografía del transporte.....	13
3.2	Redes y redes de transporte.....	16
3.3	Teoría de Grafos .....	19
3.4	Elementos de la interacción socioespacial .....	26
3.5	Elementos del análisis espacial .....	29
3.6	Variables explicativas socioeconómicas .....	33
3.6.1	Población.....	33
3.6.2	Pobreza.....	34
3.6.3	Conflicto armado.....	35
4	METODOLOGÍA .....	37
4.1	Fuentes de información.....	37
4.2	Escala .....	41
4.3	Temporalidad .....	42
4.4	Descripción de variables .....	43
4.4.1	Red vial nacional.....	43
4.4.2	Grafo de la red vial nacional primaria.....	51
4.4.3	Población 2005.....	53
4.4.4	Índice de pobreza multidimensional -IPM-.....	54
4.4.5	Datos sobre el conflicto armado interno .....	54
4.4.6	Indicadores de interacción socioespacial .....	56
5	PROCESAMIENTO DE DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS .....	61
5.1	Medidas de centralidad .....	61

5.2	Medidas de autocorrelación espacial y mapeo de clusters.....	62
5.2.1	Índice de Moran para la variable población 2005.....	64
5.2.2	Índice de Moran para la variable IPM 2005.....	66
5.2.3	Índice de Moran para la variable Conflicto.....	67
5.2.4	Índice de Moran para la variable Potencial de Población.....	68
5.2.5	Índice de Moran para la variable Flujo.....	69
5.2.6	Índice de Moran para la variable Omega.....	71
5.3	Modelado de relaciones espaciales.....	72
5.3.1	Mínimos Cuadrados Ordinarios.....	72
5.3.2	Regresión Geográficamente Ponderada (GWR).....	75
6	CONCLUSIONES.....	79
7	REFERENCIAS.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pluralidad metodológica y conceptual en la geografía de los transportes. Fuente: elaboración propia a partir de Geografía de los Transportes, 2004. ....	15
Figura 2. Red vial nacional primaria representada como grafo no dirigido en el espacio absoluto. Los nodos representan los municipios conectados y los arcos son las distancias rectas, euclidianas entre nodos. Fuente: elaboración propia.....	21
Figura 3. Grafo no dirigido de la red vial nacional, en espacio relativo. Fuente: elaboración propia.....	22
Figura 4. Esquema metodológico del proyecto. Fuente: elaboración propia.....	41
Figura 5. Red vial nacional de primer orden. Fuente: elaboración propia.....	43
Figura 6. Tramos concesionados a cargo de la ANI a 2014 y red vial nacional primaria. Fuente: elaboración propia. ....	49
Figura 7. Grafo de la red vial nacional. Los tonos y el tamaño de los nodos representan la centralidad de cada uno. Fuente: elaboración propia.....	52
Figura 8. Mapa de tipología del conflicto armado en Colombia por municipio entre 200 y 2012. Fuente CERAC. ....	56
Figura 9. Medidas de centralidad. Fuente: elaboración propia.....	61
Figura 10. Valores p y Z. Fuente: ArcGIS.....	64
Figura 11. Distribución de la variable población para el año censal 2005 e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia. ....	64
Figura 12. Distribución de la variable IPM para el año 2005 e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.....	66
Figura 13. Distribución de la variable CONFLICTO e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.....	68
Figura 14. Distribución de la variable Potencial de Población e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.....	69
Figura 15. Distribución de la variable Flujo e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.....	70
Figura 16. Distribución de la variable Accesibilidad (omega) e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.....	71
Figura 17. Distribución de los residuales de la regresión mediante mínimos cuadrados ordinarios. Fuente: elaboración propia.....	74
Figura 18. Resultados de la regresión GWR: Coeficientes de correlación, residuales, número de condición y predicción. Fuente: elaboración propia. ....	77

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz topológica de conectividad (MC). Fuente: elaboración propia. ....	23
Tabla 2. Matriz de accesibilidad (MA), número asociado y número Shimbel. Fuente: elaboración propia. ....	24
Tabla 3. Matriz de Flujos (MF) entre nodos directamente conectados. Fuente: elaboración propia. ....	28
Tabla 4. Fuentes de información empleadas en el proyecto. Fuente: elaboración propia. ....	39
Tabla 5. Herramientas informáticas empleadas en el proyecto. Fuente: elaboración propia. ....	40
Tabla 6. Información consolidada para cada nodo. Fuente: elaboración propia. ....	60
Tabla 7. Resumen de resultados de OLS para todas las variables del modelo y diagnóstico generado por ArcGIS. Fuente: elaboración propia. ....	73



## INTRODUCCIÓN

El estudio de las redes de transporte se enmarca en el ámbito de la geografía económica, concretamente en la geografía del transporte y cuenta entre sus realizaciones buscar explicaciones a los fenómenos de accesibilidad, conectividad, relaciones espaciales y configuración territorial.

Las redes viales, de manera similar a los sistemas de irrigación contribuyen a la caracterización de los territorios y, a su vez, son influenciados por estos. Normalmente se parte de la premisa de que la presencia de las redes viales contribuyen al desarrollo socioeconómico y, si bien esto se cumple en términos generales, existen factores como las decisiones políticas o económicas que matizan la influencia de las vías, pudiendo llegar a condicionarlas de tal forma que su carácter social se ve comprometido en beneficio de intereses propios de los grupos de poder.

El trazado de una red vial es un proceso de construcción social y su evolución está sujeta a los ritmos económicos. Por lo tanto, el estado de las redes viales, en cuanto a su cobertura, dinámica, desarrollo y características constructivas, refleja el grado de desarrollo que disfrutan, o padecen, las regiones cobijadas por el tejido vial.

Teniendo en cuenta estas premisas, este proyecto tiene como núcleo el análisis de la red vial nacional primaria de Colombia, abordando sus componentes geométricas estructurales y buscando una explicación de dicha estructura a partir de su relación con variables de tipo socioeconómico.

Este tipo de análisis se justifica en la medida que la mayor parte de la atención sobre la red vial nacional primaria se centra en las mejoras propias de los contratos de concesión y la enorme carga de propaganda gubernamental alrededor de estas obras. Se enfatizan las componentes propias de la ingeniería y se dejan de lado visiones relacionadas con la accesibilidad y las desigualdades regionales.

Siendo un hecho que Colombia es un país altamente heterogéneo, tanto en sus ámbitos natural como socioeconómico, es de esperarse que la red vial primaria no haya contribuido significativamente a mejorar las condiciones de vida, particularmente en las regiones más apartadas, localizadas en la periferia de la red. Es claro que la red vial en sí misma no es el único factor que caracteriza un territorio, pero su papel sí es determinante.

La red vial nacional ha sido construida siguiendo los lineamientos del momento político sin un enfoque claro basado en criterios de planificación a largo plazo e integración nacional. Por el contrario, los ejes fundamentales procuran conectar la red hacia afuera; es decir, hacia los puertos, obedeciendo las necesidades del mercado y dejando pendiente la atención de los mercados internos y el transporte de personas y cosas entre las regiones vecinas intranacionales.

Se espera que los resultados alcanzados en este trabajo generen, por lo menos inquietudes sobre estos temas y que el esquema metodológico seguido se pueda articular con análisis de tipo económico incorporando un conjunto de variables más amplio y significativo para tratar de entender las complejas relaciones existentes entre la red vial nacional y los colombianos.

# **1 OBJETIVOS**

## **1.1 Objetivo General**

- Examinar la red vial nacional primaria de Colombia con base en técnicas del análisis espacial, e identificar relaciones explicativas de su accesibilidad a partir de variables socioeconómicas en el nivel municipal.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Comparar la accesibilidad de los municipios nodales de la red vial primaria con las variables socioeconómicas población, índice de pobreza multidimensional y conflicto armado interno.
- Realizar un análisis de correlación espacial para las variables involucradas.
- Explicar estadísticamente la estructura de la red vial nacional primaria y su relación con aspectos sociales y económicos del orden nacional.

## **2 HIPÓTESIS**

La red vial nacional primaria es una componente vital de la infraestructura nacional e importante elemento de articulación regional. La accesibilidad de dicha red se halla condicionada, en lo estructural, por deficiencias en cuanto al número de conexiones existentes y, en lo socioeconómico, por ser un constructo influenciado por disposiciones jurídicas y administrativas, así como las condiciones socioeconómicas de los municipios que dicha red conecta. En consecuencia, se desea responder a la pregunta ¿cuál es el grado de explicación que se puede obtener para la accesibilidad partir de variables socioeconómicas?

### **3 MARCO TEÓRICO**

La construcción teórica que sirve como soporte al presente trabajo se fundamenta principalmente en la geografía económica, la teoría de redes y grafos, los elementos de interacción espacial y técnicas del análisis espacial, particularmente medidas de correlación. De otra parte, se describen las variables incorporadas al análisis, las cuales, se han seleccionado a partir de los criterios de pertinencia temática y disponibilidad, particularmente en los sitios web de las entidades productoras de información sobre redes viales y datos socioeconómicos en Colombia.

#### **3.1 Geografía del transporte**

La Geografía del Transporte se cuenta entre las disciplinas que más aportes han realizado al análisis de las redes de carreteras. Su campo de estudio abarca los movimientos de personas, carga e información, así como la relación recíproca existente entre la actividad del transporte y el desarrollo social, particularmente en los ámbitos económico, histórico, político y ambiental (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2013).

Es posible entender el transporte como sistema arterial de la organización regional que posibilita los flujos de mercancías y personas (Lopez Trigal, Rio Fernandes, Savério Sposito, & Trinca Figuera, 2015). El estudio del transporte involucra diferentes campos del conocimiento, siendo la Economía y la Geografía los dos dominios desde los cuales se aborda el problema de las redes viales con mayor frecuencia dada su relación estrecha con el concepto de desarrollo. Las vías son de significativa importancia en el desarrollo de un país (Pérez V. G. J., 2005).

La geografía del transporte, puede definirse como una parte integral de la geografía económica, siendo ésta, a su vez, el estudio de las interrelaciones entre la actividad económica y el espacio (Méndez, 1997) o de la localización de las actividades económicas y sociales (Bonet, 2007). Su objetivo consiste en analizar los efectos del

transporte en el sistema socioeconómico, asignándole un papel central al problema de la accesibilidad y aportando sus resultados al análisis del desarrollo regional (Csongor, 2011).

Identificada como un campo de la geografía humana, «*la geografía del transporte busca comprender el movimiento de personas y bienes, así como la organización espacial de los sistemas que facilitan tales intercambios*» (Warf, 2006); o también, estudia los movimientos y sus modelos espaciales, la estructura de las redes y las dinámicas espaciales que estas generan (Seguí Pons & Martínez Reynés, 2004).

En la misma dirección, pero en relación con la infraestructura del transporte, la Corporación Andina de Fomento plantea que ella no garantiza en sí misma el desarrollo regional, pero que es necesaria para que éste tenga lugar (Vasallo Magro & Izquierdo de Bartolomé, 2010).

Bajo esta óptica, resulta usual plantear el binomio redes de transporte y desarrollo socioeconómico como expresión de los logros de la inversión estatal y su consecuente beneficio social. Sin embargo, esta concepción se matiza como consecuencia de las condiciones bajo las cuales se identificó la necesidad y se formuló la inversión.

Se requiere de nuevos abordajes teóricos y metodológicos para analizar el rol de las redes en la conformación del territorio (Blanco, 2009). En consecuencia, es necesario recurrir a la pluralidad conceptual y metodológica para la geografía de los transportes en el presente (Seguí Pons & Martínez Reynés, 2004).

En la Figura 1 se muestran algunas de las principales disciplinas que constituyen el análisis del transporte –y sus redes–. Esta conjunción es parte de un espectro más amplio, constituido por la confluencia de las Geografías del Transporte, la Económica y la Regional, los enfoques humanistas y sociales y el enfoque espacio-temporal, (Seguí Pons & Martínez Reynés, 2004).

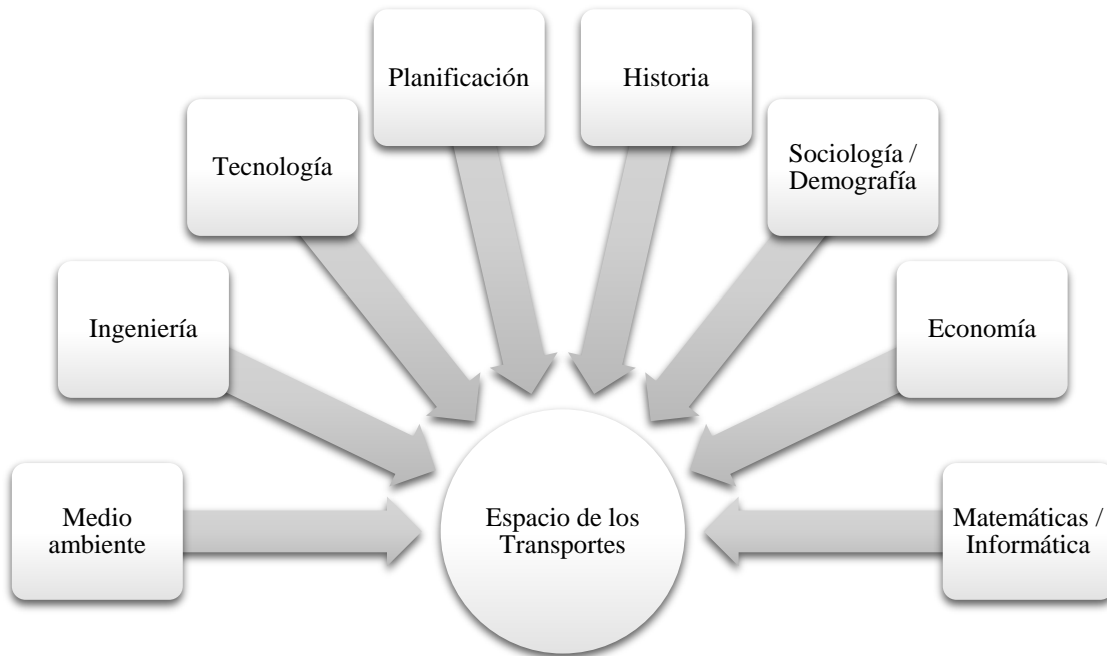


Figura 1. Pluralidad metodológica y conceptual en la geografía de los transportes. Fuente: elaboración propia a partir de *Geografía de los Transportes*, 2004.

La consideración del espacio de los transportes como una zona de interacción entre diferentes disciplinas diluye la apropiación del tema por parte de un campo exclusivo del conocimiento. Desde una perspectiva económica «*El transporte y la economía siempre han ido de la mano. Muchos desarrollos metodológicos en la teoría económica han emergido de la esfera del transporte*» (Coto-Millán & Inglada, 2007). Para estos autores, una característica del transporte es que es un servicio que puede utilizarse como factor intermediario en el proceso de producción o formar parte de un consumo doméstico.

Además de este enfoque económico, la geografía del transporte, también está vinculada estrechamente con las geografías del comercio y las telecomunicaciones y se relaciona con la geopolítica, las geografías históricas de la guerra, la producción y el desarrollo urbano (Hugill, 2009).

En este ámbito interdisciplinario, la geografía del transporte complementa las contribuciones sus ciencias concomitantes aportando tanto la perspectiva espacial como la teorización y conceptualización de las relaciones entre las personas y los lugares, haciendo énfasis en la accesibilidad y la movilidad como el centro de la interacción espacial (Knowles, 2009).

La coexistencia de las diferentes disciplinas es *«propia de las tendencias posmodernas que caracterizan el desarrollo de la geografía y el de otras ciencias sociales, y que conducen a introducir conceptos nuevos como son la relativización y el eclecticismo»* (Seguí Pons & Martínez Reynés, 2004). A partir de esta integración, se han generado fenómenos de expansión, fragmentación e hibridación, los cuales han desdibujado los perfiles iniciales y las barreras interdisciplinarias, conduciendo a una visión más integrada de la realidad a interpretar (Méndez, 1997).

Esta primera imagen de la geografía del transporte, tanto en su composición y sus relaciones con otras disciplinas, requiere para su mejor comprensión que se aborden los conceptos más frecuentemente tratados en su estudio, procurando delimitar la exposición al campo específico de la investigación.

### **3.2 Redes y redes de transporte**

En términos generales, una red (abstracta) puede describirse como la infraestructura física o los patrones de interacción que pueden representarse como un conjunto de puntos conectados por un conjunto de enlaces (Kuby, Roberts, Upchurch, & Tierney, 2009). En el caso del transporte tales puntos y enlaces, así como sus servicios asociados, conforman una red. Esto es, su concatenación organizada, favoreciendo una mayor densidad de activos físicos o el número de usuarios (Ramos Martel, 2011).

En su forma más pura, las redes consisten en un arreglo matricial de mediciones, permitiendo observar relaciones entre actores, en este caso nodos, y observar cómo estos se ubican dentro del contexto general de la red. Así, en el análisis de redes se



observan los datos de una manera diferente, usualmente orientada a la visión estructural y holística del conjunto de actores (Hanneman & Riddle, 2005).

Una red, tanto social, como del transporte, es un conjunto específico de vínculos entre un conjunto definido de personas, con la propiedad adicional de que tales vínculos pueden emplearse como un todo para interpretar el comportamiento social de las personas involucradas (Glucker, 2007).

A partir de estas concepciones emerge la idea de la teoría de redes como la investigación sobre la topología global y los patrones estructurales de las interacciones entre los elementos que conforman un número de sistemas complejos, incluyendo grupos sociales, la infraestructura, el cerebro y las redes biológicas (Menichetti, 2014).

A pesar de su simplicidad, las redes, vistas como conexiones regulares entre nodos, se emplean ampliamente en las ciencias naturales y sociales. En el tratamiento de temas contemporáneos como *Big Data*, el internet de las cosas, el aprendizaje de máquina, la inteligencia artificial, entre otros, se recurre al análisis de redes para desglosar las relaciones internas entre los componentes de la red (Dehmer, 2011).

En relación con las redes de transporte, la manera más frecuente de abordar su estudio consiste en representarlas como un conjunto de arcos (enlaces) y nodos. Los arcos pueden ser dirigidos, indicando la dirección del movimiento, o no dirigidos (bidireccionales) y representan los movimientos entre los nodos, siendo estos, puntos en el espacio-tiempo. Así, la relación entre arcos y nodos se define como topología de la red. No obstante, esta aproximación tiende a ser actualizada o sustituida por nuevos modelos, a fin de representar la infraestructura vial en suficiente detalle (Bell & Iida, 1997).

Desde un enfoque sociotécnico<sup>1</sup>, las redes son sistemas compuestos por un grupo de componentes y subsistemas relacionados, para los cuales el grado y la naturaleza de las relaciones no siempre son claramente comprendidos; además, ellos generan impactos de larga duración sobre amplias zonas geográficas y son afectados por aspectos sociales, políticos y económicos (Mostashari, 2011).

Esta definición, propia de la visión sistémica, se relaciona usualmente con la tecnología y las redes sociales. Sin embargo, su contenido resulta aplicable al ámbito del transporte y, de manera implícita, reconoce la necesidad de comprender los fenómenos, cada vez más, a partir de su complejidad.

Si bien esta definición corresponde al presente, entraña elementos comunes a los diferentes momentos históricos. Y esta conexión hacia el pasado conlleva a observar las redes como elementos estrechamente relacionados con la organización del territorio, particularmente con la localización e interacción de las actividades (Offner, 2000).

En el caso del transporte, su problema principal se sintetiza en establecer, en términos de costos, el flujo más eficiente de bienes a través de una red de puntos de demanda y oferta (Johnston, 2009). Esta visión económica se articula con la preocupación por la localización de los centros emisores y receptores de los flujos comerciales (Seguí Pons & Petrus Bey, 1991).

Esta articulación entre la morfología reticular y la práctica social, conduce a las nociones de utilidad e importancia de las redes viales. Esta última se concreta en los dominios social, territorial y económico dado que permiten realizar los desplazamientos, generalmente cohesionan los asentamientos territoriales y facilitan la activación económica de los sitios interconectados (Subero Munilla, 2009)

---

<sup>1</sup> Un sistema sociotécnico es una entidad conformada por componentes sociales/institucionales y tecnológicos/físicos dependientes e interactuantes, caracterizada por entradas, procesos/acciones y salidas/productos (Mostashari, 2011)

Para Delfina Gudiño, las redes de transporte forman parte de los elementos de la infraestructura, las cuales conforman mallas vinculando ejes o nodos, las cuales alteran la relación espacio-tiempo y *«generan efectos estructurantes o desestructurantes en el territorio»* (Gudiño, 2008).

Además, a partir de esta relación entre la geometría de la red y su importancia económica, las redes de transportes se plantean como *«el sistema arterial de la organización regional que posibilita la circulación de los flujos de mercancías y personas. La noción de red descansa en los conceptos de diversidad y heterogeneidad territorial, en la distribución de los puntos de producción y consumo»* (López Trigal, Rio Fernandes, Savério Sposito, & Trinca Fighera, 2015).

### **3.3 Teoría de Grafos**

Un grafo consiste en un conjunto de puntos (nodos, nudos o vértices) y un conjunto de relaciones entre pares de puntos (arcos, segmentos o aristas). En geografía, los puntos pueden ser lugares, ciudades, intersecciones viales, etc. En el caso que la relación entre nodos es recíproca e igual, se habla de grafos no dirigidos, en los casos en que hay relación desigual y recíproca o no recíproca se trata de grafos dirigidos (Tinkler, 1977).

La teoría de grafos (como rama de la topología) se puede utilizar en el análisis morfométrico de las redes, el cual, por su carácter explicativo, permite conocer la estructura de la red (Seguí Pons & Petrus Bey, 1991). Este enfoque estructural del análisis de redes es el empleado en el presente trabajo. De hecho, más que el interés por disgregar los elementos de tipo ingenieril, relacionados con el diseño geométrico, la construcción, el tipo de capa de rodadura, etc., se busca identificar los principales elementos estructurales y a partir de ellos identificar relaciones con otras variables.

Manteniendo esta línea de trabajo, se observa que el empleo de los grafos en geografía permite evidenciar relaciones que no son perceptibles al estar combinadas con elementos distractores de información, aún en detrimento de la exactitud y las características del terreno. De este modo, las medidas desprendidas del análisis con grafos pueden indicar la verdadera estructura y funcionamiento de la red (Madrid Soto & Ortiz López, 2005).

