



**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESÍA**

**METODOLOGÍA PARA LA ESTRUCTURACIÓN DE UNA RED GEOMETRICA  
EN UN SOFTWARE SIG PARA EL CALCULO DE ISÓCRONAS ENTRE  
PUNTOS DE ATENCIÓN HOSPITALARIA Y ASENTAMIENTOS INFORMALES  
DE POBLACIÓN MIGRANTE VENEZOLANA EN EL DEPARTAMENTO DE LA  
GUAJIRA.**

**JOHANA ALEJANDRA RÁTIVA MORA, 20142025078**

**PROYECTO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE PASANTÍA PARA OPTAR  
POR EL TITULO DE INGENIERA CATASTRAL Y GEODESTA**

**BOGOTA D.C  
FEBRERO 2021**

**METODOLOGÍA PARA LA ESTRUCTURACIÓN DE UNA RED GEOMETRICA  
EN UN SOFTWARE SIG PARA EL CALCULO DE ISÓCRONAS ENTRE  
PUNTOS DE ATENCIÓN HOSPITALARIA Y ASENTAMIENTOS INFORMALES  
DE POBLACIÓN MIGRANTE VENEZOLANA EN EL DEPARTAMENTO DE LA  
GUAJIRA.**

**PROYECTO DE GRADO EN MODALIDAD DE PASANTÍA EN CONFORMIDAD  
CON EL ACUERDO 038 DE JULIO 28 DEL 2015**

**PASANTE:**

**JOHANA ALEJANDRA RÁTIVA MORA, 20142025078**

**DIRECTOR INTERNO:**

**DOCENTE DE PLANTE. JAVIER MONCADA SANCHEZ**

**DIRECTOR EXTERNO:**

**ING. CATASTRAL Y GEODESTA CARLOS JAVIER DELGADO**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESÍA**

**BOGOTA D.C  
FEBRERO 2021**

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN:	7
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:	8
3.	OBJETIVOS:	10
3.1.	OBJETIVO GENERAL:	10
3.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS:	10
4.	JUSTIFICACIÓN:	11
5.	MARCO TEORICO	11
5.1.	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA:	11
5.1.1.	QGIS:	12
5.2.	BASES DE DATOS ESPACIALES:	12
5.2.1.	SISTEMA GESTOR DE BASES DE DATOS (SGBD):	12
5.2.2.	MODELO RELACIONAL DE DATOS:	13
5.2.3.	POSTGRESQL:	13
5.2.4.	EXTENSIÓN POSTGIS:	13
5.2.5.	PGROUTING:	13
5.3.	ANÁLISIS ESPACIAL:	14
5.4.	TOPOLOGÍA:	14
5.5.	ANÁLISIS DE REDES:	14
5.5.1.	GRAFO O RED:	15
5.5.2.	RED GEOMÉTRICA:	16
5.5.3.	RED DE TRANSPORTE:	16
5.5.4.	ALGORITMOS VORACES:	16
5.6.	MEDIDAS DE CONECTIVIDAD Y ACCESIBILIDAD:	17
6.	ALCANCES Y LIMITACIONES:	19
7.	METODOLOGÍA:	21
7.1.	DIAGRAMA DE FLUJO METODOLÓGICO:	21
7.2.	FASE 1: ALISTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN FORMATO SHAPEFILE:	23
7.3.	FASE 2: CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS ESPACIAL:	29
7.3.1.	CREACIÓN DE INSUMOS RESTANTES PARA EL ANÁLISIS DE RED:	30
7.4.	FASE 3 ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE RED:	36
7.4.1.	EVALUACIÓN DE CONECTIVIDAD DE LA RED VIAL INTERMUNICIPAL:	37
7.4.2.	EVALUACIÓN DE ACCESIBILIDAD DE LA RED VIAL INTERMUNICIPAL:	39