Esta abstracción, es decir, la representación y análisis estructural de las redes mediante grafos, permite hacer el modelado de situaciones del mundo real, lo cual conduce a develar importante información sobre la estructura topológica asociada a matrices y vectores propios de las redes (De la Peña, 2012). En este sentido, no obstante su aparente simplificación, la teoría de grafos sirve como insumo para abordar la valoración de sistemas grandes y complejos.

Por tratarse de un análisis centrado en una imagen de la red vial nacional, en lugar de una secuencia que muestre su evolución, las características a considerar como grafo son de tipo estático; es decir morfología y conectividad, lo cual ayuda a establecer su grado de madurez (Seguí Pons & Martínez Reynés, 2004).

A manera de ilustración concreta para el caso del proyecto, la Figura 2 muestra la red vial nacional primaria representada como un grafo no dirigido. En ella se mantiene la localización espacial real de los nodos y los arcos se han convertido en distancias planas, de tipo euclidiano. Una característica importante de esta representación es que se halla en el espacio absoluto; es decir, el definido por las coordenadas planas, propias de la proyección cartográfica y el sistema de georeferenciación empleado.

De la misma forma, la red, representada como grafo (Figura 3) no está asociada a la posición espacial de cada nodo, sino a las conexiones entre ellos. Aunque está planteada en un espacio relativo, de manera similar a como ocurre en las redes sociales, permite observar relaciones que no son tan claras en la geometría original. Se trata de una representación en un espacio libre de coordenadas geográficas.

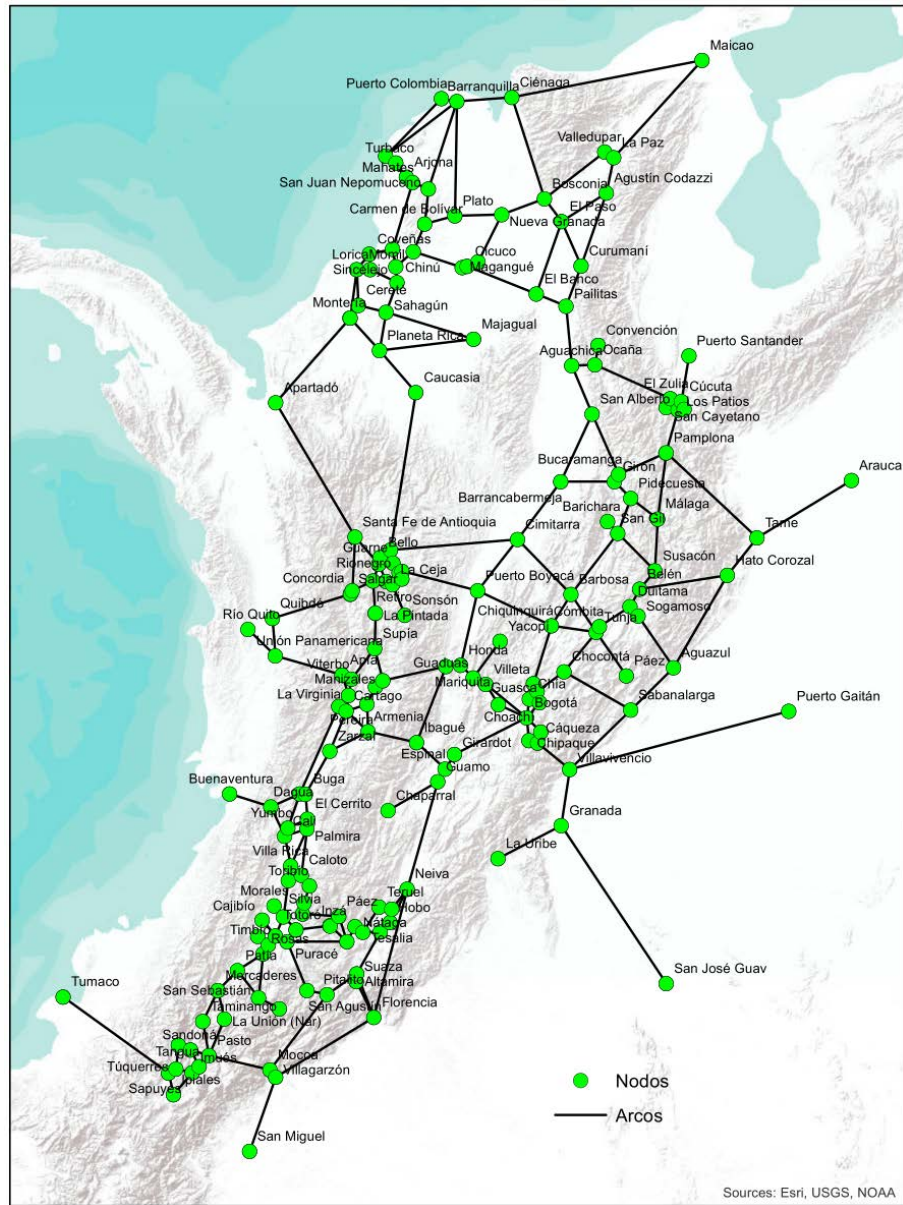


Figura 2. Red vial nacional primaria representada como grafo no dirigido en el espacio absoluto. Los nodos representan los municipios conectados y los arcos son las distancias rectas, euclidianas entre nodos. Fuente: elaboración propia.

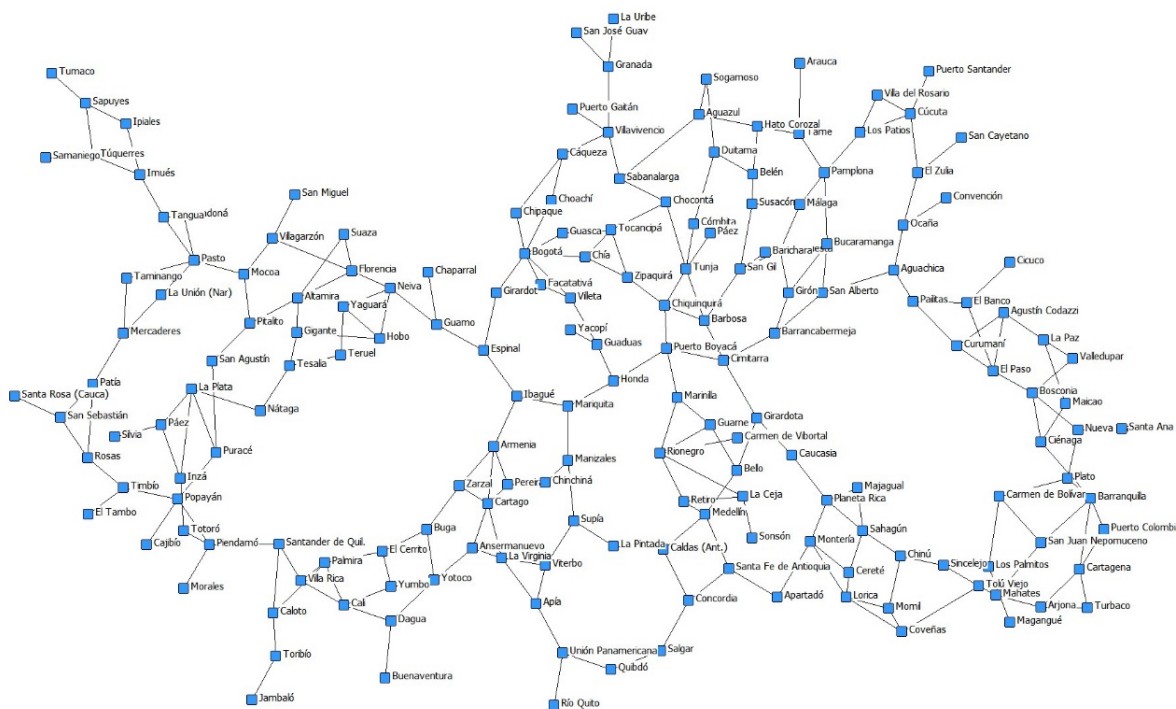


Figura 3. Grafo no dirigido de la red vial nacional, en espacio relativo. Fuente: elaboración propia

Una vez construido el grafo, se calculan los elementos que permitirán estimar su estructura topológica. Entre los múltiples indicadores que se pueden obtener en la teoría de grafos, se utilizan en este trabajo los más frecuentemente aplicados a las redes de transporte. En este sentido, se utilizan los relacionados con la conexión y la accesibilidad.

Para el efecto, entendiendo la conexión como el grado de comunicación recíproca existente entre los diferentes nodos (Seguí Pons & Petrus Bey, 1991), se utilizan los índices que han sido estimados en trabajos como la red vial de la Sabana de Bogotá (Madrid Soto & Ortiz López, 2005), la Provincia de Corrientes (Insaurralde & Cardozo, 2010), la Provincia de Almería (García Lorca, 1979) y la Provincia de Buenos Aires (Principi, 2012):

Entre los elementos descriptivos se cuenta a razón de sinuosidad, la cual es el cociente entre la longitud real de la red y la longitud del grafo  $S = L_r/L_G$ ; la densidad del grafo que equivale a la sumatoria de las longitudes de los arcos sobre el área total del grafo  $D = \frac{\Sigma \text{longitudes}}{\text{Área total}}$ ; el índice beta que relaciona el número de arcos con el número de nodos  $\beta = \text{No. de arcos} / \text{No. de nodos}$ ; el índice gamma, que relaciona el número de arcos existentes con el número máximo posible  $\gamma = 2a / N(n - 1)$ ; el número de circuitos que contiene la red, expresado como número cicломático  $NC = (a - (n - 1))$ ; la relación entre circuitos existentes y el máximo necesario para alcanzar una red completa o cerrada  $\alpha = NC / 2(n - 5)$ .

Dos elementos clave en la construcción del grafo son la matriz de conectividad (o de adyacencia), la cual es un cuadro de doble entrada que relaciona las conexiones directas entre nodos. A manera de ejemplo, la Tabla No. 1 muestra la conectividad entre seis de los 181 nodos objeto de estudio.

MC	Maicao	La Paz	Ciénaga	Agustín Codazzi	Valledupar	El Paso
Maicao	0	1	1	0	0	0
La Paz	1	0	0	1	1	0
Ciénaga	1	0	0	0	0	0
Agustín Codazzi	0	1	0	0	0	1
Valledupar	0	1	0	0	0	0
El Paso	0	0	0	1	0	0

Tabla 1. Matriz topológica de conectividad (MC). Fuente: elaboración propia.

A partir de la matriz de conectividad se construye la matriz de accesibilidad, la cual contiene los caminos más cortos entre los nodos y a su vez, es la base para obtener el número asociado o número *Konig* (NS), el cual es el mayor de cada fila, indicando el número máximo de nodos que se deben recorrer para acceder a un nodo dado y el

Número *Shimbel* (*shi*), que es igual a la sumatoria de números de cada fila. Mientras mayor sea *shi*, la accesibilidad será menor para el nodo correspondiente.

La Tabla 2 ilustra la matriz de accesibilidad para los mismos nodos del ejemplo anterior:

MA	Maicao	La Paz	Ciénaga	Agustín Codazzi	Valledupar	El Paso	NS	Shi
Maicao	0	1	1	2	2	3	3	9
La Paz	1	0	2	1	1	2	2	7
Ciénaga	1	2	0	3	2	2	3	10
Agustín Codazzi	2	1	3	0	2	1	3	9
Valledupar	2	1	2	2	0	2	2	9
El Paso	3	2	2	1	2	0	3	10

*Tabla 2. Matriz de accesibilidad (MA), número asociado y número Shimbel. Fuente: elaboración propia.*

La matriz de accesibilidad se calculó sobre los aplicativos UCINET, versión 6.587 de 2015 (Borgatti, Everett, & Freeman, 2002) y Gephi, versión 0.8.2 Beta (Bastian, Heymann, & Jacomy, 2009).

Como puede observarse, en esta matriz los arcos son unitarios. Aunque es deseable que ellos reflejen las distancias kilométricas entres los nodos, y de este modo se explique mejor la red real (Madrid Soto & Ortiz López, 2005), este cometido no se ha logrado. En efecto, a pesar de haberse construido la matriz de conectividad con distancias kilométricas, una vez que esta se cargaba a las herramientas informáticas, UCINET o Gephi, los algoritmos asimilaban los arcos como unitarios para calcular la matriz de accesibilidad de la manera como se ha mostrado en la Tabla 2.

Es probable que esto se deba a la potencia de la matriz resultante, lo cual, además de representar una dificultad en el cálculo, también genera problemas con el significado, las unidades y las dimensiones de los elementos. De hecho, la matriz de accesibilidad equivale sumar y multiplicar sucesivamente la matriz de conectividad tantas veces



como el número de caminos mínimo entre dos nodos existente en la matriz de adyacencia. En forma de ecuación esto es:

$$MA = MC + MC^2 + MC^3 + MC^4 + \dots + (\text{Tinkler, 1977}).$$

A partir de la matriz de accesibilidad es posible calcular el índice Omega, el cual es un indicador de la accesibilidad topológica relativa:

$\Omega_i = (Shi - Shi_i / Shi^i - Shi_i) * 100$ . El índice omega del nodo  $i$  es igual a la diferencia entre el número *Shimbel* del nodo y el mínimo número *Shimbel*, dividida por la diferencia entre el máximo y el mínimo de la matriz de accesibilidad. De este modo se tiene que los valores del índice omega para los nodos de la red varían entre 0 (máxima accesibilidad) y 100 (mínima accesibilidad).

La accesibilidad puede observarse desde diferentes puntos de vista: como i) indicador de interacción social, dado que refleja las oportunidades de establecer contactos entre diferentes actores sociales. ii) Como un indicador de oportunidades laborales en el sentido de reflejar la distancia que hay entre los residentes y los sitios en los cuales hay oportunidades de empleo. iii) En cuanto a los servicios, la accesibilidad indica la oportunidad de acceder a los lugares en los cuales se ofrecen diferentes tipos de servicios y, por último, iv) como indicador de proximidad de acceso a espacios abiertos, tales como parques, especialmente en, los entornos urbanos (Knox, 1980).

El concepto de accesibilidad se ha traducido en una serie de indicadores, normalmente asociados a movilidad, efectos de la infraestructura del transporte sobre la población y la distribución de las actividades. Por su naturaleza, la accesibilidad resulta en un concepto polisémico, relacionado con las oportunidades de viaje, su calidad e impedimento, los cambios en el uso del suelo, las restricciones a la demanda y las posibilidades personales (Scheurer & Curtis, 2007).

En este trabajo, teniendo en cuenta los ejemplos citados, los cuales abordan la estimación de la accesibilidad, ésta se considera expresada mediante el índice omega

y se toma como variable dependiente en el análisis y sujeta a pruebas de correlación con variables de tipo socioeconómico.

### **3.4 Elementos de la interacción socioespacial**

La consideración geométrica planteada para la accesibilidad se enriquece al interactuar con variables o indicadores ponderados en función de la población o de las actividades económicas. Entre estos se menciona, a manera de ejemplo, el potencial de población (*PP*), el cual sirve como indicador de la interacción espacial en función de la distancia entre los nodos; es decir, los municipios y su aporte como elemento de información para la toma de decisiones sobre el territorio (Lopez Trigal, Rio Fernandes, Savério Sposito, & Trinca Fighera, 2015).

Las interacciones espaciales abarcan una amplia variedad de movimientos. Las actividades generan y atraen flujos expresados usualmente como oferta y demanda. Así, las condiciones básicas a considerar para que exista la interacción espacial son:

- Complementariedad: Se refiere a la condición de oferta y demanda entre los nodos que interactúan.
- Oportunidad: Hace referencia a una localización que puede ofrecer una mejor alternativa como punto de origen o destino.
- Transferibilidad: Las personas, bienes e información deben contar con una infraestructura de soporte, de manera que conecte los nodos entre los cuales ocurre la transferencia (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2013).

Con base en estas consideraciones se plantean los modelos de interacción espacial, entre los cuales se han seleccionado el anteriormente mencionado potencial de población, las matrices origen/destino, los flujos entre localidades y las medidas de centralidad. Estos conceptos se muestran a continuación.

El potencial de población se entiende como un indicador de accesibilidad territorial basado en la población de los nodos y la distancia entre éstos:  $PP_i = P_i + \sum \frac{P_j}{d_{ij}}$ , siendo  $PP_i$  el potencial para el *iésimo* municipio,  $P_i$  la población del municipio,  $P_j$  la población de las demás localidades y  $d_{ij}$  la distancia entre las localidades *i* y *j* (Mierez, 2010).

De manera complementaria, en el estudio de las interacciones espaciales se cuenta el empleo de las matrices origen / destino o de interacción espacial. Ellas consisten en construir una matriz de doble entrada, de manera similar a las descritas más arriba, de manera que la sumatoria de una fila ( $T_i$ ) representa las salidas (flujos) de un nodo y la sumatoria sobre una columna representa las entradas totales ( $T_j$ ). La sumatoria de las  $T_i$  debe ser igual a la de las  $T_j$ , de otro modo se presentarían movimientos que son ajenos al sistema (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2013).

En el presente trabajo, se ha determinado el valor de cada celda de la matriz de flujos mediante la relación basada en el modelo de gravedad. Así, la relación entre dos nodos está expresada por la relación simplificada  $T_{ij} = \frac{P_i P_j}{d_{ij}}$ , en la cual el flujo entre dos municipios directamente conectados es proporcional al producto de sus poblaciones e inversamente proporcional a la distancia kilométrica entre ellos.

Si bien, el modelo gravitatorio corresponde inicialmente a la física Newtoniana para explicar la atracción entre cuerpos, su aplicación en geografía resulta válida, siempre y cuando se observe que la analogía se explique en el dominio de la geografía y no de la física (Seguí Pons & Petrus Bey, 1991). La Tabla 3 muestra al matriz de flujos resultante para seis nodos de la red vial nacional.

MF	Maicao	La Paz	Ciénaga	Agustín Codazzi	Valledupar	El Paso
Maicao	0	56 433,7842	137600,484	0	0	0
La Paz	56433,7842	0	0	800212,683	21230499,9	0
Ciénaga	137600,484	0	0	0	0	0
Agustín	0	800212,683	0	0	0	286078,571

Codazzi						
Valledupar	0	21230499,9	0	0	0	0
El Paso	0	0	0	286078,571	0	0

Tabla 3. Matriz de Flujos (MF) entre nodos directamente conectados. Fuente: elaboración propia.

Un elemento complementario que se utiliza con frecuencia en el análisis de la interacción espacial, con el fin de obtener información adicional sobre la dinámica territorial, es el cálculo de la centralidad o estimación de medidas de tendencia central. Entre estas medidas se describen el centro medio simple, el centro mediano, el elemento central y la elipse de desviación estándar (DANE, 2015).

El centro medio simple corresponde al promedio de las coordenadas del conjunto de nodos; es decir, el punto con coordenadas  $(\bar{x}, \bar{y})$ , siendo  $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$  y  $\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$ .

Por su parte, el centro mediano, es el lugar con respecto al cual la distancia desde los demás puntos es mínima. La condición que debe satisfacer la localización candidata como centro mediano ( $c$ ) es  $d_i^c = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}$ .

En relación con el elemento central, se trata del nodo que tiene la menor distancia con respecto a los demás. A diferencia de los dos anteriores, se trata de un elemento (nodo) que pertenece al conjunto de localidades y no es un punto puramente matemático.

Por último, se menciona la elipse de desviación estándar, como indicador de cuán compacta es la distribución de los puntos y cuál es su orientación. Las fórmulas para dicha elipse son:

$$SD_x = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n} \text{ y } SD_y = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}{n}.$$

Estas dos medidas permiten obtener los ejes de la elipse y, por su parte, la rotación se estima mediante una función trigonométrica que minimiza el sumatoria de las distancias al cuadrado entre los puntos y el eje más largo, y maximiza la suma de las distancias al cuadrado con respecto al eje más corto (Mitchell, 2005).

### 3.5 Elementos del análisis espacial

El pensamiento espacial, como una forma de abstracción, se fundamenta en una combinación constructiva de tres elementos: conceptos sobre el espacio, herramientas de representación espacial y procesos de razonamiento. Mediante estos componentes, el pensamiento espacial desempeña un papel fundamental, tanto en el ámbito personal como en el social caracterizado por:

- Ser omnipresente, poderoso, flexible y decisivo para la solución de problemas
- Sus variaciones permiten abordar las situaciones desde diferentes puntos de vista. No hay una «mejor» manera de pensar espacialmente.
- Su ejercicio requiere de capacitación formal e inversión de recursos personales y sociales (NAP, 2006).

Dentro de esta concepción, se destaca como un hito en la historia de la Geografía, el trabajo del geógrafo alemán Walter Christaller y su teoría del lugar central (1939), considerada como emblemática dentro del enfoque cuantitativo y el análisis espacial. Con ella, el autor buscaba explicar las propiedades fundamentales de los asentamientos: tamaño, número y localización (NAP, 2006).

*«A partir de Christaller se definen seis conceptos clave, que a pesar de las múltiples reformulaciones de su teoría y de las adaptaciones elaboradas a lo largo de la historia de la geografía de los transportes, se mantienen latentes y válidos en su significado más abstracto y se manejan frecuentemente en los análisis de estructuras funcionales»* (Seguí Pons & Martínez Reynés, 2004).

Los conceptos clave a que hace referencia la cita anterior son centralidad, lugares centrales, atributos que otorgan centralidad, nivel jerárquico, área de influencia y distancia económica, siendo esta última la sustitución de la distancia física por variables como tiempos de desplazamiento, costos del transporte, etc.

Una expresión de la Nueva Geografía Económica (NEG)<sup>2</sup> sobre estos elementos se refiere a la aplicación de modelos y técnicas provenientes de la organización industrial teórica para dar luces sobre preguntas claves de la localización: ¿Por qué y cuándo la manufactura se concentra en pocas regiones dejando a las demás relativamente subdesarrolladas? (Krugman, 1991).

Sobre la misma idea central, es decir, la localización de la producción, Paul Krugman plantea que la NEG fue concebida como un esfuerzo para cambiar la concepción enfocada dentro de los países y observar los datos locales y regionales para evidenciar la naturaleza y fortaleza de las economías externas (Krugman, 2010).

A partir de este acercamiento se identifica el análisis espacial o análisis de datos espaciales como el resultado de un razonamiento que depende de la localización y se realiza sobre datos de corte transversal. En este sentido, las técnicas del análisis espacial abordan el problema de la pérdida de contexto cuando la información de corte transversal de despliega a manera de tablas (Goodchild & Janelle, 2004).

Para sintetizar el concepto aplicado del análisis espacial, se recurre a la secuencia metodológica que describe Miguel Acevedo en su libro *Data Analysis and Statistics for Geography, Environmental Science, and Engineering (passim)*:

En primer lugar, el análisis espacial se sitúa en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) e identifica dos tipos principales de datos espaciales: los patrones de puntos, entendidos como una colección usualmente irregular de puntos localizados espacialmente; y los arreglos tipo *lattice* o reticulares, sintetizados como valores asignados a una región y ajustables a una malla o a un polígono.

En relación con la distribución de los puntos, los problemas más frecuentes se refieren a si ellos se encuentran agrupados (*clustered*), distribuidos uniformemente o

---

<sup>2</sup> La Nueva Geografía Económica proporciona un enfoque integrado de la economía espacial. Ella enfatiza el papel de las fuerzas de aglomeración como generadoras de la distribución desigual de la actividad económica, así como del ingreso, en el espacio (Venables, 2005).

dispersos. De igual modo, se incluye el análisis de la variabilidad espacial de tales distribuciones.

Esta variabilidad normalmente se aborda desde dos perspectivas. La primera consiste en dividir el espacio en cuadrantes, examinar cuántos puntos caen dentro de cada uno y cómo esta cantidad se compara con la cantidad esperada de los mismos. La segunda perspectiva consiste en calcular la distancia a los vecinos más cercanos, observar el ritmo de cambio de esta distancia y compáralo con el esperado, si éste fuera uniforme.

Una vez que se ha asociado el valor de una variable a cada punto, se pueden calcular las relaciones entre tales valores en la forma de covarianza, lo cual conduce a los elementos básicos de la geoestadística: los variogramas y la semi-varianza. Un elemento central dentro de la geoestadística es el método kriging, el cual permite predecir los valores de las variables sobre puntos no muestreados a partir de una colección de puntos de la muestra.

De los patrones de puntos se desprenden los patrones de polígonos. La regresión espacial ayuda a predecir los valores de las variables asociadas a polígonos a partir de los polígonos circundantes. En este método resulta crucial definir la estructura del vecindario o entorno y entre sus técnicas más comunes se encuentran las correlaciones espaciales de *Moran* y *Geary*, así como otros tipos de modelos de regresión (Acevedo, 2013).

En este trabajo no se abordan los variogramas, la semi-varianza ni el método *kriging*. Esto se debe a la distribución reticular que presentan los nodos y el consecuente tratamiento de la red. No se realizan comparaciones o análisis sobre polígonos. En este sentido no se habla de geoestadística en sentido estricto.

No obstante esta síntesis, es necesario mencionar que sobre la base de la diferenciación epistemológica, el análisis espacial suele ser observado de manera

similar a la econometría espacial. Una definición de esta disciplina de la economía planeta que se trata del conjunto de técnicas de especificación, estimación, contraste y predicción necesarias para el tratamiento de datos espaciales (Chasco Yrigoyen, 2003). Para esta autora, se trata de un concepto similar a la geoestadística o la estadística espacial, aunque difiere de ésta en el sentido que la economía difiere de la estadística.

Otra aproximación al concepto de econometría espacial indica que se trata de una subdisciplina de la economía general que proporciona las técnicas de contraste y estimación necesarias para trabajar con datos que presentan heterogeneidad y/o dependencia espacial (Moreno Serrano & Vayá Valcarce, 2004).

En palabras de Luc Anselin, la econometría espacial es un campo de la econometría que trata con la interacción espacial (autocorrelación espacial) y la estructura espacial (heterogeneidad espacial) en modelos de regresión para datos de corte transversal y panel (Anselin, *Spatial Econometrics*, 2003), (Le Sage, 1999).

De este modo, es posible considerar que los conceptos de análisis espacial, geoestadística y econometría espacial, enmarcados en el ámbito de la estadística espacial, se relacionan estrechamente en cuanto a las herramientas metodológicas que utilizan, pero sus diferencias emergen en virtud de los campos de conocimiento, explicación y aplicación propios de cada disciplina, bien sea la geografía, la estadística o la economía.

En el presente trabajo se aborda el análisis espacial como la relación entre variables asumidas, a priori, como explicativas de la accesibilidad de la red vial nacional mediante la estimación de medidas de autocorrelación espacial global (Índice de Moran), del vecino más cercano, identificación de puntos calientes, empleo de los mínimos cuadrados ordinarios y finalmente, un cálculo de regresión geográficamente ponderada (GWR -*Geographically Weighted Regression*-, por sus siglas en inglés). La definición e interpretación de estos métodos se apoyan en la explicación que para



cada herramienta presenta el aplicativo *ArcMap* (ESRI, 1999 - 2015) y se incluyen en el Capítulo 5.

### **3.6 Variables explicativas socioeconómicas**

En el desarrollo del presente capítulo se han descrito las variables accesibilidad (índice omega), potencial de población y flujo. La primera de ellas se ha estimado como variable dependiente y las otras dos como explicativas. Se relacionan a continuación tres variables adicionales, de tipo socioeconómico, las cuales también se consideran inicialmente como aportantes a la explicación de la accesibilidad de la red vial nacional. Estas son la población, pobreza y conflicto armado.

Reconociendo que no se desea abarcar la extensa y compleja visión que subyace detrás de cada variable, se procura, a partir de definiciones, concretar un concepto general de las variables socioeconómicas que serán incorporadas en el proceso de análisis espacial.

#### **3.6.1 Población**

En sentido amplio, la población puede entenderse como el conjunto de personas que habitan una parte de la Tierra, las cuales conforman poblamientos o asentamientos, así como sus procesos, incluyendo características como número, distribución espacial y dimensiones con respecto a un territorio específico (López Trigal, Rio Fernandes, Savério Sposito, & Trinca Fighera, 2015). De manera similar, la población puede entenderse como un grupo de individuos que comparten alguna o varias características y ocupan un espacio común definido (Reuel, 2011).

Como campo de la geografía, la geografía de la población se encarga de estudiar el crecimiento y el cambio de la población, así como las características demográficas de diferentes áreas sobre la superficie terrestre. Entre los temas de interés para los

geógrafos de la población se cuentan los refugiados, los desplazamientos no voluntarios, la violencia, el envejecimiento y el género (Warf, 2006).

En el proceso de describir, analizar y reflexionar sobre la organización geográfica y crecimiento de las poblaciones humanas en sus asentamientos ambientales y sociales, la geografía de la población se separa de la demografía en el sentido de que ésta, como ciencia matemática de la población humana, se centra en los procesos de fertilidad, mortalidad y migración y cómo estos crean poblaciones predecibles (Bailey, 2009).

En gruesa síntesis, la geografía de la población se puede definir como el estudio sistemático de i) la descripción de la localización del número de habitantes y sus características; ii) la explicación de la configuración espacial de dicho número y sus propiedades; iii) el análisis geográfico de los fenómenos de la población y iv) la comprensión de la población como grupos sinónimos de jurisdicciones políticas o étnicas (Wiley-Blackwell, 2009).

### 3.6.2 Pobreza

Se trata de un término muy amplio, difícil de encerrar en una definición. En general, se considera como la situación de privación de lo considerado como necesario para el ser humano como consecuencia de la desigual apropiación de los beneficios del trabajo y del acaparamiento de la riqueza (Lopez Trigal, Rio Fernandes, Savério Sposito, & Trinca Figuera, 2015). El término también sugiere el estado en el cual una persona no puede funcionar o no tiene la capacidad para actuar en diferentes aspectos como un ser humano (The Dictionary of Human Geography, 2009).

Según las Naciones Unidas la pobreza consiste en una privación sostenida o crónica de los recursos, capacidades, escogencias, seguridad y capacidad necesarios para el disfrute de un estándar adecuado de vida y otros derechos de tipo civil, cultural, económico, político y social (UNESCO, 2015).

La comprensión de la pobreza ha sido abordada desde los enfoques de la economía, la sociología, la geografía, la planeación y la ciencia política. Las visiones contemporáneas son de tipo multidisciplinario y además de abordar el fenómeno desde sus perspectivas, estudian también las soluciones que se han propuesto o implementado. Así, entre los elementos más comunes se encuentran los relacionados con su medición, su clasificación en diferentes niveles y regiones (Chimhowu, 2009).

En términos espaciales, la mayoría de las personas más pobres habitan en los denominados países menos desarrollados y viceversa. Las teorías geográficas sobre la pobreza tratan de explicar su distribución y la manera como ciertos lugares se convierten en trampas de pobreza y otros no. Esto conduce a enfoques tanto determinísticos como probabilísticos, los cuales tratan sobre la influencia que genera el medio geográfico en las condiciones económicas y sociales de una población (Chimhowu, 2009).

Alrededor del concepto de pobreza se encuentran los de subsistencia, estrechamente relacionado con la alimentación, necesidades básicas y privación relativa, idea asociada al subjetivismo y objetividad de la noción de pobreza, aplicados a los recursos y las necesidades sociales y materiales. También se asocian como parte de la definición la necesidad (entendida como carencia), el estándar o nivel de vida y la insuficiencia de recursos (Acosta Navarro, 2015).

### 3.6.3 Conflicto armado

El estudio de las guerras internas actualmente se concentra en comprender cómo funcionan éstas y cuál es su funcionamiento. Para abordar los asuntos propios de los conflictos armados internos se recurre a los métodos cuantitativos y cualitativos, de manera que se procura identificar y explicar las dinámicas espaciales y sociales en las cuales se presentan. En este proceso, se han identificado elementos de segmentación espacial y aparición de para-estados o estados dentro de los estados, normalmente en manos de los grupos insurgentes (Ortega Poveda, 2013).

Particular atención merece la situación de la sociedad civil como una de las principales víctimas y, en cierta medida, agentes, tanto en la ocurrencia como en el estudio de los conflictos armados internos. No obstante que los conflictos se materializan mediante eventos concretos en localizaciones específicas dentro de un país, sus repercusiones e interacciones se extienden más allá de los límites nacionales e involucran a la comunidad internacional, por lo cual se da lugar a nuevos conceptos y enfoques en el ámbito diplomático. En consecuencia, se trata ahora de entender el fenómeno en el marco de la seguridad humana, en la cual prevalece la integridad del ser humano, más allá de la seguridad estatal (Durán, López, & Restrepo, 2009).

El territorio, o más concretamente, la tierra, es uno de los elementos determinantes y explicativos en los conflictos armados. Así, la tierra se convierte en objeto de despojo mediante las vías de hecho o uso ilegal de instrumentos jurídicos y el control territorial se ejerce mediante prácticas de dominación y violación de los derechos de las comunidades (PNUD, 2011). Sin embargo, en el caso de los conflictos o guerras internas el control territorial se alcanza cuando se asegura la colaboración mayoritaria, voluntaria o no, de la población con un grupo armado (Vargas R., 2009).

La definición y descripción de un conflicto armado interno (o guerra civil) están sujetas a los intereses de las partes involucradas. Además, según Stahtis Kalyvas, es posible identificar tres fuentes importantes en el estudio de las guerras civiles: los estudios económicos realizados por los economistas de los organismos multilaterales, la reducción en la ocurrencia de guerras internacionales y el resurgimiento de los conflictos étnicos posteriores a la guerra fría. Con base en esta consideración, el autor ofrece una definición sintética de lo que puede ser un conflicto armado interno: «*un combate armado que tiene lugar dentro de las fronteras de una entidad soberana reconocida, entre partes sujetas a una autoridad común al inicio de las hostilidades*» (Kalyvas, 2009).

## **4 METODOLOGÍA**

El presente proyecto procura ser de tipo descriptivo y explicativo, apoyado en herramientas de los sistemas de información geográfica y aplicativos (software) diseñados para el análisis y representación de redes. En este sentido, las variables explicativas se combinan, mediante una estrategia de análisis espacial, para generar elementos que aporten a la comprensión de la accesibilidad de los nodos de la red vial primaria del país.

Con base en la descripción cuantitativa de la red vial nacional, así como las variables socioeconómicas con las cuales ella se relaciona, se elabora una interpretación sobre la relación entre los elementos topológicos de la red, expresada como grafo, y los patrones espaciales obtenidos a partir de diferentes técnicas asociadas al análisis espacial.

Finalmente, se evalúa la validez de la hipótesis de la investigación mediante la confrontación de los resultados con la revisión bibliográfica

### **4.1 Fuentes de información**

El proyecto se apoya en información secundaria de tipo cartográfica en formato digital y alfanumérica obtenida mediante solicitud o por descarga de sitios web institucionales. De otra parte, se ha consolidado el recurso bibliográfico a partir de consultas en bibliotecas de la ciudad de Bogotá, adquisición de libros y consultas de literatura académica disponible en las bases de datos a las cuales tienen acceso la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y la Universidad Nacional de Colombia.

En cuanto a la referencia espacial, se ha utilizado el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNA-SIRGAS (Sánchez Rodríguez, 2005), y la proyección

transversal conforme Gauss-Krueger, con origen Central (Imprenta Nacional, 2011). Mediante esta georreferenciación, además de vincular la cartografía a un sistema de coordenadas planas métricas, necesarias para establecer las distancias entre nodos y calcular el flujo entre ellos, se vincula el proyecto al sistema de coordenadas oficial de Colombia.

La primera fuente de información es la cobertura en formato *shape file* de la red vial nacional primaria generada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC- para el Instituto Nacional de Vías -INVIAS- entre los años 2009 y 2011. Esta capa de información se elaboró en el IGAC a partir del posicionamiento satelital cinemático de los bordes de las calzadas viales a lo largo del país, así como de los postes de referencia, para posteriormente generar los ejes viales y el sistema de consulta correspondiente. El autor formó parte del equipo técnico que realizó dicho proceso, específicamente en la captura de datos de campo y el cálculo de coordenadas.

Esta información se complementa con las capas disponibles en el inventario de información del sitio web de la Agencia Nacional de Infraestructura -ANI-, los cuales contienen el estado de las concesiones viales a diciembre de 2014.

De otra parte, se ha recurrido al material de descarga sobre la red vial primaria disponible en el sitio web del INVIAS. Esta información, aunque de tipo cartográfico, se ofrece al usuario en formato pdf, lo cual hace que su utilidad, para efectos de edición o análisis sobre un software SIG, sea bastante limitada y cumpla apenas con el papel de imágenes de contexto.

En cuanto a los datos de población, se utilizan los disponibles en el sitio web del Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE-. Si bien esta entidad realiza continuamente la proyección de la población del país en diferentes grados de agregación territorial, se ha optado por utilizar los datos municipales del censo de población y vivienda realizado en 2005. Esta decisión se debe a que es el último

conteo oficial demográfico de cobertura nacional e insumo más fiable para el cálculo de otra fuente de información: el índice de pobreza multidimensional -IPM-.

Este índice, también obtenido en el sitio web del DANE, se refiere al año 2005, dado que la desagregación en el nivel municipal solamente está disponible para dicho año en virtud de los datos generados por el censo. Otras estimaciones, también disponibles, lo hacen de acuerdo con la naturaleza del estudio y su agregación cubre ciudades principales o el nivel departamental, pero su nivel de detalle no resulta suficiente para los objetivos del proyecto.

En relación con los datos sobre el conflicto armado, se utiliza el estudio Tipología de los municipios de Colombia según el conflicto armado interno, generado por el Centro de Recursos para el Análisis de Conflictos -CERAC- en 2014 y disponible en su sitio web. Este trabajo abarca el período 2000 - 2012 y categoriza los municipios del país en siete categorías, basadas en la intensidad y duración del conflicto.

<b>Variable</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fuente</b>
Red vial nacional primaria	<i>Shape files</i>	IGAC
Población municipios nodales	Tabla de Excel	DANE
IPM municipios nodales	Tabla de Excel	DANE
Conflicto armado municipios nodales	Tabla de Excel	CERAC
Concesiones viales	Tablas de Excel y <i>shape files</i>	ANI
Accesibilidad y propiedades estructurales	Tablas de Excel y grafos	Elaboración propia
Potencial de población	Tabla de Excel	Elaboración propia
Flujos	Tabla de Excel	Elaboración propia
Grafos y sus indicadores	Tabla de excel	Elaboración propia
Interacciones espaciales, patrones, relaciones espaciales, resultados	Coberturas SIG	Elaboración propia

*Tabla 4. Fuentes de información empleadas en el proyecto. Fuente: elaboración propia.*

Las herramientas informáticas empleadas para realizar cada fase del proceso metodológico son:

<b>Herramienta</b>	<b>Propósito</b>
--------------------	------------------

Microsoft Excel®	Manipulación de tablas de datos socioeconómicos y construcción de las matrices de conectividad y accesibilidad, tanto en distancias euclidianas como reales entre nodos de la red.
UCINET 6.587, Grafos 1.35 y Gephi 0.8.2	Cálculo de las métricas sobre los grafos
ArcMap 10.3® y Geoda© 1.6.79 (Anselin, GeoDa , 2015)	Análisis exploratorio de datos espaciales se realiza sobre, particularmente con sus extensiones <i>spatial statistics tools</i> y <i>network analyst tools</i> .
GWR, versión 4.0.80	regresión geográficamente ponderada
Microsoft Word®	Escritura del proyecto de investigación

Tabla 5. Herramientas informáticas empleadas en el proyecto. Fuente: elaboración propia.

Los métodos empleados para tratar las variables son la técnica de grafos, el análisis exploratorio de datos espaciales, medidas de autocorrelación y correlación espacial, interacción espacial, análisis de puntos calientes, mínimos cuadrados ordinarios y regresión geográficamente ponderada.

En esta investigación la variable a explicar (dependiente) es la accesibilidad, calculada a partir de la teoría de grafos como índice omega. A su vez, las variables explicativas son la población, el índice de pobreza multidimensional, conflicto armado, potencial de población y flujo entre nodos. La Figura 4 sintetiza el proceso metodológico empleado, sus etapas y componentes:



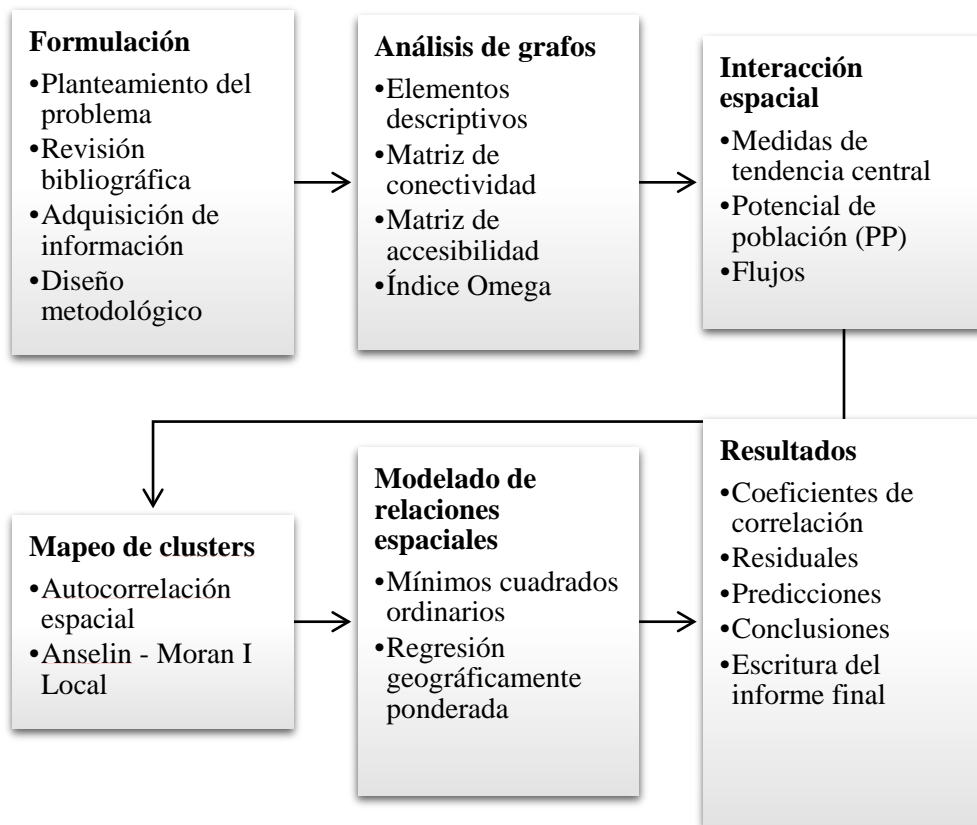


Figura 4. Esquema metodológico del proyecto. Fuente: elaboración propia.

## 4.2 Escala

El área de estudio comprende las siguientes regiones colombianas: Caribe, Andina, Pacífico y parcialmente, la Orinoquia. Esta cobertura espacial obedece a dos condiciones: la primera, el interés por realizar el estudio en la escala nacional y, la segunda, la dimensión física de la red vial nacional, la cual, debido a factores de tipo físico como la topografía y las condiciones medioambientales, además de circunstancias político-administrativas, no cubre las zonas este y sur del país.

No se define en sentido estricto una escala cartográfica debido a que la información es de tipo digital y no se generan salidas impresas de gran formato, usuales en

cartografía análoga. En consecuencia, se plantea como escala geográfica la correspondiente a las regiones norte, occidente y central del país.

### **4.3 Temporalidad**

Como se ha señalado en 5.2, las fuentes de información no coinciden en un momento específico, lo cual sería deseable. Esta dificultad puede generar cierto tipo de inconsistencias en los resultados, aunque es un fenómeno frecuente que se debe enfrentar en los procesos de investigación, se trata entonces de establecer la fecha más adecuada para la localización temporal del análisis.

En procura de una ponderación se hace la siguiente consideración: Tanto los datos de población, como de IPM corresponden al año 2005. Si bien, la medición de la red vial se realizó en el año 2010, no se registran modificaciones correspondientes a la generación o eliminación de arcos y nodos entre 2005 y 2010; es decir, no ocurrieron cambios estructurales que afecten la representación en un grafo. Esta afirmación se sustenta en el hecho de que las más importantes intervenciones realizadas a la red vial nacional, las concesiones viales, no representan modificaciones morfológicas, como se evidencia a continuación en 4.4.

De otra parte, los datos sobre número de eventos del conflicto armado disgregados en el nivel municipal que como se señaló corresponden al intervalo 2000 - 2012, son susceptibles de centrarse en 2005, año no muy distante del promedio, el cual es 2006. Con esta consideración se asume que el total de eventos o confrontaciones armadas ocurrió al año 2005, lo cual no es cierto y significa un inconveniente técnico, pero este corte, bien en 2005 u otra fecha, es necesario para hacer una utilización práctica de la información e incluirla dentro del proceso de análisis espacial.