7.5.	OBTENCIÓN DE PRODUCTO FINAL: MAPA DE ISÓCRONAS OBTENIDO A PARTIR DE UNA NUBE DE PUNTOS: .....	40
7.5.	FASE 4: ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS DE POBLACIÓN MIGRANTE: .....	43
8.	RECURSOS:.....	44
8.1	Insumos:.....	44
8.2	Recurso Humano: .....	44
8.3	RECURSOS TECNOLOGICOS: .....	45
8.3.1.	SOFTWARE QGIS VERSIÓN 2.18.2 Y 3.10.6 O POSTERIORES: .....	45
8.3.2.1.	FUNCIONES PERTENECIENTES A LA EXTENSIÓN PostGIS: .....	45
8.3.2.2.	FUNCIONES PERTENECIENTES A LA EXTENSIÓN PGROUTING:.....	47
9.	CONCLUSIONES .....	48
9.1.	TRABAJOS FUTUROS:.....	49
10.	CRONOGRAMA: .....	51
11.	ANEXOS.....	52
11.1.	ANEXO I.....	52
11.2.	ANEXO II.....	53
12.	BIBLIOGRAFIA .....	54

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo metodológico.....	21
Figura 2. Departamento de La guajira.....	22
Figura 3. ejecución de multiparte a monoparte (ARRIBA: OBJETO MONOPARTE – ABAJO SELECCIÓN DE MULTIPLES PARTES).....	25
Figura 4. Postgis budle 3 .....	30
Figura 5. Topología de red vial en la guajira .....	32
Figura 6. Cabeceras municipales en la guajira. ....	35
Figura 7. Rutas nodo a nodo.....	36
Figura 8. GRAFO SIMPLE.....	37
Figura 9. Identificador de la topología de red asignado a los hospitales de segundo nivel.....	40
Figura 10. Mapa de accesibilidad obtenido a partir de isócronas desde hospitales de segundo nivel. ....	41
Figura 11. Comparación de resultado isócronas con buffers.....	42



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Preparación de la información para análisis de redes garantizando la conectividad.....	15
Tabla 2 Sistema de referencia proyectado .....	24
Tabla 3 Diccionario de entidades .....	27
Tabla 4 Diccionario de datos .....	28
Tabla 5 Velicidad promedio de un caminante segun clasificación de las vías .....	31
Tabla 6. Posibles errores en la digitalización de las vías.....	33
Tabla 9 Indices de accesibilidad.....	39
Tabla 10 Asentamientos a mas de 9 horas de atención de salud de segundo nivel .....	43
Tabla 8. Matriz de accesibilidad.....	53

## 1. INTRODUCCIÓN:

El fenómeno migratorio de población venezolana hacia países de Latinoamérica ha venido creciendo significativamente desde el año 2015. En la actualidad, según el Ministerio de relaciones exteriores, se encuentran alrededor de 1.748.716 venezolanos a corte de junio de 2020 dentro del territorio colombiano, cifra que va en aumento a diario teniendo en cuenta que miles de personas atraviesan la frontera en diferentes condiciones migratorias.

Los territorios que enfrentan esta situación en primera instancia son los fronterizos, dentro de los cuales se tiene a La Guajira, territorio objeto de este análisis, como el quinto departamento con mayor población venezolana asentada (Ministerio de relaciones exteriores, 2020), sumado a ello se conoce el rezago histórico en el desarrollo económico y social en el que se ve sumido este departamento, detonando una realidad de vulnerabilidad y baja accesibilidad a servicios en el territorio.

Teniendo en cuenta la realidad del departamento en cuanto a la dificultad en el acceso a servicios y la escala de trabajo, se propone un análisis de accesibilidad regional a partir de una red geométrica o grafo que abstrae la infraestructura de transporte intermunicipal y permite realizar un análisis topológico de la red arrojando índices de conectividad y accesibilidad que describen qué tan articulada o desconectada se encuentra la red. (Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B., 2019)

Teniendo como insumo la infraestructura vial cartografiada por el IGAC, es posible cuantificar la accesibilidad en términos de tiempo, esto debido a que se tendrá en cuenta información de clasificación de las vías la cual está en función del estado y funcionalidad de cada tramo, y la velocidad promedio a pie, lo cual propone un mayor acercamiento a la realidad que vive la población migrante en comparación con el cálculo de distancia cartesiana (Apparicio, P., Abdelmajid, M., Riva, M., & Shearmur, R., 2008).