Obedeciendo a la anterior línea de razonamiento, se define entonces, a manera de convención o acuerdo técnico y en procura de una solución práctica para el manejo de los datos, que la fecha más apropiada para ubicar temporalmente la investigación es el año 2005.

## 4.4 Descripción de variables

### 4.4.1 Red vial nacional

El presente trabajo se centra la atención en la red vial nacional primaria no concesionada; es decir, la que se encuentra a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2015), establecida, desde el punto de vista jurídico, mediante el Decreto 1735 de 2001. La Figura 5 muestra la distribución espacial de la red.

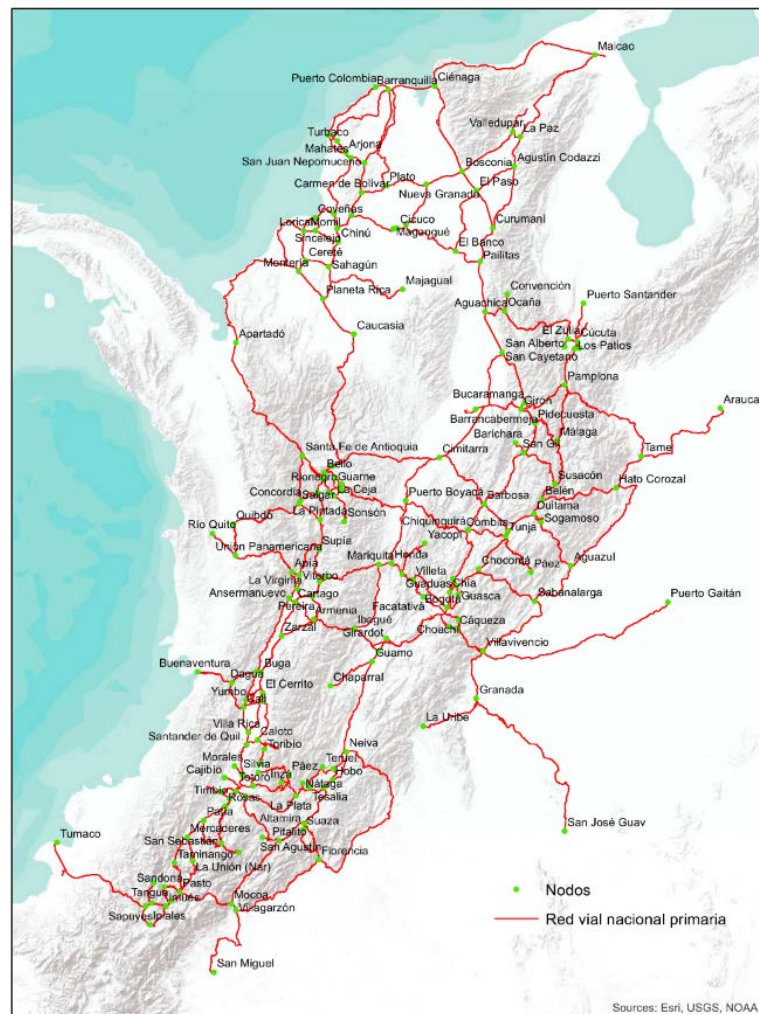


Figura 5. Red vial nacional de primer orden. Fuente: elaboración propia.

El artículo 4 de dicho decreto define la red nacional de carreteras a cargo del INVIAS como constituida por 16 571,1 km, de los cuales 11650,4 son pavimentados y 4 924,7 se encuentran en afirmado (INVIAS, 2015).

Como puede observarse, salvo por la distinción entre pavimentado y afirmado, esta definición jurídico-administrativa no hace una clasificación de las características técnicas de las vías a cargo de la nación. Es decir, asigna la red primaria del país a la entidad sobre la base de su cobertura y extensión.

En el mismo Decreto 1735, en alusión a la Ley 105 de 1993, se establecen algunos criterios para definir la red nacional de carreteras: volumen de tránsito, destinos (fronteras y puertos internacionales), conexión entre capitales departamentales y mediación de compromisos internacionales.

La normativa expedida en relación con la red vial es abundante: En su extenso estudio *La infraestructura del transporte en Colombia durante el Siglo XX*, Álvaro Pachón y María Teresa Ramírez identifican 15 leyes expedidas durante la primera mitad de dicho siglo para reglamentar las carreteras del país (Pachón & Ramírez, 2006).

Sobre la segunda mitad del Siglo XX y lo corrido del XXI, el espectro normativo generado sobre la red vial incluye la Constitución Política de 1991, documentos del Consejo Nacional de Política Económica y Social -CONPES- leyes, decretos y resoluciones.

En el ensayo *Marco jurídico de la categorización de la red vial nacional*, publicado en la web (OSCAROTEL, 2013), el autor señala siete artículos de la Constitución Política de Colombia, la Decisión 271 de la Comisión del Acuerdo de Cartagena, siete documentos CONPES, cinco leyes, siete decretos y cuatro resoluciones, amén de las propias expedidas por el INVIAS.

De particular interés resulta la Ley 1228 de julio 16 de 2008, por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión para las carreteras del Sistema Vial Nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras, y se dictan otras disposiciones (Imprenta Nacional, 2015).

En esta ley se clasifican las vías que conforman el sistema nacional de carreteras en arteriales o de primer orden, intermunicipales o de segundo orden y veredales o de tercer orden. *«Estas categorías podrán corresponder a carreteras a cargo de la Nación, los departamentos, los distritos especiales y los municipios»*. Además, se definen las zonas para reserva de la red vial nacional, la afectación de franjas y la declaración de interés público; de igual modo, se establece el sistema integral nacional de información de carreteras.

Más allá de la redefinición jurídica y administrativa que ofrece la Ley 1228, se mantiene, al menos legalmente, una incertidumbre sobre la definición técnica de la red vial primaria. No obstante, de la adopción de los criterios técnicos, así como de la matriz y la metodología para la categorización de la red, se encargaría la Resolución 1240 de abril 25 de 2013 (Mintransporte, 2013).

Amén del esfuerzo organizativo que significa esta Resolución 1240, prevalece una situación planteada desde la Ley 1228 y que no ha sido resuelta; esto es, que la jerarquización territorial –tanto jurídica como técnica– de las redes de carreteras no es consistente con la entidad territorial responsable de su gestión.

Esto significa que vías disímiles, a partir de los preceptos ingenieriles, pueden ser administradas por la nación, los departamentos, los distritos o los municipios sin que se disponga de una organización jerárquica claramente establecida.

Sería deseable que las vías de mayor importancia económica y de cobertura nacional deberían conformar la red primaria, siendo seguidas por las de interés regional o departamental y finalmente, se incluirían las del orden municipal y veredal. Esta

clasificación hipotética debería estar acompañada por una consecuente clasificación técnica.

Otro componente a considerar dentro de la red vial nacional corresponde a las carreteras que se hayan cobijadas por la figura de la concesión de infraestructura de transporte.

La Corporación Andina de Fomento -CAF-, señala que la concesión es un concepto jurídico y económico caracterizado por la *«cesión de la administración pública a una empresa privada de un activo ya construido que necesita ser rehabilitado o bien del derecho a construir un nuevo activo, además de su explotación por un período de tiempo establecido»* (Vasallo Magro & Izquierdo de Bartolomé, 2010).

En el caso colombiano, el organismo estatal responsable por la administración de las concesiones de la infraestructura de transporte es la Agencia Nacional de Infraestructura -ANI-, creada mediante el Decreto 4165 de noviembre 3 de 2011.

En el Artículo 4 de dicho decreto se enumeran las funciones de la ANI, destacándose como primera función la de *«identificar, evaluar la viabilidad y proponer iniciativas de concesión u otras formas de asociación público privada para el desarrollo de la infraestructura de transporte y de los servicios conexos o relacionados»* (ANI, 2015).

Esta función reconoce las concesiones como una forma de Asociación Público Privada -APP-. En Colombia, la ley 1508 de enero 10 de 2012 (reglamentada por el Decreto 1467 de julio 12 de 2012) señala al respecto que las APP son instrumento de vinculación del capital privado, materializado mediante un contrato entre una entidad estatal y una persona (natural o jurídica de derecho privado) para la provisión de bienes públicos y de sus servicios relacionados, involucrando la retención y transferencia de riesgos entre las partes y mecanismos de pago relacionados con la disponibilidad y el nivel de servicio de la infraestructura y/o servicio (ANI, 2015).

Esta ley, también en el Artículo 4, determina que los proyectos a cargo de la ANI serán identificados por el Gobierno Nacional o el Ministerio de Transporte.

Existe en consecuencia, además del INVIAS, una entidad facultada para gestionar vías del orden nacional, o por lo menos segmentos de las mismas, bajo la figura de la concesión: la ANI.

Teniendo en cuenta los objetivos del presente proyecto, se consultó en el sitio web de dicha agencia si los corredores concesionados, y reportados, generan nuevas conexiones identificables desde la escala nacional. Esto con el fin de verificar un posible aumento en los indicadores estructurales, los cuales dependen del número de arcos y nodos presentes en la red.

Esta consideración resulta de importancia si se tiene en cuenta que los indicadores a calcular, desde el punto de vista de la estructura de la red dependen tanto del número de nodos, como de arcos contenidos en la representación mediante un grafo.

En el inventario de información disponible en el sitio web de la ANI se encuentran los ejes viales, el inventario de planos y los inventarios documentales, siendo de especial interés los ejes viales, suministrados cartográficamente en formato *shape file*, con fecha 3 de diciembre de 2014 (ANI, 2015).

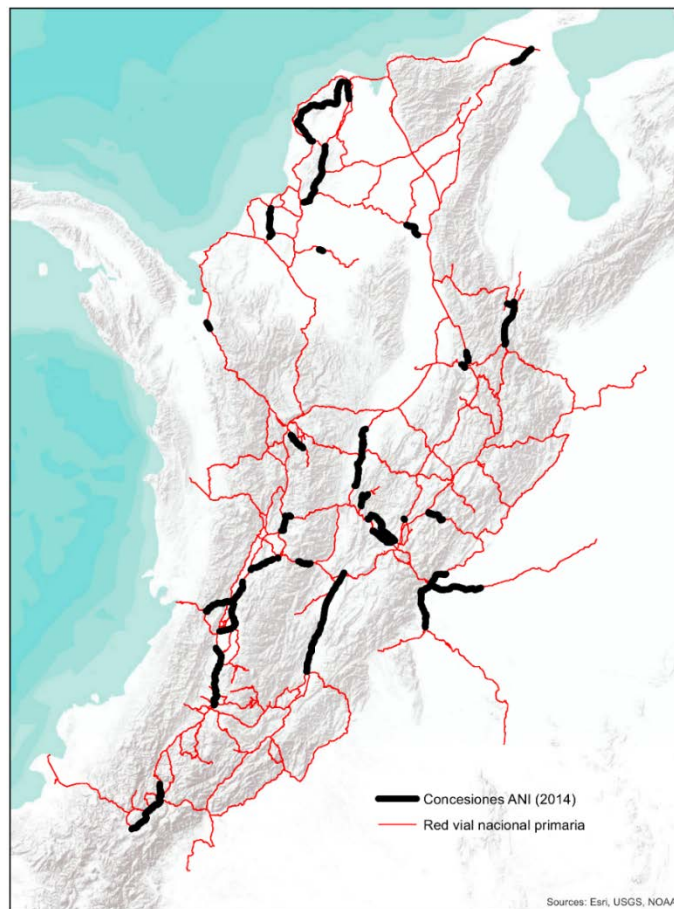
En la Figura 6 se observa que los tramos concesionados no generan nuevas conexiones o nodos sobre la red de carreteras, sino que mejoran el estado de las vías, bien mediante ampliación y mejoras en las condiciones técnicas.

Es claro que los tramos o rutas concesionados representan una mejoría en las condiciones de movilidad y, en general, en la modernización de la red; sin embargo, teniendo en cuenta la información disponible y, al margen de las concesiones que se encuentran en proceso de adjudicación o construcción a la fecha, se puede observar

que no hay formación de nuevas rutas, hecho destacable desde el punto de vista de la accesibilidad y la centralidad de los nodos.

De otra parte, la distribución geográfica de las vías concesionadas no refleja un orden jerarquizado por la localización, lo cual puede ser un indicio de que la lógica económica prima sobre la espacial y el resultado es una familia de tramos que conectan nodos de particular interés en los ámbitos político y económico.

Por este motivo, el análisis de grafos, el cual se describirá más adelante, es insensible a las vías concesionadas, dado que éstas no modifican la estructura topológica de la red vial nacional. Llama la atención el hecho de que con o sin las concesiones viales aquí reportadas, la estructura de la red vial, es decir, su abstracción geométrica, es la misma.





*Figura 6. Tramos concesionados a cargo de la ANI a 2014 y red vial nacional primaria. Fuente: elaboración propia.*

En relación con el estado general de la red vial nacional, es posible hacerse una imagen a partir de diferentes trabajos que han abordado el tema:

En cuanto a la primera mitad del Siglo XX, período de posguerra, se observan dificultades para su desarrollo relacionadas con la atomización de los recursos, la ineficiencia institucional, la formulación de políticas inadecuadas y la complejidad de la topografía (Pachón & Ramírez, 2006).

Para fechas más recientes, se encuentra que a pesar de la importancia económica que tiene el modo carretero, tanto para el desplazamiento de pasajeros como de carga, Colombia presenta un rezago importante en su infraestructura (Fedesarrollo, 2013).

Este hecho también es reconocido en el ensayo sobre infraestructura y actividad económica (Cárdenas, Escobar, & Gutiérrez, 1995), según el cual virtualmente todos los trabajos sobre competitividad en Colombia, indistintamente de su origen o naturaleza, hacen referencia a la precariedad de la infraestructura nacional.

Otra visión concurrente es que se trata de una red vial limitada y de poca capacidad, fenómeno aunado a las características del parque automotor y el consecuente impacto negativo en el desarrollo regional (Pérez V. G. J., 2005).

En opinión del Banco Mundial, la calidad de la red de carreteras es relativamente pobre, con excepción de los accesos a las ciudades principales, y reconoce además que se generan dificultades en virtud de la topografía y los eventos climáticos. De otra parte, sostiene que la descentralización en la administración de las redes no ha arrojado los resultados esperados como consecuencia de la falta de recursos (departamentales y municipales) para garantizar su sostenimiento (World Bank, 2004).

En el ámbito de la globalización, el grado de atraso en el desarrollo de la red vial es considerado como «*una desventaja significativa para soportar altas tasas de comercio exterior*» (Universidad del Rosario - CAF - CEPEC, 2010).

No se desea exclusivamente poner de relieve los aspectos negativos que puedan caracterizar la red vial nacional. En los años recientes, la recuperación y desarrollo de esta componente de la infraestructura ha sido objeto central dentro de los programas tanto gubernamentales como institucionales.

Es así como el Plan Nacional de Desarrollo 2010 - 2014 Prosperidad para Todos, Ley 1450 de 2011, en el Artículo 91 crea el programa Caminos para la Prosperidad, centrado en el mantenimiento y rehabilitación de la red vial terciaria (Imprenta Nacional de Colombia, 2011).

En relación con la red vial primaria, se encuentra en marcha el programa Cuarta Generación de concesiones viales (4G), a cargo de la ANI, diseñado con el fin de mejorar la competitividad de la malla vial del país (Cárdenas Santamaría, 2015). El programa 4G se ha estructurado en cuatro grupos, la cordillera oriental y las autopistas para la prosperidad (eje cafetero y Antioquia).

El Gobierno Nacional aspira a desarrollar cerca de 8 170 km de vías con una inversión estimada en 43,9 billones de pesos. Un reporte detallado sobre esta iniciativa es el presentado por la ANI en 2012 (Andrade Moreno, 2015).

Como una manera de garantizar el cumplimiento en la ejecución del programa 4G, el Gobierno Nacional ha encomendado la supervisión de la infraestructura a la Vicepresidencia de la República. El seguimiento de los proyectos puede observarse en la página web de dicha entidad (Vicepresidencia de la República, 2015).

Por su parte, el Ministerio de Transporte presenta un seguimiento a los diferentes proyectos viales de importancia estratégica para la conectividad nacional, distribuidos entre el INVIAS, la ANI, el Ministerio, Los sistemas integrados de transporte masivo

y la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (Transporte, 2015).

Es de esperarse que este esfuerzo por modernizar la red vial nacional, entre otros modos del transporte, como el fluvial y el aéreo, se traduzca en un impacto importante para el desarrollo del país.

Al momento de elaborar el presente proyecto la mayor parte de las obras relacionadas con las vías 4G se encuentra en proceso de construcción y/o adjudicación. Será necesario abordar su valoración en el corto, mediano y largo plazos, para estimar su impacto.

En consecuencia, retomando el interés por la evaluación estructural de la red, es posible asumir que ésta presenta la misma geometría que ha sido planteada en el comienzo del presente acápite.

#### 4.4.2 Grafo de la red vial nacional primaria

Teniendo en cuenta las definiciones de 3.3, se han obtenido los descriptores estructurales que se relacionan a continuación. La red vial nacional primaria contiene 181 nodos y 251 arcos, ocupa un área de 316 000 km<sup>2</sup> y tiene un perímetro de 5 800 km. La longitud de las rutas reales es de 17 263 km y de los arcos del grafo es de 12 505 km. Por su parte, la razón de sinuosidad es 1,3, indicando que es un grafo regular; es decir, no es lineal o idéntico en longitud a la red real, pero tampoco es tortuoso o extremadamente corto, lo cual lo ubica en una posición intermedia, aceptable como representación.

La densidad de las rutas es de 0,054, lo cual indica 54 km de vía por cada km<sup>2</sup> de área, un valor bastante bajo. Por su parte, el grafo presenta una densidad aún menor, del orden de 0,04. Por su parte, el índice beta es igual a 1,38 indicando que se trata de una red relativamente bien conectada dado que el número de arcos o aristas supera el número de nodos. Por su parte, el índice gama, 0,015 indica que el número de arcos

es muy bajo en relación con el ideal, con el cual se alcanzaría con un valor de 1. El número de circuitos cerrados es de 71; sin embargo, se requeriría un total de 347 circuitos para contar con una red ideal con la máxima conectividad posible.

La centralidad de un nodo se entiende como el número de conexiones directas que tiene cada nodo. Una manera de visualizar la centralidad en el grafo de la red vial nacional se muestra en la Figura 7. Se destacan los nodos de Bogotá, Rionegro, Barranquilla, y Pasto entre los que cuentan con un mayor número de conexiones. Esta figura permite observar que la red tiene una estructura principal conformada por dos grandes lóbulos (oriental y occidental), interconectados por los nodos que coinciden con el valle medio del río Magdalena. Los principales nodos de enlace son Ibagué, Honda, Mariquita, Puerto Boyacá y Cimitarra. No obstante sus posiciones estratégicas para la interacción espacial del país, sobre ellos no existe una consideración especial desde el punto de vista técnico.

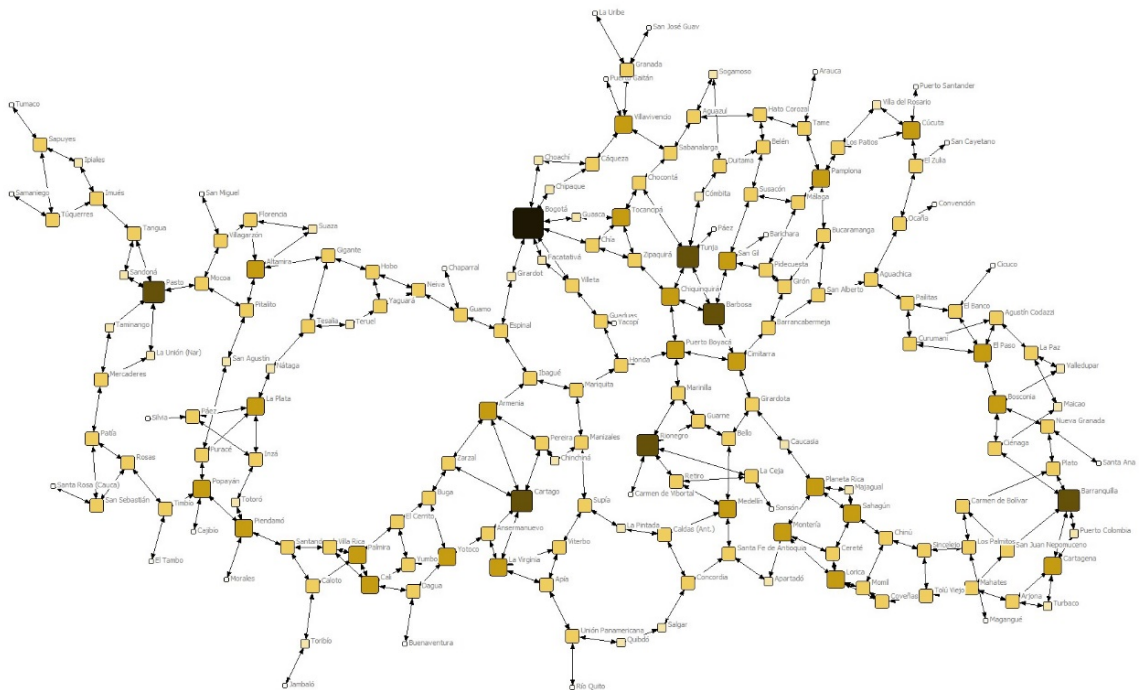


Figura 7. Grafo de la red vial nacional. Los tonos y el tamaño de los nodos representan la centralidad de cada uno. Fuente: elaboración propia.

Los principales nodos de enlace son Ibagué, Honda, Mariquita, Puerto Boyacá y Cimitarra. No obstante sus posiciones estratégicas, sobre estos nodos no existe especial configuración técnica de la red. De otra parte, en el área perimetral del grafo se observa la notable cantidad de nodos terminales que solamente cuentan con una conexión.

Vale mencionar que el potencial de los indicadores mencionados se incrementa cuando se hace una comparación entre diferentes momentos de la red. En este caso, se trata de una imagen correspondiente a un momento específico y no es posible hacer comparaciones de tipo temporal. Esto motivaría la realización del ejercicio nuevamente, una vez se encuentre operando conexiones viales de primer orden adicionales o se incorporen las redes departamentales y municipales.

Para obtener el indicador de accesibilidad, o índice omega, es necesario contar con las matrices de conectividad y de accesibilidad. Estas matrices son cuadradas y simétricas conformadas por 181 filas y 181 columnas, correspondientes al número de nodos de la red o grafo. Las Tablas 1 y 2 ejemplifican dichas matrices.

#### 4.4.3 Población 2005

El último censo general de población realizado en Colombia por el DANE se llevó a cabo en el año 2005. Dicho censo utilizó el criterio de derecho, o de jure, mediante el cual se contaron los habitantes del país. La recolección de información se realizó en un período de tiempo extendido con inmovilización parcial. En el proceso de captura se emplearon dispositivos móviles, provistos de navegación satelital.

El objetivo general de dicho censo fue disponer de información precisa, oportuna, confiable e integrada sobre el volumen y composición de la población, hogares y viviendas, establecimientos económicos y unidades agropecuarias (DANE, 2009).

En este trabajo se ha asumido que los nodos de la red vial primaria se asimilan al municipio en el cual se encuentran y la población, correspondiente al censo de 2005, se contabiliza como el total, sin tener en cuenta la desagregación por género o edad, ni por las categorías cabecera o resto. De este modo, se formula un supuesto, según el cual, cada nodo concentra el total de la población del municipio.

#### 4.4.4 Índice de pobreza multidimensional -IPM-

Este índice para Colombia fue adaptado por el departamento Administrativo Nacional de Planeación, DNP, y tiene por objeto identificar las personas y hogares pobres a partir de cinco dimensiones: educación, condiciones de la niñez y juventud, salud y condiciones de la vivienda y del hogar. El índice es de tipo anidado y ponderado, según la cual cada dimensión tiene un peso de 0,2 y los quince indicadores se ponderan dentro de cada dimensión (Estrada Arbeláez & Durán Gil, Hacia un índice de pobreza multidimensional con ponderaciones regionales a partir del modelado de relaciones espaciales, 2014). Son considerados como pobres las personas u hogares cuyo valor del IPM sea por lo menos del 33%; es decir, 5/15 de los indicadores (Estrada Arbeláez & Moreno Mayorga, 2013).

Los datos del IPM empleados en el presente trabajo fueron obtenidos del sitio web del Departamento Administrativo Nacional de Estadística. El año para el cual se cuenta con cobertura total nacional, en el nivel municipal es 2005. Aunque existe una actualización anual basada en la Encuesta de Calidad de Vida realizada por el DANE, su cobertura es parcial. De este modo, con el fin de asignar un valor del IPM a cada nodo de la red vial, se ha tomado el correspondiente al total de cada municipio nodal sin necesidad de distinguir entre cabecera y resto.

#### 4.4.5 Datos sobre el conflicto armado interno

En este proyecto se ha tomado como variable conflicto armado el valor ajustado para cada municipio de acuerdo con el estudio Tipología de los municipios de Colombia según el conflicto armado interno, realizado por el CERAC en 2014 para el período

2000 - 2012 (Restrepo, Gutiérrez , Marín, & Ronderos, 2014). En este trabajo, se consideran siete categorías de conflicto para cada municipio: sin conflicto, levemente afectado y finalizado, fuertemente afectado y finalizado, levemente afectado e interrumpido, fuertemente afectado y persistente, levemente afectado y persistente, fuertemente afectado y persistente.

Esta clasificación tuvo como referentes las siguientes consideraciones:

Levemente afectado: inferior a la media nacional; fuertemente afectado: superior a la media nacional; sin conflicto: no hay evidencia de presencia de grupos armados durante el período; finalizado: no hay evidencia de presencia de grupos armados en los últimos ocho años del período; interrumpido: durante el período hay años sin presencia de grupos armados; persistente: presencia de grupos armados durante todo el período.

En el estudio original estas categorías se valoran del uno al siete; para el presente trabajo, se normalizaron para que sus valores oscilaran entre 0 y 1. En la figura 8 se muestra el mapa original elaborado por el CERAC.

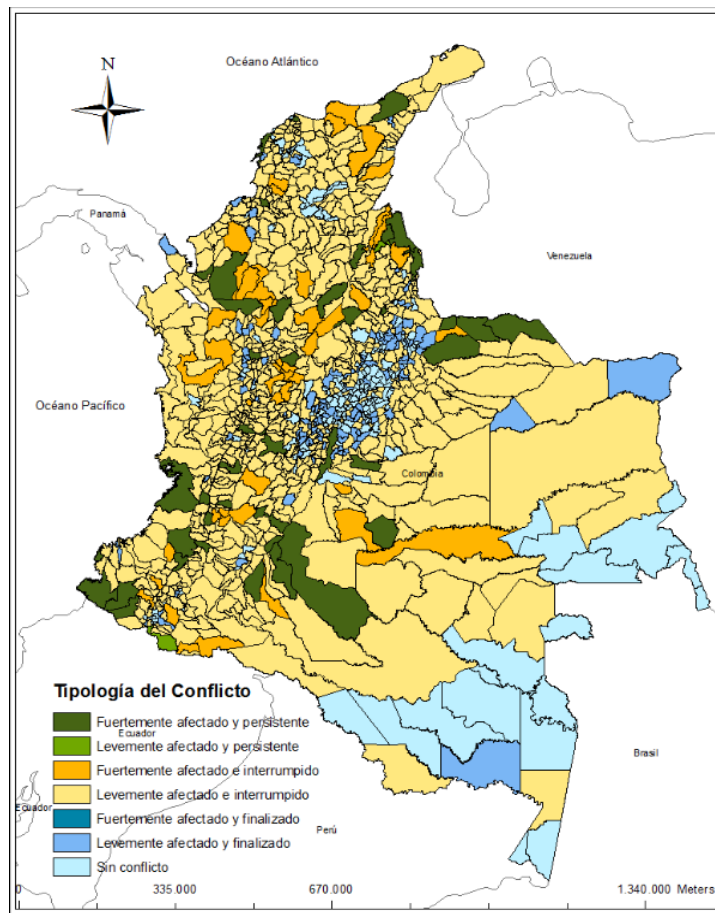


Figura 8. Mapa de tipología del conflicto armado en Colombia por municipio entre 200 y 2012. Fuente CERAC.

#### 4.4.6 Indicadores de interacción socioespacial

Estos valores se calcularon de conformidad con lo explicado en 3.4. Para cada variable se ha elaborado el mapa correspondiente, pero estos se presentan en el análisis espacial, (numeral 4.5). La intención de esta organización es mostrar la distribución original de cada variable, su grado de agrupamiento y su autocorrelación espacial.

Recordando la línea analítica del proyecto, se tiene que las variables explicativas son población, índice de pobreza multidimensional, conflicto armado interno, potencial de población y flujo. La variable asumida como dependiente es el índice omega de accesibilidad. Estas variables han sido definidas en el Capítulo 3, tanto en su



concepto como en su formulación cuando ha sido el caso. En el siguiente subcapítulo se muestra la cartografía para cada variable, así como las relaciones asadas en el análisis espacial. Por su parte, en la Tabla 6 se muestra el total de las variables y sus valores para cada uno de los nodos de la red.

ID	NODO	X	Y	POB_2005	IPM	CONF	OMEGA	PP	FLUJO
1	Maicao	1199068	1750586	103124	0,83	0,57	55,55	2319588,49	194034,27
2	La Paz	1099327	1640564	20596	0,65	0,57	49,14	485868,39	22087146,35
3	Ciénaga	984456	1708954	100908	0,69	0,71	53,4	2505966,18	21848398,3
4	A. Codazzi	1091149	1600805	80789	0,73	0,71	41,74	2002959,62	1274980,03
5	Valledupar	1089223	1647126	348990	0,53	0,71	56,38	7785019,31	22391242,48
6	El Paso	1040613	1568659	20292	0,8	0,57	40,31	535716,51	828971,01
7	Bosconia	1021365	1594257	30334	0,78	0,57	46,71	794671	1797126,01
8	Curumaní	1062442	1518454	26740	0,76	0,57	33,63	704825,61	603415,99
9	Barranquilla	922344	1704192	1112889	0,37	1	58,26	2849334,8	182420676,6
10	P. Colombia	905233	1707350	26932	0,42	0,14	67,97	575477,5	90716141
11	Cartagena	842268	1642633	895400	0,43	1	64,66	20762908,7	728273085,2
12	Turbaco	853767	1634960	63450	0,63	0,57	67,03	1314509,65	580776350,6
13	Arjona	865604	1618900	60600	0,79	0,57	59,19	1383192,42	124906060
14	Mahates	872233	1612719	22983	0,8	0,57	51,35	564481,52	1478765,13
15	S. J. Nepomuceno	890443	1605531	32296	0,83	0,57	57,1	785744,1	4725484,45
16	Plato	920092	1574916	48898	0,77	0,57	59,47	1182392,41	3211323,73
17	N. Granada	973115	1576610	16006	0,94	0,57	54,17	386632,92	491534,83
18	Pailitas	1045624	1473197	15578	0,74	0,57	26,56	433815,46	774213,46
19	El Banco	1012287	1487088	53544	0,83	0,57	33,68	1406876,17	417529,05
20	Cicuco	933943	1517991	10981	0,86	0,14	43,57	241473,67	54360,82
21	Santa Ana	946167	1523071	22840	0,9	0,14	64,05	458808,55	62467,78
22	Magangué	928496	1516925	121085	0,73	0,57	57,87	2462552,12	423747,6
23	Palmitos	873153	1534686	18344	0,79	0,57	47,98	445406,53	11564642,99
24	C. Bolívar	886329	1565801	66001	0,87	0,71	53,89	1593273,52	4661312,88
25	Tolú Viejo	849749	1537336	18587	0,8	0,57	45	469890,41	9443062,16
26	Sincelejo	853654	1517625	236780	0,55	1	41,08	6057603,85	32899065,59
27	Coveñas	823802	1531718	11270	0,77	0,57	38,43	289468,27	2064749,13
28	Momil	824834	1514454	14160	0,83	0,57	39,32	357111,96	6897852,08
29	Lorica	809272	1514347	109974	0,82	0,57	31,47	3005535,83	16268916,85
30	Chinú	854965	1499640	43331	0,82	0,57	34,01	1151311,25	21910440,67
31	Cereté	811467	1474081	83978	0,73	0,57	32,47	2215235,1	91111989,97
32	Montería	802022	1459873	381284	0,68	0,71	24,63	11005162,1	96483292,27
33	Apartadó	718154	1364334	134572	0,52	1	26,62	3611627,09	1126466,74
34	Sahagún	842424	1466382	86189	0,75	0,57	27,17	2413764,71	12192346,75
35	Planeta Rica	835121	1423202	61570	0,8	0,57	20,15	1826591,67	10664326,89
36	Caucasia	876190	1375569	85667	0,71	0,57	14,08	2577892,29	1170992,27
37	Majagual	941484	1435928	31213	0,91	0,57	28,66	804512,86	199434,05
38	S. Fe. Antioquia	807516	1212646	22613	0,6	0,57	20,1	654509,09	29530493,12
39	Medellín	834186	1181954	2219861	0,32	1	13,91	69707048,6	7232964969
40	Bello	836144	1189839	373013	0,31	0,57	12,98	11734711,7	14024664413
41	Girardota	847468	1198014	42818	0,37	0,57	7,01	1440081,4	65706733,59
42	Cimitarra	990853	1210066	32124	0,71	0,57	1,44	1180506,27	646305,67
43	B/meja	1039470	1274955	187311	0,43	1	7,4	6225503,71	3013290,25
44	S. Alberto	1075123	1351486	19656	0,63	0,57	13,03	619959,27	1605821,35
45	Aguachica	1052170	1406057	80789	0,71	1	19,49	2410259,82	21711074,27
46	Ocaña	1078232	1406850	90037	0,52	0,71	28,6	2417202,23	3208329,13
47	Convención	1081870	1428943	14018	0,73	0,71	38,49	314981,18	10358468,87
48	El Zulia	1163296	1368882	20247	0,73	0,57	35,78	514581,97	51757102,98
49	S. Cayetano	1158467	1358828	4491	0,69	0,57	45,67	95826,29	1229438,57

50	Cúcuta	1175533	1365840	585543	0,51	1	41,8	14728453,6	1561776104
51	P. S/der	1184198	1417037	8112	0,72	0,57	51,68	169451,62	1293425,7
52	V.Rosario	1178761	1357108	69991	0,57	0,57	43,51	1628082,39	1044196664
53	Los Patios	1172146	1356156	67441	0,47	0,57	35,34	1770039,71	554362635,3
54	Pamplona	1158500	1307623	52903	0,38	0,57	26,23	1569479,22	2686584,74
55	Tame	1261135	1211583	23557	0,61	1	31,36	644299,04	141259,88
56	Arauca	1367498	1276274	68222	0,5	1	41,25	1547790,9	49055,45
57	H. Corozal	1227533	1169408	9618	0,8	0,57	29,43	267214,65	82205,23
58	Belén	1128632	1153692	8471	0,56	0,57	29,93	233038,55	1362863,55
59	Susacón	1145777	1174687	3550	0,68	0,29	22,09	104481,43	26952,75
60	Málaga	1148793	1232869	18343	0,42	0,29	27,89	516145,91	191550,25
61	Piedecuesta	1118630	1256443	116914	0,42	0,57	21,54	3421045,16	41689270,31
62	Girón	1100326	1275009	135531	0,46	0,57	15,41	4115094,1	53385038,97
63	B/manga	1104774	1283352	509918	0,28	1	20,04	15182767,1	534607628,2
64	San Gil	1104020	1216637	42988	0,32	0,29	15,52	1363886,64	39371000,37
65	Barichara	1092696	1230038	7063	0,5	0,29	25,4	181740,18	605118,47
66	Barbosa	1050909	1147704	25768	0,48	0,29	7,56	902242,67	1528252,22
67	Tunja	1079775	1104921	152419	0,32	0,57	10,38	5202910,25	11550440,37
68	Cómbita	1083319	1111575	12752	0,69	0,14	19,16	369312,76	9135528,42
69	Duitama	1117611	1134263	105407	0,28	0,29	26,56	2904397,45	32018040,63
70	Sogamoso	1127162	1123283	114486	0,3	0,57	31,14	2936783,29	30380152,87
71	Aguazul	1167018	1065043	27443	0,55	0,57	25,9	773627,86	227662,17
72	Páez	1113704	1056074	3242	0,69	0,29	20,27	88173,57	37364,26
73	S/larga	1118467	1017312	3232	0,58	0,57	20,54	96743,06	59864,7
74	Ch/quira	1029245	1112711	54949	0,47	0,29	6,13	1919060,57	2670028,7
75	P. Boyacá	945843	1152106	49912	0,64	0,57	0	1834493,31	316324,28
76	Marinilla	860329	1174265	45658	0,45	0,57	8,28	1474834,48	64793969,78
77	Rionegro	857313	1172413	101046	0,27	0,29	14,36	3132623,38	116783006,5
78	Carmen de eViboral	860647	1165428	40968	0,42	0,57	24,24	1030998,67	29730339,9
79	La Ceja	850011	1158655	46366	0,35	0,57	22,25	1263242,42	17457119,09
80	Retiro	842391	1162623	16974	0,34	0,57	18,83	492559,46	73626499,34
81	Guame	850381	1183314	39753	0,41	0,57	13,91	1204071,54	34097494,53
82	Sonsón	863610	1124206	37065	0,61	0,71	32,14	848041,03	367325,8
83	Caldas Antioquia.	827680	1163206	68157	0,29	0,57	14,63	2016508,92	431343275,7
84	Salgar	802494	1148291	18074	0,76	0,57	26,28	455279,59	17972271,87
85	Concordia	804497	1151912	21226	0,73	0,57	20,82	587646,73	18219996,58
86	La Pintada	830562	1126808	6997	0,6	0,29	14,96	198490,56	213616,83
87	U. Panam	717447	1078679	5583	0,98	0,57	26,23	143273,81	212099,62
88	Quibdó	714187	1120927	109121	0,72	0,71	27,22	2689836,37	262941,65
89	Río Quito	686994	1108145	6069	0,96	0,57	36,11	131717,57	21177,02
90	Apía	792876	1056719	12889	0,7	0,57	20,6	356489,93	836847,73
91	Viterbo	803301	1052327	11805	0,6	0,57	16,9	339831,48	1184205,77
92	Supía	829809	1086625	24072	0,56	0,57	11,43	726927,15	1418498,22
93	La Virginia	800302	1034009	30095	0,48	0,57	17,84	889188,26	8961486,17
94	Pereira	821089	1023783	428397	0,34	1	15,52	12362166	142342429,3
95	Chinchiná	830456	1043492	51301	0,42	0,57	14,8	1434039,14	61603204,69
96	Manizales	839007	1050287	368433	0,3	0,57	8,28	11432285,5	34731620,5
97	Mariquita	910022	1066755	32642	0,49	0,57	1,27	1101022,38	4217691,79
98	Honda	926644	1068141	26873	0,43	0,57	0,28	935895,59	2996404,71
99	Ibagué	876945	980765	495246	0,35	1	2,32	16528950,7	31228809,01
100	Armenia	822437	993174	272574	0,34	0,57	8,12	8699887,23	89043348,78
101	Cartago	797435	1016038	121741	0,46	0,57	13,53	3807132,89	95974740,17
102	Zarzal	779297	970777	40041	0,36	0,57	13,8	1192734,79	5992359,92
103	Ansermanuevo	789367	1021736	19836	0,72	0,57	18,5	576279,79	16890171,44
104	Yotoco	745406	922571	15155	0,54	0,57	23,36	426323,4	10998501,7
105	Buga	751756	922402	111487	0,31	0,57	19,44	3154616,16	18807912,48
106	Guaduas	941081	1053661	31250	0,71	0,57	8,45	973442,2	1423175,57
107	Yacopí	971182	1095168	15840	0,78	0,57	18,33	408355,87	69325,3
108	Villeta	955204	1046125	23620	0,43	0,57	11,65	713722,84	1832238,99

109	Bogotá	1001084	1008596	6778691	0,24	1	10,16	225856029	1763042452
110	Facatativá	969348	1023359	106067	0,24	0,57	16,07	2976551,84	1204843,1
111	Choachí	1017062	992366	10874	0,55	0,29	17,84	307667,62	177579,77
112	Chipaque	1003828	983038	8191	0,61	0,57	17,84	231755,15	493235,76
113	Cáqueza	1013586	980084	15999	0,58	0,29	21,76	442817,45	2190166
114	Guasca	1015980	1025632	12208	0,37	0,14	14,36	357512,82	966970,7
115	Chía	1004479	1029636	97444	0,16	0,57	10,49	3037177,19	22844815,57
116	Tocancipá	1013147	1038378	23981	0,32	0,57	13,58	739814,7	14365853,73
117	Zipaquirá	1008871	1047395	100038	0,3	0,29	9,88	3179401,68	27654182,33
118	Chocontá	1043283	1060599	19054	0,64	0,29	13,25	606855,01	1051454,19
119	V/cio	1049699	950532	384131	0,41	1	21,54	11139557,5	4548725,25
120	P. Gaitán	1297082	1016215	15475	0,8	0,57	31,42	367424,7	157945,24
121	Granada	1040103	886706	50837	0,59	0,57	31,2	1274811,4	2907927,35
122	S.J. Guaviare	1158507	708787	39839	0,7	0,71	41,08	845217,96	49146,92
123	La Uribe	968991	849789	8180	0,94	0,57	41,08	173545,59	37718,52
124	Girardot	919784	967244	95496	0,33	0,57	11,15	2894085,7	16962039,31
125	Espinal	909190	950564	75375	0,55	0,57	5,52	2418008,71	36094358,2
126	Guamo	900876	936403	34254	0,81	0,57	10,66	1015805,38	8684893,95
127	Chaparral	844917	903734	46090	0,7	0,71	20,54	1140728,58	244842,56
128	Neiva	866308	815257	315332	0,35	1	15,85	8885355,41	2231778,61
129	Florencia	828949	670688	137896	0,56	1	40,03	3382743,37	184911,61
130	Altamira	809687	719689	3609	0,49	0,57	31,31	98625,93	555863,91
131	Gigante	836358	767103	28174	0,64	0,57	25,9	774294,63	317642,59
132	Suaza	808871	710821	14617	0,73	0,57	41,03	339041,45	453066,34
133	Hobo	847351	777554	6521	0,68	0,57	20,98	178583,47	935168,09
134	Tesalia	816342	766759	8845	0,56	0,57	32,63	228653,74	439057,28
135	Yaguará	848886	792529	7855	0,5	0,57	22,14	208539,54	1137030,62
136	Teruel	834651	794910	8198	0,72	0,57	28,16	205243,54	206552,44
137	Nátaga	807610	773056	5807	0,69	0,57	39,2	142585,66	680115,75
138	La Plata	798509	756070	52549	0,69	0,57	43,68	1361663,12	1518366,64
139	Pitalito	776125	696194	102937	0,65	0,57	36,39	2773590,14	3245927,09
140	S. Agustín	753344	700639	29699	0,67	0,57	42,46	753103,99	2887388,86
141	Puracé	731098	755905	14923	0,78	0,57	47,16	392572,57	3138779,27
142	Inzá	779049	773704	27172	0,89	0,57	50,03	650711,01	1096810,59
143	Páez	789288	784499	31548	0,86	0,57	51,96	728979,97	1167246,56
144	Silvia	748609	787356	30826	0,78	0,57	61,84	601691,99	290089,41
145	Totoró	741147	769417	17611	0,88	0,57	49,86	417666,58	446230,61
146	Piendamó	726860	783943	36225	0,72	0,57	42,57	969626,17	13203550,78
147	Popayán	717717	762370	258653	0,41	1	46,99	6955068,91	49137564,14
148	Timbío	709874	752114	30222	0,6	0,57	55,49	731667,59	30348640,91
149	El Tambo	698047	761956	34258	0,83	1	65,38	689333,95	424259,24
150	Cajibío	702932	780517	34818	0,91	0,57	56,87	758517,1	7744842,37
151	Toribío	756380	818821	26616	0,88	0,71	43,95	591272,84	1568882,01
152	Jambaló	750342	799441	14831	0,92	0,57	53,84	285822,38	533550,36
153	Morales	716291	796398	24381	0,89	0,57	52,46	531651	2787532,27
154	S/der de Quil.	732378	824921	80653	0,63	1	37,44	2116429,16	26094445,39
155	Villa Rica	735129	841272	14378	0,64	0,57	32,58	376498,81	25769282,9
156	Caloto	746877	831006	36901	0,74	0,71	34,18	951423,7	25515429,57
157	Palmira	753492	883341	278358	0,3	0,57	29,16	7488621,16	665922297,9
158	Cali	728409	874874	2075380	0,32	1	32,74	54781585,2	1651955273
159	El Cerrito	753769	894361	53244	0,34	0,57	24,46	1433556,54	48631638,11
160	Yumbo	731820	884353	90642	0,42	0,57	28,16	2388491,61	977872829,5
161	Dagua	712667	908092	34310	0,63	0,57	28,16	904096,86	34161158,36
162	B/tura	666376	922586	324207	0,67	1	38,05	7147610,81	2349991,16
163	Rosas	703731	742219	11421	0,78	0,57	63,56	258912	595093,56
164	Patía	674848	723298	20807	0,64	1	69,8	454092,7	276053,2
165	S. Sebastián	698940	692639	12976	0,84	0,57	72,39	270096,06	62179,17
166	S. Rosa Cauca	722382	680204	5300	0,88	0,57	82,27	93791,89	31737,84
167	Villagarzón	717884	603210	15085	0,94	0,57	46,49	362227,43	1862467,8

168	Mocoa	711772	611438	36185	0,53	0,57	44,28	933386,87	2677152,02
169	San Miguel	688495	519403	15245	0,87	0,57	56,38	307328,55	11733,21
170	Pasto	642745	627413	383846	0,42	0,71	52,4	9726741,14	12260899,21
171	Sandoná	622058	633981	25134	0,66	0,57	61,9	540120,72	4133801,48
172	Taminango	635734	666095	17354	0,8	0,57	60,46	385107,07	917921,28
173	Unión Nariño	660190	668708	27588	0,74	0,57	60,46	612212,39	1845152,96
174	Tangua	631757	614908	10672	0,73	0,57	61,57	240543,08	5605967,27
175	Imués	624046	608079	7387	0,71	0,14	70,9	153878,83	1174104,35
176	Túquerres	605519	612324	41205	0,69	0,57	80,45	790342,29	6253657,97
177	Sapuyes	597033	607504	7369	0,68	0,14	90,12	130513,91	4804337,47
178	Ipiales	602981	583416	109865	0,61	0,86	80,56	2034048,38	539101,17
179	Tumaco	478436	693576	161490	0,84	1	100	2467460,66	25744,07
180	Samaniego	608368	639392	49992	0,72	0,71	90,34	818762,85	969278,5
181	Mercaderes	652728	700789	17670	0,82	0,57	66,21	386391,72	737850,84

Tabla 6. Información consolidada para cada nodo. Fuente: elaboración propia.

Las columnas X, Y indican coordenadas planas de cada nodo; POB\_2005 indica el total de población municipal para dicho año; IPM hace referencia al Índice de Pobreza Multidimensional; CONF es el indicador del número de eventos generados en el conflicto interno; OMEGA es el indicador de accesibilidad; PP es el Potencial de Población y FLUJO indica el flujo entre municipios directamente conectados.

## 5 PROCESAMIENTO DE DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Medidas de centralidad

En este aparte se calculan los indicadores lugar central, centro medio y centro mediano de la red vial nacional primaria, los cuales fueron descritos en 3.4. En la Figura No. 9 se muestran estas posiciones.

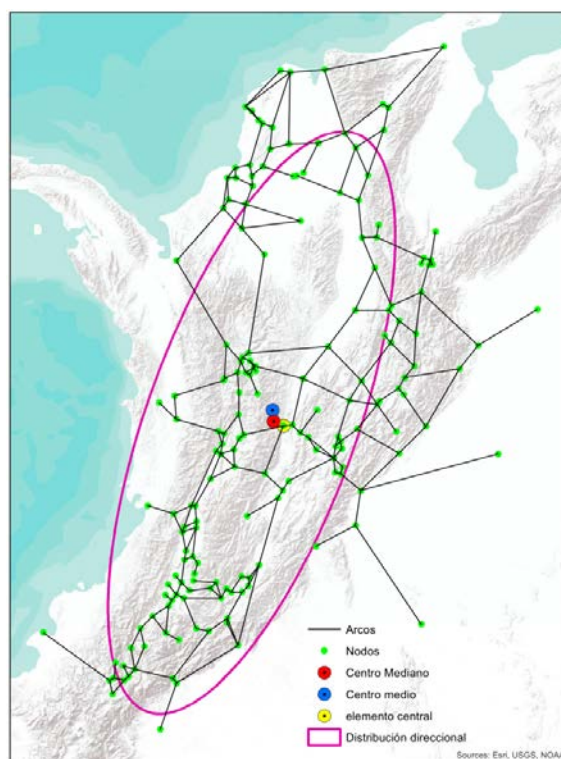


Figura 9. Medidas de centralidad. Fuente: elaboración propia

Como elemento o entidad central; es decir, el más cercano al centro de la red vial nacional es el municipio de Mariquita. Por su parte, el centro medio simple, es decir el lugar en donde coinciden las medias de las coordenadas norte y este del conjunto de nodos, se encuentra desplazado al norte del elemento central, hacia el municipio de Samaná.

Sin embargo, teniendo en cuenta las dimensiones de la red, la diferencia en posición entre ambos indicadores no resulta sustancial. El último valor corresponde al centro mediano, el cual en su definición acumula la menor suma de distancias euclidianas hacia los demás elementos o nodos de la red, ubicándose cerca de los dos anteriores hacia el municipio de Marquetalia.

Estos valores de centralidad muestran cómo esta zona cercana al valle medio del río Magdalena se constituye en el núcleo geométrico de la red vial nacional primaria y su identificación puede servir como elemento de análisis en la programación de nuevas conexiones viales o en la optimización de las existentes.

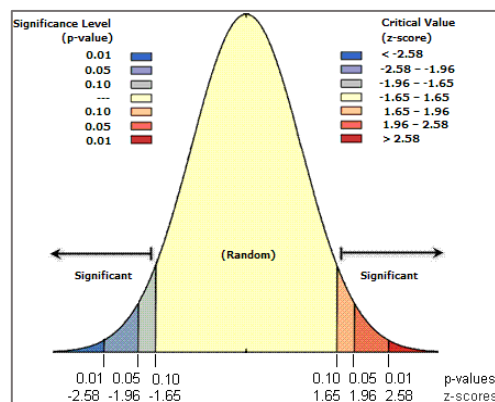
La distribución direccional, mostrada por la elipse de desviación estándar, indica que la red tiene una orientación Sudoeste-Nordeste, aproximadamente en la misma dirección de los sistemas montañosos andinos, con tendencia alargada en dirección Norte-Sur, lo cual muestra una deficiencia geométrica de la red en el sentido de tener una cobertura Este-Oeste, resultando relativamente estrecha en cuanto a su amplitud en esta dirección geográfica.

## **5.2 Medidas de autocorrelación espacial y mapeo de clusters.**

De acuerdo con lo planteado en 3.5, en este aparte se estima el índice de Moran para las variables explicativas y la variable dependiente. Con este índice, identificado con la letra  $I$ , se mide la autocorrelación espacial global a partir de la localización y valor de cada variable sobre cada nodo de la red. El valor del índice oscila entre -1 y 1 y constituye una medida de comprobación de la hipótesis nula, según la cual existe aleatoriedad completa para cada variable (Estrada Arbeláez & Moreno Mayorga, 2013) y no existe autocorrelación espacial. Al existir autocorrelación espacial, se rechaza la hipótesis nula. De este modo, el índice permite observar si se trata de una distribución espacial aleatoria, agrupada o dispersa.

La autocorrelación espacial puede entenderse como una medida de similitud en cuanto al grado en que las características de un lugar son similares (o diferentes) en la vecindad de un sitio de interés, o también puede tomarse como medida de la probabilidad de la ocurrencia de un evento similar en el entorno del punto de interés, o como correlación, en el sentido de medir la correlación de una variable consigo misma a través del espacio (DANE, 2015).

La expresión general del índice es  $I = \frac{N \sum_{i,j} w_{ij} [x_i - \bar{x}][x_j - \bar{x}]}{S_0 \sum_{i=1}^N [x_i - \bar{x}]^2}$ ;  $i \neq j$ . Donde: N es el tamaño de la muestra;  $x_i$  es el valor de la variable sometida a análisis de dependencia espacial en cada nodo,  $S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij}$ ;  $w_{ij}$  es la matriz binaria de pesos que asigna valores de 1 a los vecinos inmediatos de cada nodo y 0 a los demás y  $\bar{x}$  es la media muestral de la variable (Galvis Aponte, 2007). La validación que realiza ArcGIS del índice de Moran se apoya en el valor de probabilidad de que el patrón observado sea aleatorio ( $p$ ); si este valor es muy pequeño, se rechaza la hipótesis nula. Por su parte, el criterio Z indica el número de desviaciones estándar<sup>3</sup> y ayuda a estimar la significancia del valor de I. La Figura No. 10 muestra la distribución de estos intervalos dentro de la campana e indica las relaciones e interpretaciones de los valores para  $p$  y Z.



<sup>3</sup> Esta explicación se basa en el documento SIG para estadística, preparado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE en el año 2013 (DANE - Investigación y Desarrollo, 2013) y las ayudas en línea de ArcCGIS.

Figura 10. Valores  $p$  y  $Z$ . Fuente: ArcGIS.

Cuando se obtienen valores de  $p$  muy pequeños y valores de  $Z$  grandes (ubicado en una de las colas de la campana), se rechaza la hipótesis nula. En el resultado del análisis, ArcGIS muestra una campana dividida en tres áreas de color: la parte central, amarilla, está comprendida entre los valores positivo y negativo del 90% del nivel de confianza y los extremos azul y naranja representan niveles del 95% y 99%. La ubicación del valor  $p$  indicará también el área bajo la curva; mientras más se aleje de la zona central, menor será la probabilidad de contar con una distribución aleatoria.

### 5.2.1 Índice de Moran para la variable población 2005

La Figura 11 muestra la distribución de la variable población y los resultados obtenidos, de índice de Moran y los valores  $p$  y  $Z$ . Los resultados obedecen a un nivel de confianza del 90%.

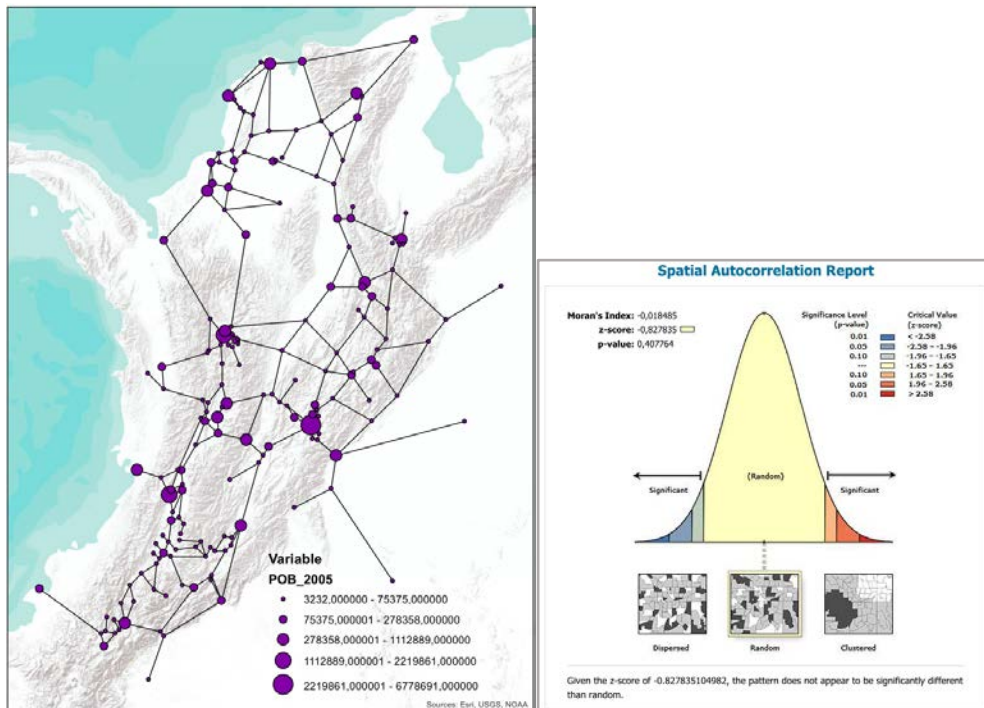


Figura 11.

Distribución de la variable población para el año censal 2005 e índice  $I$  de Moran global. Fuente: elaboración propia.



Se observa que el nodo con mayor población es Bogotá, seguido por las demás grandes ciudades del país como Medellín, Cali, Bucaramanga, Barranquilla, Cartagena y Cúcuta. Los valores muestran una marcada dispersión de los datos, los cuales varían entre 3232 habitantes para Sabanalarga y 6778691 para Bogotá. Esta distribución confirma la variabilidad regional del país, su heterogeneidad poblacional y, por lo tanto económica (Galvis Aponte, 2007). En este resultado se puede observar claramente el triángulo Bogotá, Medellín, Cali, la región andina, la cual comprende las tres anteriores y se extiende hasta Norte de Santander y finalmente el corredor costero.

En esta representación no se puede hablar de densidad de población, dado que no se considera el área de cada municipio sino que estos se han asimilado a puntos o nodos de la red. El valor de I sugiere que no hay autocorrelación espacial y los valores p y Z sugieren que la distribución de la variable es aleatoria, cumpliéndose así la hipótesis nula de distribución aleatoria de la variable. Este análisis recae sobre los nodos de la red y no la totalidad de municipios del país, hecho que puede conducir a conclusiones que difieren de los estudios de población o pobreza dedicados al total nacional.

## 5.2.2 Índice de Moran para la variable IPM 2005

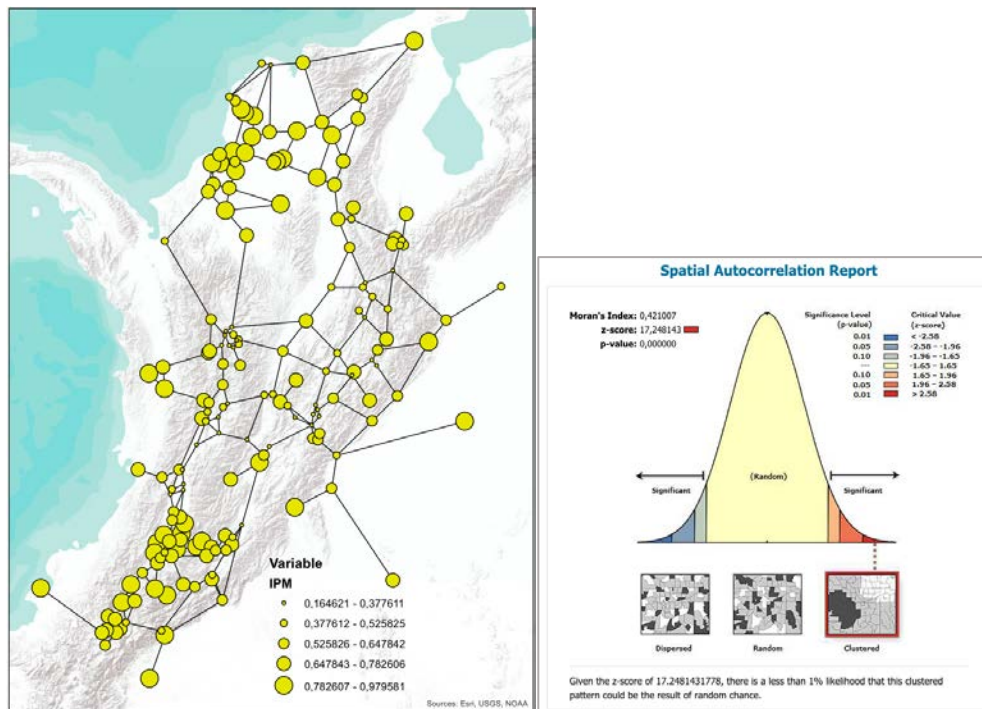


Figura 12. Distribución de la variable IPM para el año 2005 e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.

La distribución espacial del IPM, según la Figura 12 es de tipo agrupado o *clustered*. Esto significa que, a diferencia de la variable población, en este caso no se cumple la hipótesis nula y la existencia de grupos permite entrever que municipios con cierto nivel de IPM tienden a estar rodeados de municipios con condiciones similares. Municipios con alto nivel de pobreza se hallan entre municipios con alto nivel de pobreza y viceversa (Estrada Arbeláez & Moreno Mayorga, 2013).

De manera general, es posible observar que los valores del IPM tienden a ser mayores en la periferia, bien sean la costa Caribe, el suroeste del país, la costa Pacífica y los llanos orientales, mientras que alrededor de Bogotá, Medellín y Cali, los nodos tienden a presentar condiciones similares a los de la ciudad principal alrededor de la cual se conectan.

En este sentido, se confirma el hecho de que la ubicación de una población es determinante en su nivel de pobreza; es decir, las condiciones de pobreza

multidimensional de un municipio están relacionadas con las de sus vecinos, no solamente inmediatos, sino mediatos (Pérez V. G. , 2007).

### 5.2.3 Índice de Moran para la variable Conflicto

De manera análoga a la variable IPM, la variable conflicto, la cual fue descrita en 4.4.5, muestra una distribución espacial de tipo agrupada o *clustered*. En este sentido, existe la tendencia de que municipios con alta ocurrencia de eventos y/o intensidad, tienden a estar rodeados por municipios con condiciones similares y viceversa.

El índice I, cercano a 0,05 muestra que no hay autocorrelación espacial, aunque tienden a prevalecer valores más altos en las zonas periféricas de la red. El caso de Bogotá, a pesar de ser central, muestra un valor alto, debido a que el conteo de eventos tuvo en cuenta el total municipal y no solamente las áreas urbanas. Por su parte, los municipios de Tumaco, Buenaventura, Cartagena, Barranquilla y Santa Marta además de encontrarse localizados en uno la zona periférica de la red y dada su importancia como puertos internacionales, también presentan un valor alto para la variable conflicto, hecho que puede tener relación con su alto valor estratégico como nodos de alto interés global para el flujo de bienes tanto legales como ilegales.

En la Figura 13 se observa la distribución de nodos y la magnitud de la variable, así como los indicadores de autocorrelación espacial. Debe mencionarse que por la naturaleza de los datos disponibles, los valores iniciales se hallan distribuidos en siete categorías, según se explicó en 4.4.5.

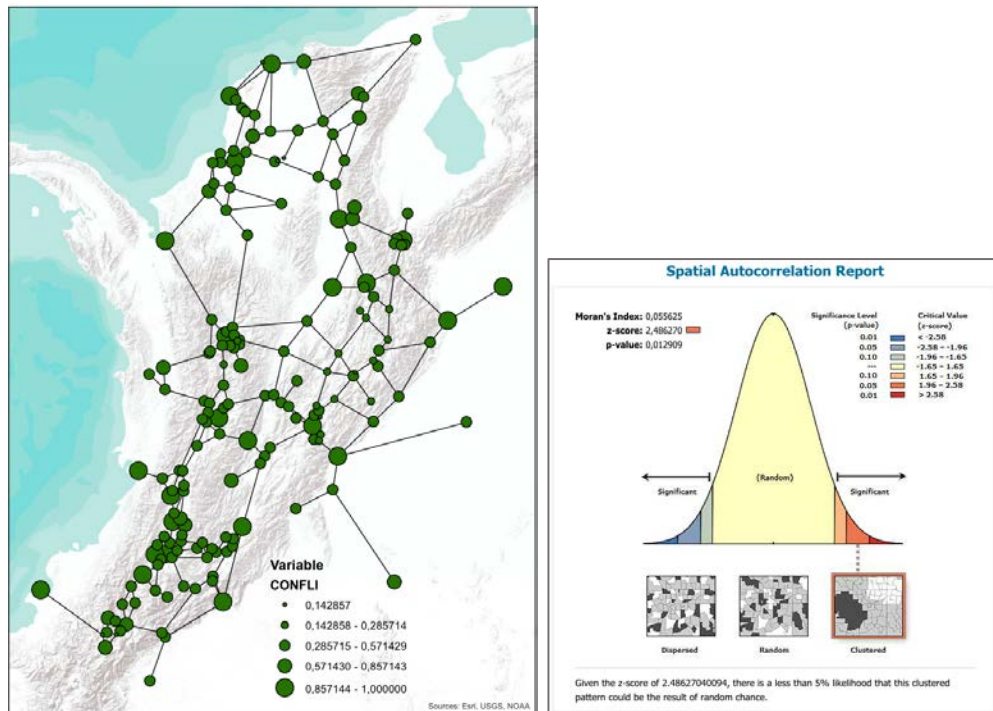


Figura 13. Distribución de la variable CONFLICTO e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.

#### 5.2.4 Índice de Moran para la variable Potencial de Población

En este caso, se tiene un valor de I cercano a cero; es decir sin autocorrelación espacial global, hecho corroborado por los valores  $p$  y  $Z$ , obteniéndose un resultado similar al de la variable población 2005; es decir, una distribución aleatoria de la variable a través de los nodos que conforman la red. Si bien esta variable está generada en función de la población de los nodos, es un indicador alternativo de accesibilidad y muestra las interacciones entre los municipios, las cuales son afectadas, mediante un efecto de fricción, por la distancia entre ellos (Mierez, 2010).

No obstante la aleatoriedad en la distribución señalada por los indicadores, es notable la influencia generada, nuevamente, por las principales ciudades del país; esto es Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga y Cúcuta (Ver Figura 14). Mientras mayor es la población que reside en un municipio, mayor será su capacidad de generar interacciones de tipo socioeconómico con sus municipios

vecinos. Si bien esto se observa en los resultados obtenidos, no se observa una configuración del territorio en clusters de interacción. Sin embargo, debe tenerse presente que este análisis solamente incluye municipios directamente conectados por la red vial nacional primaria y no todos los del país.

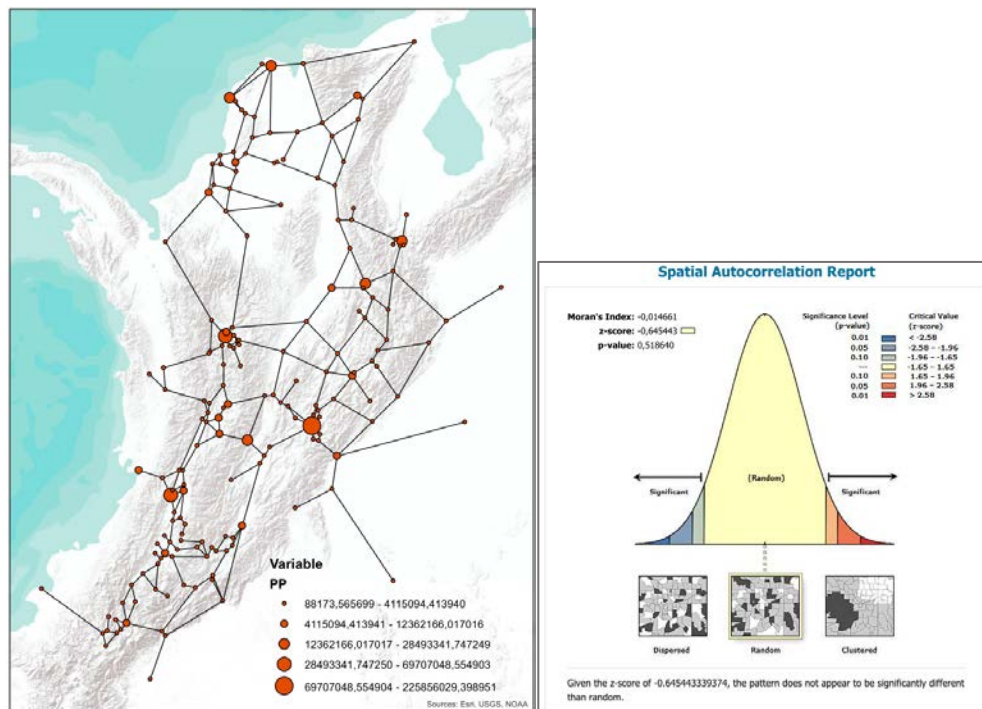


Figura 14. Distribución de la variable Potencial de Población e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.

### 5.2.5 Índice de Moran para la variable Flujo

Con base en la descripción del flujo realizada en 3.4, se procedió a estimar esta variable con base en una matriz de origen destino para cada nodo de la red. A diferencia del potencial de población, el cual involucra una relación de uno a todos, el cálculo del flujo solamente involucra, para cada punto, los municipios directamente conectados con él. En este sentido, el flujo es más sensible a la interacción local y el efecto de la distancia, hecho que obliga a observar la variable con precaución. Por ejemplo, en el proceso de cálculo de la matriz origen/destino se observó que el flujo

entre Medellín y Bello es mayor que el existente entre Bogotá y Facatativá, lo cual se debe, principalmente a las distancias en los dos casos.

Probablemente, esta sea la causa por la cual el flujo presenta una distribución agrupada, por lo cual se rechaza la hipótesis nula de distribución aleatoria. En este caso el agrupamiento es muy fuerte, y se destacan como máximos los nodos de Medellín, Bogotá, Cali, Cúcuta y Barranquilla. Esto también puede obedecer al grado de aglomeración local que presenta la red; es decir, al mayor número de nodos por unidad de área en los casos de Antioquia (Medellín) y Norte de Santander (Cúcuta). La Figura 15 muestra el comportamiento de la variable flujo.

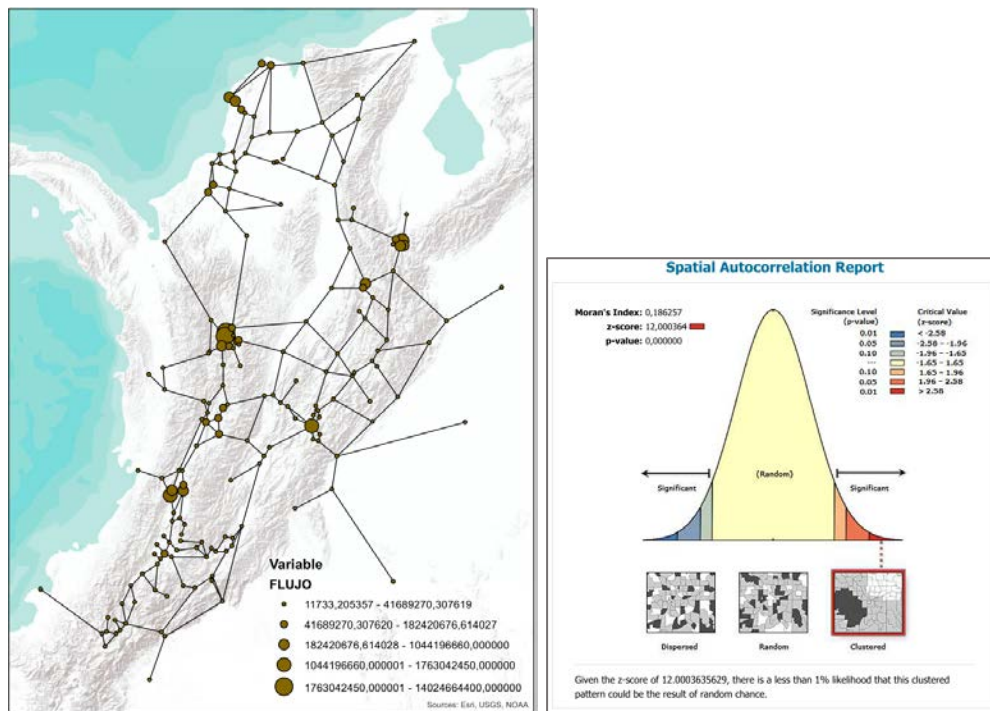


Figura 15. Distribución de la variable Flujo e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.

El particular valor de cero para el indicador  $p$  y el altísimo valor de  $Z$  sugieren que la variable debe revisarse y probablemente debe modificarse el método de su obtención. De hecho la significancia del valor de  $I$  es muy baja.

### 5.2.6 Índice de Moran para la variable Omega

La autocorrelación espacial, como en el caso del flujo entre nodos, presenta una distribución agrupada (*clustered*), con valor de I de 0,69, valor *p* de cero (no hay probabilidad de que cumpla la hipótesis nula) y Z de 28,34. Los nodos ubicados en la zona central del país muestran mayor accesibilidad, siendo el máximo Puerto Boyacá (valor de omega = 0) y el nodo con la accesibilidad más desfavorable en todo el grafo es Tumaco, con valor de Omega = 1. Esto guarda relación con los indicadores de centralidad vistos en 5.1, corroborando que esta zona central del grafo representa un área de importancia estratégica para el desarrollo económico del país. La Figura 16 muestra la distribución espacial de la accesibilidad a lo largo de la red vial nacional primaria.

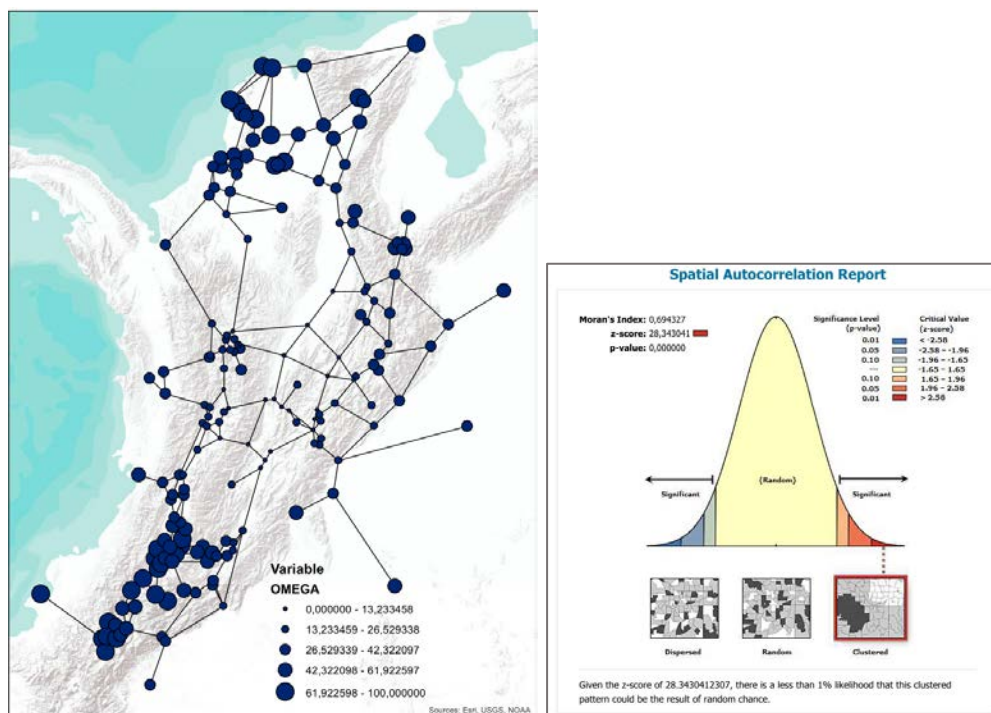


Figura 16. Distribución de la variable Accesibilidad (omega) e índice I de Moran global. Fuente: elaboración propia.

En el mapa es posible observar tres regiones, en sentido, norte - sur, correspondiendo a las regiones Caribe y andina sur las condiciones de accesibilidad más desfavorables. La zona central, en consonancia con lo visto en las variables anteriores, muestra condiciones de mejor accesibilidad y por lo tanto de conectividad y oportunidades.

De este modo, la variable accesibilidad refleja el hecho de que el valle medio del Magdalena es probablemente uno de los más importantes articuladores territorial del país, desde el punto de vista de la red vial primaria, y su desarrollo merece la máxima atención por parte de los tomadores de decisiones en los ámbitos local, regional y nacional.

### **5.3 Modelado de relaciones espaciales**

En esta sección se procura establecer el comportamiento de la variable dependiente (accesibilidad) con respecto a las variables explicativas mediante el modelo de regresión lineal global conocido como mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés *-Ordinary Least Squares-*). A partir de los resultados de esta regresión, se procede a aplicar el método de la regresión geográficamente ponderada (GWR), el cual a diferencia de los OLS permite estimar localmente los coeficientes de correlación para cada uno de los nodos de la red a partir de las variables explicativas con mayor incidencia sobre la variable dependiente, o sea, la accesibilidad omega.

#### **5.3.1 Mínimos Cuadrados Ordinarios**

Se trata de un método de regresión lineal global mediante el cual se examina la respuesta de la variable dependiente ( $y$ ) frente a las independientes ( $x$ ) mediante la estimación de los coeficientes respectivos ( $\beta$ ) y el error aleatorio de la estimación ( $\epsilon$ ). La expresión general de los OLS es  $y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_n + \epsilon$  (ESRI, 2015) y su condición es que la suma de los cuadrados de los residuos sea mínima.

Incluyendo todas las variables explicativas: Población 2015, IPM 2015, Conflicto, Potencial de Población y Flujo, se utilizó la herramienta OLS de ArcGIS 10.3.1 para explicar la variable dependiente omega. ArcGIS arroja una notable cantidad de valores, los cuales se resumen en la Tabla 7.



### Summary of OLS Results - Model Variables

Variable	Coefficient [a]	StdError	t-Statistic	Probability [b]	Robust_SE	Robust_t	Robust_Pr [b]	VIF [c]
Intercept	-5,889805	6,074887	-0,969533	0,333607	6,624864	-0,889046	0,375188	-----
POB_2005	0,000156	0,000031	4,945613	0,000002*	0,000052	3,019413	0,002918*	196,601148
IPM	64,553329	6,973531	9,256908	0,000000*	5,896683	10,947397	0,000000*	1,133539
CONFLI	1,408173	7,312172	0,192579	0,847509	9,384275	0,150057	0,880886	1,325486
PP	-0,000005	0,000001	-4,948831	0,000002*	0,000002	-3,070520	0,002485*	190,550135
FLUJO	-0,000000	0,000000	-0,451544	0,652167	0,000000	-1,082565	0,280485	1,122052

### OLS Diagnostics

Input Features:	Coregido_11_10_2015	Dependent Variable:	OMEGA
Number of Observations:	181	Akaike's Information Criterion (AICc) [d]:	1544,759147
Multiple R-Squared [d]:	0,384429	Adjusted R-Squared [d]:	0,366841
Joint F-Statistic [e]:	21,857768	Prob(>F), (5,175) degrees of freedom:	0,000000*
Joint Wald Statistic [e]:	141,095052	Prob(>chi-squared), (5) degrees of freedom:	0,000000*
Koenker (BP) Statistic [f]:	12,667438	Prob(>chi-squared), (5) degrees of freedom:	0,026703*
Jarque-Bera Statistic [g]:	6,851047	Prob(>chi-squared), (2) degrees of freedom:	0,032532*

Tabla 7. Resumen de resultados de OLS para todas las variables del modelo y diagnóstico generado por ArcGIS. Fuente: elaboración propia.

Para la interpretación del modelo se siguen los siguientes pasos (DANE - Investigación y Desarrollo, 2013), (Estrada & Durán, 2014):

1. Se valora el rendimiento del modelo mediante el valor ajustado de  $R^2$ , el cual es 0,37 indicando una explicación baja de la accesibilidad a partir del conjunto de variables independientes.
2. Los valores de probabilidad (probability b) operan sobre el supuesto de que b sea cero. Si su valor es cercano a 0, la variable resulta apropiada para el análisis. De otra parte, el factor de inflación de la varianza (VIF) refleja la relación de cada variable explicativa con la dependiente mediante el cambio que esta experimenta ante un cambio unitario de la explicativa mientras las demás permanecen constantes. Los valores VIF indican la redundancia entre variables explicativas y no deben exceder 7.5. Si esto ocurre, deberían eliminarse una a una del modelo.

3. Se evalúa la importancia del modelo mediante el estadístico F conjunto o el índice estadístico *Wald*. En este caso, un valor menor que 0,05 indica que el modelo es estadísticamente significativo.
4. Se evalúa la estacionariedad del modelo mediante el estadístico Koenker o Breusch Pagan (BP), el cual indica si las variables explicativas tienen una relación consistente con la variable dependiente tanto en el espacio geográfico como en el espacio de los datos; es decir, si el proceso espacial se comporta de igual forma en cualquier parte del área de estudio (estacionariedad) y si la variación entre los valores previstos y las variables explicativas no cambian al modificar las magnitudes (homocedasticidad). Si este estadístico es significativo, se puede pensar en realizar una regresión geográficamente ponderada. La presencia del asterisco señala que se deben tener en cuenta únicamente los valores de probabilidad b del punto 2.
5. Se verifica si los residuales se distribuyen normalmente, esto es mediante el estadístico de Jarque-Bera. De no ser así, el modelo puede tener tendencia. Esto se corrobora por la presencia del asterisco. La Figura 17 muestra el patrón de distribución de los residuales de la regresión mediante OLS.



Figura 17. Distribución de los residuales de la regresión mediante mínimos cuadrados ordinarios.  
Fuente: elaboración propia.

Los puntos de color rojo y naranja indican que los valores observados de la accesibilidad omega rebasan los valores estimados por el modelo, por lo tanto son superiores a las predicciones. Los puntos grises y azules señalan nodos en los cuales los valores observados son inferiores a las predicciones.

Las premisas descritas para la regresión OLS no se cumplen fácilmente en el espacio, como lo evidencian los resultados obtenidos para el caso de la red vial nacional. Entre las razones que explican esta situación se encuentra la heterogeneidad de los nodos de la red, particularmente en las diferencias en número de habitantes, el índice de pobreza multidimensional y las medidas de accesibilidad. Los procesos espaciales vistos tienden a no ser estacionarios y, por el contrario, muestran fuertes cambios entre una región y otra.

Por estas razones, se entiende que el modelo de regresión lineal OLS exige el cumplimiento de una familia de condiciones que no se han logrado cumplir con las variables que se han considerado. Por lo tanto, es posible considerar otro camino, el de la estimación de la correlación para cada nodo de la red a partir del método GWR.

### 5.3.2 Regresión Geográficamente Ponderada (GWR)

Este modelo de regresión se asemeja al método de los OLS en el sentido de estimar la regresión lineal para la variable dependiente a partir de las explicativas, pero con la importante diferencia de que no es global y, reconociendo que las relaciones entre las variables cambian en el espacio, genera una familia de ecuaciones de estimación de la variable dependiente, tantas como nodos o elementos de análisis existen. De este modo, las relaciones varían a lo largo del área de estudio (Bennet & Vale, 2014).

A partir de las ayudas y las guías mencionadas en 5.3.1 se determinó que para el cálculo de la GWR se utilizarían todas las variables explicativas como una forma de confrontar el resultado con el indicador global OLS. Si bien esto puede significar una no observancia de las restricciones del modelo global OLS, se quiso dar prioridad a la posibilidad de comparar los resultados considerando las mismas las mismas variables.

Para estimar la GWR se utilizó el módulo *spatial statistics* de ArcGIS, siguiendo los parámetros allí definidos por defecto. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 18. En los parámetros de entrada se definió como dependiente a la variable accesibilidad omega y explicativas las mismas que para los OLS.

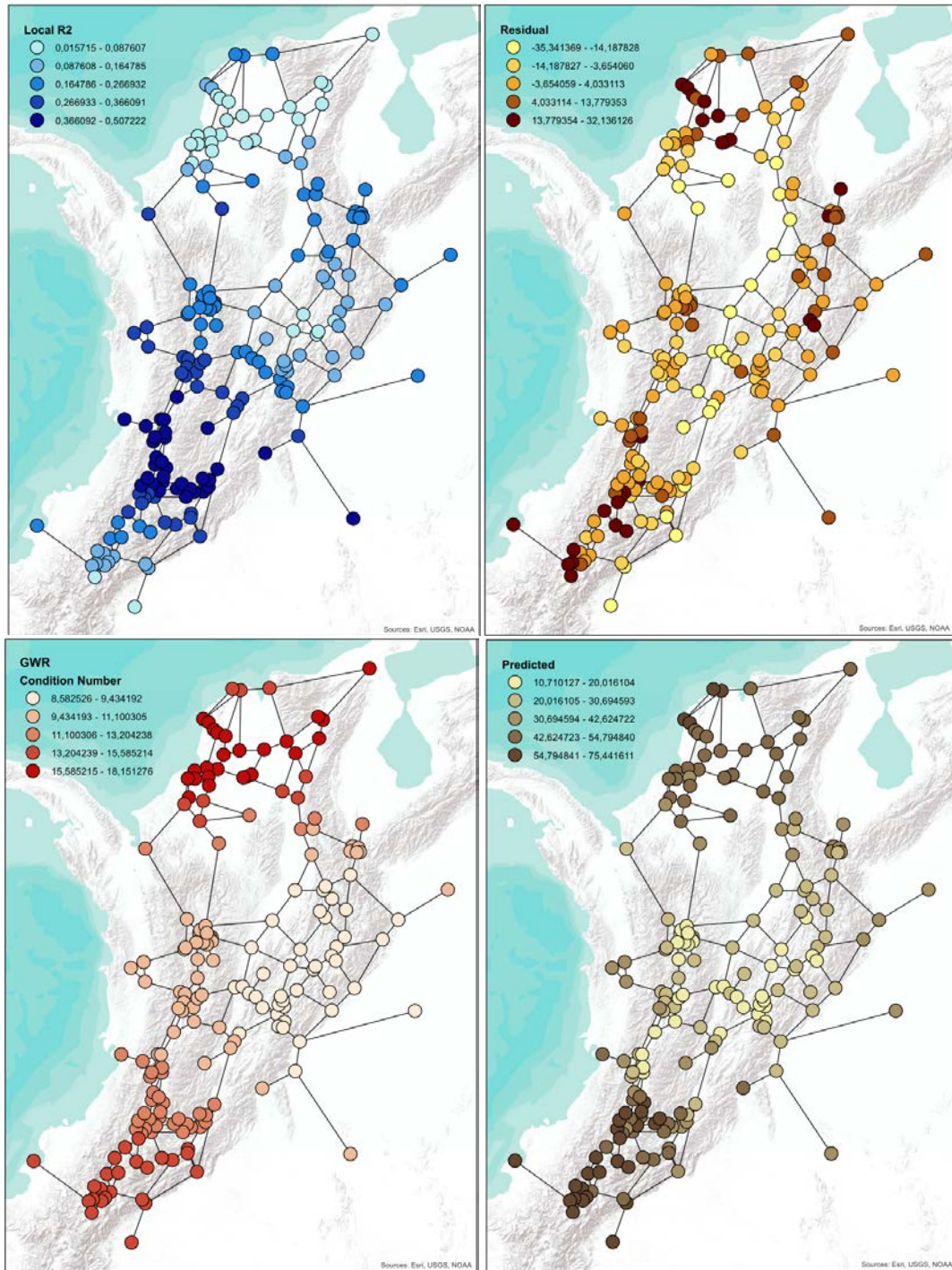


Figura 18. Resultados de la regresión GWR: Coeficientes de correlación, residuales, número de condición y predicción. Fuente: elaboración propia.

El kernel se estableció como adaptativo, indicando que el ancho de banda de la regresión varía según la densidad de los nodos vecinos, cuyo número óptimo lo selecciona la herramienta automáticamente en la opción AICC.

En la Figura 18 se observa que los coeficientes de correlación varían entre 0,01 y 0,5. En el caso de los OLS el valor global fue 0,37. Si bien no es posible concluir que se trata de una estimación más favorable, se cuenta con la distribución espacial de los  $R^2$ , lo cual es una ventaja importante frente al indicador único anterior. Sin embargo, se puede afirmar que el modelo se ha desempeñado pobremente y quizás se requieran variables adicionales para explicar la accesibilidad.

Los residuales se obtienen restando los valores ajustados de la variable dependiente de los valores observados. La accesibilidad de entrada –omega- varía entre 0 y 100 y los residuales entre -35 y +32, lo cual da cuenta de diferencias altas, corroborando la pobreza del modelo.

Por su parte, el número de condición evalúa la colinealidad local; es decir, una variable independiente puede ser combinación lineal de otras. Si la colinealidad es fuerte, el modelo puede ser inestable. Si esto ocurre, el indicador supera el valor de 30 y el resultado puede ser no confiable. Este no es el caso, dado que el máximo alcanzado ha sido 18,15.

Finalmente, el mapa de predicción (predicted) muestra la variable omega calculada por el modelo de regresión GWR, con valores entre 10 y 75, frente a 1 y 100 de los valores observados. No obstante, es un resultado relativamente aceptable, pero sugiere la inclusión de más variables explicativas, como se señaló anteriormente.

## 6 CONCLUSIONES

La red vial nacional como elemento de estudio reviste complejidades que demandan para su comprensión la incorporación de información complementaria, más allá de la que se obtuvo para este proyecto de investigación. La presente aproximación, basada en la teoría de grafos y el análisis espacial, requiere para su refinamiento de datos relacionados con el transporte tales como flujos de personas y bienes, así como mediciones de tiempos de viaje.

Este requerimiento se puede concretar en mediante una posterior investigación complementaria en el ámbito de la teoría de las redes complejas y la experimentación con otras técnicas del análisis espacial. Sin embargo, los resultados a alcanzar estarán sujetos en buena medida, como en el presente caso, a la disponibilidad de datos información adecuados, y este es un impedimento sistemático para la investigación en el país. No obstante, se ha logrado alcanzar el cometido planteado en el Objetivo General en cuanto a examinar la red vial nacional y procurar una explicación a partir de variables socioeconómicas.

No obstante, este trabajo muestra cómo la zona correspondiente al valle medio del Magdalena, entre los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Tolima y Caldas se constituye en el centro de la red y posiblemente el principal elemento de articulación territorial del país, bien por su centralidad, o bien por sus características de conectividad y accesibilidad.

Considerando el camino metodológico que se ha abordado, se reconoce que este implica riesgos: De una parte, los datos de accesibilidad se calcularon dentro de la geometría de un grafo, pero los demás datos no se pudieron incluir dentro de esa estructura reticular, dado que no se halló una metodología o software para realizarlo. En su lugar, los análisis se hicieron con sujeción a los algoritmos propios de ArcMap, los cuales estiman las condiciones de distancia e interacción por fuera del grafo. De otra parte, los arcos se han asumido como homogéneos y las variables objeto de análisis se localizaron en los nodos de la red. Esta situación deja abierta la posibilidad de explorar caminos metodológicos diferentes, en los cuales sea posible asignar pesos a los arcos en virtud de su estado, por ejemplo afirmado a pavimentado, o si se trata de vías de calzada doble o sencilla.

Esta combinación metodológica reviste una apuesta por encontrar un camino alternativo para el análisis de redes y se convierte en un paso exploratorio enmarcado en el logro de los objetivos específicos, particularmente en cuanto al

uso de las técnicas de correlación espacial. Bajo esta idea de experimentación, en este trabajo también se intentó cuantificar el aporte que hacen diferentes variables, en principio independientes sobre la variable dependiente; es decir, la accesibilidad.

En general, este tipo de tratamiento no es novedoso, pues se trata de un análisis multivariado. En donde se han realizado pruebas poco frecuentes en el análisis de redes es en el tipo de regresiones calculadas para acercarse a la explicación de la variable dependiente. En este sentido, el empleo de los mínimos cuadrados ordinarios y la regresión geográficamente ponderada ofrecen un potencial que debe ser explorado con mayor detenimiento, particularmente porque a partir de la última se obtienen coeficientes de correlación locales, para cada punto del estudio, y a partir de cada una de las variables explicatorias. Esto significa una riqueza mayor que la ofrecida por las formas de regresión y correlación de tipo global, las cuales han sido más ampliamente utilizadas en el tratamiento de los datos espaciales y en estadística.

Uno de los resultados más importantes, desde el punto de vista cuantitativo, lo constituyen los valores de la regresión geográficamente ponderada, particularmente el coeficiente de correlación  $R^2$ . Explicar la variable dependiente con coeficientes entre 0 y 0,5 significa que bien las variables explicativas no son las adecuadas, o bien, que no son suficientes. Por lo tanto, ese otro 50% por explicar puede encontrarse en datos e información que pueden ser también de tipo socioeconómico o técnico, tales como pendientes, estado de las capas de rodadura, tasas de accidentalidad, conteos de carga y pasajeros, entre otros. En este sentido, se ha logrado cumplir con el tercer objetivo específico, reconociendo la parcialidad del resultado.

Este resultado conlleva a otra reflexión, si bien la regresión geográficamente ponderada estima los coeficientes de correlación para cada nodo, a diferencia de la correlación global, la cual estima un solo coeficiente para el conjunto de nodos, su naturaleza continúa siendo lineal. Por lo tanto, los resultados también pueden indicar que la variable accesibilidad y las empleadas en su explicación no se ajustan a este tipo de condicionamiento y obedecen a patrones de variabilidad y distribución no lineales y, por lo tanto, más complejas.

De otra parte, llama la atención el hecho de que se verifica la vigencia que mantienen los planteamientos originales de Christaller, señalados en 3.5, y la teoría de los lugares centrales. Como se esbozó en el arco teórico, este enfoque



sigue siendo vigente, no obstante los notables adelantos en materia de cálculo y representación de los lugares o nodos en este caso.

En relación con la manera como la red vial nacional articula el territorio nacional, debe mencionarse que aunque este proyecto no incorporó las redes departamentales ni las municipales, sí se centró en las rutas de mayor importancia. Y el resultado corrobora lo planteado por diferentes autores sobre la realidad de la red vial en términos de atraso relativo, precariedad, insuficiencia y visión.

En este ámbito, a pesar de la notable campaña de propaganda que ha tenido la cuarta generación de concesiones como el proceso que sacará a Colombia del atraso en materia de infraestructura vial, debe reconocerse que se trata sin lugar a dudas de una mejora muy importante en la materia, pero que no ha considerado como una de sus prioridades aumentar el número de conexiones en la red. Así, desde el punto de vista estructural, la red se mantiene sujeta a los criterios que la han definido desde los comienzos del Siglo XX.

Desde el punto de vista de la información, para todas las variables, es notable su limitada disponibilidad, tanto espacial como temporal, sin mencionar cuál es su calidad. No es visible la información de PIB en el nivel municipal. La población se reporta a partir del censo de 2005 y las proyecciones no cuentan con ejercicios censales relativamente frecuentes. En efecto, los últimos censos se han realizado en 1964, 1973, 1993, 1985 y 2005 (DANE, 2012) y existe actualmente una desagregación espacial y sociodemográfica denominada resto, la cual es el área que no corresponde a los cascos urbanos, pero que combina centros poblados con áreas rurales en una misma categoría.

En este sentido, información vital del orden nacional, tal como la red vial, la población, datos oficiales consolidados del conflicto armado y la pobreza multidimensional adolecen de una presentación sistemática, ordenada y periódica, lo cual, es un impedimento de la mayor importancia en los procesos de toma de decisiones sobre el territorio. Es probable que dicha información efectivamente exista, pero no se dispone en los portales o servicios web de las entidades responsables. Esta situación, amén de las consideraciones metodológicas planteadas, aporta elementos para pensar que la idea central planteada en la hipótesis es válida y que las falencias en la disponibilidad de la información reflejan, en cierta medida, la manera como el Gobierno ha caracterizado el tema vial hasta el momento.

## 7 REFERENCIAS

- Acevedo, M. (2013). *Data Analysis in Statistics for Geography, Environmental Science, and Engineering*. Boca Raton Fl.: CRC Press.
- Acosta Navarro, O. (05 de 2015). *CEPAL*. Obtenido de <http://www.cepal.org/cgi-bin/getprod.asp?xml=/ilpes/noticias/paginas/5/36875/P36875.xml&xsl=/ilpes/tpl/p18f.xsl&base=/ilpes/tpl/top-bottom.xsl>
- Andrade Moreno, L. F. (30 de 08 de 2015). *Agencia Nacional de Infraestructura*. Obtenido de [http://ani.gov.co/sites/default/files/cuarta\\_generacion\\_de\\_concesiones\\_luis\\_fernando\\_andrade\\_moreno.pdf](http://ani.gov.co/sites/default/files/cuarta_generacion_de_concesiones_luis_fernando_andrade_moreno.pdf)
- ANI. (24 de 08 de 2015). *Agencia Nacional de Infraestructura*. Obtenido de <http://www.ani.gov.co/sites/default/files/dec416503112011.pdf>
- ANI. (24 de 08 de 2015). *Agencia Nacional de Infraestructura*.
- ANI. (10 de 09 de 2015). *Agencia Nacional de Infraestructura*. Obtenido de <http://www.ani.gov.co/servicios-de-informacion-al-ciudadano/inventario-de-informacion>
- Anselin, L. (2003). Spatial Econometrics. En B. Baltagi, *A companion to Theoretical Econometrics* (págs. 310-330). Blackwell Publishing Ltd.
- Anselin, L. (marzo de 2015). *GeoDa*. Tempe AZ: GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation (ASU).
- Bailey, A. (2009). Population Geography. En R. Kitchi, & N. Thrift, *International Encyclopedia of Human Geography*. Amsterdam: Elsevier.
- Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). *Gephi: An open source software for exploring and manipulating networks*. International AAAI Conference on Weblogs and Social Media.
- Bell, M. G., & Iida, Y. (1997). *Transportation Networks Analysis*. Wiley.
- Bennet, L., & Vale, F. (2014). Beyond where: Modeling Spatial Relationships Using Regression Analysis. *ESRI, Technical Workshop*. ESRI.
- Blanco, J. (2009). Redes y territorios: articulaciones y tensiones. *XII Encuentro de Geógrafos de América Latina*, (pág. 13). Montevideo.

- Bonet, J. (. (2007). *Geografía económica y análisis espacial en Colombia*. Cartagena: Banco de la República: Colección de economía regional.
- Borgatti, S., Everett, M., & Freeman, L. (2002). *Ucient 6 for windows: Software for Social network Analysis*. Harvard: Analytic Technologies.
- Cárdenas Santamaría, J. H. (30 de 08 de 2015). *Agencia Nacional de Infraestructura*. Obtenido de [http://ani.gov.co/sites/default/files/transparencia\\_de\\_la\\_4g\\_de\\_concesiones\\_jorge\\_hernan\\_cardenas.pdf](http://ani.gov.co/sites/default/files/transparencia_de_la_4g_de_concesiones_jorge_hernan_cardenas.pdf)
- Cárdenas, M., Escobar, A., & Gutiérrez, C. (1995). La contribución de la infraestructura a la actividad económica en Colombia 1950 -1994. *ESPE*(28), 139.
- Chasco Yrigoyen, C. (2003). *Econometría Espacial aplicada a la predicción-extrapolación de datos microterritoriales*. Madrid: Comunidad de Madrid.
- Chimhowu, A. (2009). *Poverty*. Elsevier.
- Coto-Millán, P., & Inglada, V. (2007). *Essays on Transport Economics*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Csongor, M. (2011). *Geographicla Study of Transportation Networks in the Centre Development Region of Romania*. Cluj-Napoca: Babes-Bolyai University.
- DANE - Investigación y Desarrollo. (2013). *Análisis de patrones espaciales*. Bogotá: DANE.
- DANE. (2009). *Metodología Censo General 2005*. Bogotá: DANE.
- DANE. (2012). *Historia de Iso censos en Colombia*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- DANE. (2015). *Curso Estadística - SIG*. Bogotá: DANE.
- De la Peña, J. A. (2012). Sistemas de transporte en México: un análisis de centrality en teoría de redes. *Realklidad, datos y espacio*, 3(3).
- Dehmer, M. (2011). *Structural Analysis of Complex Networks*. Birkhäuser.
- Durán, I. M., López, F. L., & Restrepo, J. (2009). ¿Cuáles son las ciudades más inseguras de Colombia?: propuesta para la estimación de un índice de seguridad humana. En J. Restrepo, & D. Aponte, *Guerra y violencias en Colombia*. Bogotá: Universidad Javeriana.

- ESRI. (1999 - 2015). *ArcGIS 10.3.1 for Desktop*.
- ESRI. (12 de 08 de 2015). *ArcGIS Resources*. Obtenido de Spatial Statistics Resources: <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2010/07/13/spatial-statistics-resources/>
- Estrada Arbeláez, L., & Durán Gil, C. A. (2014). *Hacia un índice de pobreza multidimensional con ponderaciones regionales a partir del modelado de relaciones espaciales*. Bogotá: CANDANE.
- Estrada Arbeláez, L., & Moreno Mayorga, S. (2013). *Análisis espacial de la pobreza multidimensional en Colombia a partir del censo de población de 2005*. Bogotá: CANDANE.
- Estrada, L., & Durán, C. A. (2014). Estudio sobre las relaciones espaciales locales entre la pobreza multidimensional, la ruralidad y la capacidad institucional. (CANDANE, Ed.) *Documentos de Trabajo*.
- Fedesarrollo. (2013). *Indicadores del sector transporte en Colombia*. Bogotá: Fedesarrollo.
- Galvis Aponte, L. A. (2007). La topografía económica de Colombia. En J. Bonet, *Geografía económica y análisis espacial en Colombia* (págs. 9-45). Bogotá: Banco de la República.
- García Lorca, A. M. (1979). *La red de transportes de la Provincia de Almería: Aplicación metodológica de la teoría de grafos*.
- Glucker, J. (2007). Economic Geography and the Evolution of Networks. *Papers in Evolutionary Economic Geography*(07.04), Oxford University Press.
- Goodchild, M. F., & Janelle, D. G. (2004). *Spatially INtegrated Social Science*. New York: Oxford University Press.
- Gregory, D., Johnston, R., Pratt, G., Watts, M., & Whatmore, S. (2009). *The Dictionary of Human Geography* (5 ed.). Malden MA: Wiley-Blackwell.
- Gudiño, M. E. (2008). Geografía de las redes: Impacto en la reconfiguración espacial del territorio latinoamericano. *Geo UERJ*, 1-23.
- Hanneman, R., & Riddle, M. (2005). *Introduction to Social Network Methods*. Riverside: University of California.

- Hugill, P. (2009). Trade, Transport and Communications, Historical geographies of. En R. Kitchin, & N. Thrift, *International Encyclopedia of Human Geography*. Amsterdam: Elsevier.
- Imprenta Nacional. (17 de junio de 2011). Resolución 399 de 2011 -IGAC. *Diario Oficial*.
- Imprenta Nacional. (2015). *Imprenta Nacional*. Recuperado el 15 de 09 de 2015, de [http://www.imprenta.gov.co/diariop/diario2.mostrar\\_norma?p\\_tipo=01&p\\_numero=1228&p\\_fecha=16/07/2007&p\\_consec=1270911](http://www.imprenta.gov.co/diariop/diario2.mostrar_norma?p_tipo=01&p_numero=1228&p_fecha=16/07/2007&p_consec=1270911)
- Imprenta Nacional de Colombia. (16 de junio de 2011). Ley 1450 de 2011. (48102).
- Insaurralde, J. G., & Cardozo, O. D. (2010). Análisis de la red vial de la Provincia de Corrientes por medio de la teoría de grafos. *Revista Geográfica Digital IGUNNE*(13).
- INVIAS. (31 de 08 de 2015). *INVIAS*. Obtenido de <http://www.invias.gov.co/index.php/seguimiento-inversion/138-subdirecciones-invias/83-red-nacional-de-carreteras>
- INVIAS. (30 de 09 de 2015). *INVIAS*. Obtenido de <http://www.invias.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/normatividad/decretos?start=10>
- Johnston, R. (2009). *Spatial Science*. Amsterdam: Elsevier.
- Kalyvas, S. (2009). Civil Wars. En B. & Stokes, *The Oxford Handbook of Comparative Politics* (pág. 416). Oxford University Press.
- Knowles, R. (2009). *Transport Geography*. Amsterdam: Elsevier.
- Knox, P. (1980). Measures of Accesibility as Social Indicators. *Social Indicators Research*, 7(1), 367-377.
- Krugman, P. (1991). *Increasing Returns and Economic Geography*. The University of Chicago Press.
- Krugman, P. (2010). The New Economic Geography, Now Middle Aged. Association of American Geographers.
- Kuby, M., Roberts, T., Upchurch, C., & Tierney, S. (2009). Network Analysis. En R. Kitchin, & N. Thrift, *International Encyclopedia of Human Geography*. Amsterdam: Elsevier.

- Le Sage, J. (1999). *The Theory and Practice of Spatial Econometrics*. Toledo: Universidad de Toledo.
- Lopez Trigal, L., Rio Fernandes, J. A., Savério Sposito, E., & Trinca Figuera, D. (2015). *Diccionario de Geografía aplicada y profesional*. Universidad de León.
- López Trigal, L., Rio Fernandes, J. A., Savério Sposito, E., & Trinca Figuera, D. (2015). *Diccionario de geografía aplicada y profesional: terminología de análisis, planificación y gestión del territorio*. León: Universidad de León.
- Madrid Soto, A., & Ortiz López, L. M. (2005). *Análisis y síntesis en cartografía: algunos procedimientos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Méndez, R. (1997). *Geografía Económica. La lógica espacial del capitalismo global*. Barcelona: Ariel.
- Méndez, R. (1997). *Geografía Económica: La lógica espacial del capitalismo global*. Barcelona: Ariel.
- Menichetti, G. (2014). Weighted Multiplex Networks. *PLoS ONE Journal*.
- Mierez, A. (2010). Análisis de accesibilidad e interacción espacial a través del potencial dinámico: Su aplicación a los partidos de la cuenca del río Luján. En G. Buzai, *Geografía y Sistemas de Información Geográfica* (pág. 704). Luján: Universidad Nacional de Luján.
- Mintransporte. (2013). *Ministerio de Transporte*. Recuperado el 15 de 09 de 2015, de <https://mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones/2013>
- Mitchell, A. (2005). *The ESR Guide to GIS Analysis, Vol. 2*. Redlands, CA: ESRI.
- Moreno Serrano, R., & Vayá Valcarce, E. (2004). Econometría espacial: Nuevas técnicas para el análisis regional. Una aplicación a las regiones europeas. *Investigaciones Regionales*, 83-106.
- Mostashari, A. (2011). Introduction. En F. Hu, A. Mostashari, & J. Xie, *Socio-Technical Networks: Science and Engineering Design* (pág. 381). Boca Raton: CRC Press. Taylor and Francis Group.
- NAP. (2006). *Learning to Think Spatially: GIS as a Support System in the K-12 Curriculum*. Washington D. C.: The National Academies Press.

- Offner, J. M. (2000). Territorial Deregulation: Local Authorities at Risk from Technical Networks. *International Journal of Urban and Regional research*, 165-182.
- Ortega Poveda, P. A. (2013). *Aproximación teórica al impacto del conflicto armado en la movilización social*. Bogotá: CERAC.
- OSCAROTEL. (21 de 03 de 2013). *Buenas Tareas*. Obtenido de Buenas Tareas: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Marco-Juridico-De-La-Categorizacion-De/23934909.html>
- Pachón, Á., & Ramírez, M. T. (2006). *La infraestructura del transporte en Colombia durante el Siglo XX*. Bogotá: FCE - Banco de la República.
- Pérez V., G. (2007). Dimensión espacial de la pobreza en Colombia. En J. Bonet, *Geografía económica y análisis espacial en Colombia* (págs. 175-222). Bogotá: Banco de la República.
- Pérez V., G. J. (2005). La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia. *Documentos de Trabajo sobre Economía Regional*(64).
- PNUD. (2011). *Colombia Rural. Razones para la esperanza*. Bogotá: PNUD.
- Principi, N. (2012). Análisis de accesibilidad e interacción espacial: Cálculos cuantitativos representación cartográfica a escala regional. *GEOSIG*(4), 23-38.
- Ramos Martel, I. (2011). *Transporte y desarrollo económico: Un análisis para Bolivia, Colombia y Venezuela (1990 - 2005)*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Restrepo, J., Gutiérrez, G., Marín, M., & Ronderos, N. (2014). *Tipología de los municipios de Colombia según el conflicto armado interno*. Bogotá: CERAC.
- Reuel, H. (2011). *Encyclopedia of Geography Terms, Themes, and Concepts*. Santa Barbara: ABC - CLIO.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2013). *The Geography of Transport Systems*. New York: Routledge.
- Sánchez Rodríguez, L. (2005). *Aspectos prácticos de la adopción de MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia*. Bogotá: IGAC.
- Scheurer, J., & Curtis, C. (2007). Accessibility Measures: Overview and Practical Applications. (C. U. Technology, Ed.) *Urbanet*.

- Seguí Pons, J. M., & Martínez Reynés, M. R. (2004). *Geografía de los Transportes*. Palma: UIB.
- Seguí Pons, J. M., & Petrus Bey, J. M. (1991). *Geografía de redes y sistemas de transporte*. Síntesis.
- Subero Munilla, J. M. (2009). *Métodos de análisis de la eficacia espacial de las redes de transporte colectivo de infraestructura fija, ensayo e indicadores de oferta*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Tinkler, K. J. (1977). *An Introduction to Graph Theoretical Methods in Geography*. Norwich: Geo Abstracts.
- Transporte, M. d. (02 de 09 de 2015). *Ministerio de Transporte*. Obtenido de [https://www.mintransporte.gov.co/Publicaciones/planes\\_y\\_proyectos/Proyectos/proyectos\\_viales](https://www.mintransporte.gov.co/Publicaciones/planes_y_proyectos/Proyectos/proyectos_viales)
- UNESCO. (2015). *UNESCO*. Recuperado el 21 de 04 de 2015, de <http://www.unesco.org/new/en/social-and-human-sciences/themes/international-migration/glossary/poverty/>
- Universidad del Rosario - CAF - CEPEC. (2010). *Competitividad e instituciones en Colombia: Balance y desafíos en áreas estratégicas*. Bogotá: Universidad del Rosario.
- Vargas R., A. (2009). Guerra civil en Colombia: El caso de Barrancabermeja. En J. A. Restrepo, & D. Aponte, *Guerra y violencias en Colombia. Herramientas e interpretaciones*. Bogotá: Universidad Javeriana.
- Vasallo Magro, J. M., & Izquierdo de Bartolomé, R. (2010). *Infraestructura pública y participación privada: conceptos y experiencias en América y España*. CAF.
- Venables, A. (2005). New Economic Geography. En *Dictionary of Economics*. London: LSE.
- Vicepresidencia de la República. (02 de 09 de 2015). *Vicepresidencia de la República*. Obtenido de <http://www.vicepresidencia.gov.co/programas/Paginas/Infraestructura.aspx>
- Warf, B. (2006). *Encyclopedia of Human Geography*. Thousand Oaks: SAGE.
- Wiley-Blackwell. (2009). *The Dictionary of Human Geography* (5 ed.). (D. Gregory, R. Johnston, G. Pratt, M. Watts, & S. Whatmore, Edits.) Malden MA: Wiley-Blackwell.



World Bank. (2004). *Colombia: Recent Economic Developments in Infrastructure (REDI)* (Vol. I).