A partir de la red vial se pretende analizar el acceso a servicios de salud de segundo nivel teniendo en cuenta el funcionamiento mismo de la red apoyándose en el uso de sistemas de información geográfica que facilita los procedimientos de cuantificación y caracterización de variables lo cual hace que el análisis de la red sea más eficiente.

Por último, cabe mencionar que tanto el producto de información generado a partir de los índices del análisis topológico de red y el análisis de rutas optimas sobre la red vial buscan aproximar el grado de necesidad que pueden tener los asentamientos nuevos encontrados de población migrante para apoyar a los

tomadores de decisiones y a las organizaciones que persiguen la consecución del derecho fundamental de acceso a la salud.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:**

El territorio guajiro padece de un déficit en infraestructura vial teniendo una red primaria que corresponde a una línea férrea, una carretera de 150 km constituidos por la transversal del caribe o ruta 90, transversal el Carmen-Puerto Bolívar y la troncal del carbón o ruta 49. Fruto del rezago histórico en el desarrollo económico y social, la población guajira se ve inmersa en situaciones de pobreza y dificultad en el acceso a los servicios. Según datos consultados en el portal Terridata del DNP, el departamento es el segundo con más alto índice de pobreza monetaria en el país con un 53,7% (DANE, 2018) y casi un 80% en el índice de necesidades básicas insatisfechas (Ministerio de salud y protección social, 2020).

Debido a esta situación de baja calidad de vida tanto para la población nacida dentro del territorio como para los migrantes, se busca cuantificar la accesibilidad a los servicios de salud en términos de tiempo haciendo uso de la teoría de grafos y la modelación de ésta por medio de los sistemas de información geográfica facilitando la integración de datos dentro de un entorno espacial.

A priori se sabe que las cabeceras municipales tienen una gran influencia de atracción y conectividad, sin embargo, poder cuantificar este hecho permitirá evidenciar cuales territorios presentan mayores impedancias a la hora de querer acceder a servicios de salud y permitirá que tomadores de decisiones actúen de manera informada y por ende certera consiguiendo que las ayudas humanitarias se brinden a quienes más lo necesitan y se garantice un mínimo vital.

Para poder evidenciar el gado de articulación y conectividad de la infraestructura vial intermunicipal es necesario contar con los centroides de los centros poblado más grandes de cada municipio para conformar el conjunto nodal del grafo. (Durán Gil, C. A., 2017). Esta información se obtiene de la división político administrativa del DANE.

Partiendo de la consecución de los nodos es necesario determinar arcos que cumplan con la conectividad entre ellos, para esto se parte de geometrías tipo línea de la red vial del IGAC, allí se puede obtener vías jerarquizadas que facilitarán el uso de herramientas de geoprocésamiento para sobreponer información velocidad promedio de un caminante a través de cada tramo según su clasificación, esto para aproximarse al tiempo real que gastaría un migrante de un punto A a un punto B movilizándose a pie sobre la red. Cabe resaltar que los arcos a pesar de ser

primeramente un insumo irregular y completo (tantos tramos como vías existen, siendo multilíneas), se buscará volverlo regular sin perder la riqueza de información que presenta el análisis vectorial (línea recta), esto para trabajar los diferentes métodos de la teoría de grafos sobre una red geométrica simple (Bautista, A. F., 2018) no una red de transporte que suele usarse para un análisis urbano con mucha más información atributiva como sentido e impedancias como semáforos, tráfico o estado de las vías.

El análisis topológico de red es una herramienta clave para la evaluación de una red de transporte, para ello utiliza indicadores de accesibilidad y conectividad, cuya consecución se ha visto facilitada por el uso de sistemas de información geográfica y matrices de accesibilidad y conectividad que relacionan los elementos del grafo, arcos y nodos. Con ello se busca brindar nociones descriptivas ricas en información y facilidad de interpretación como mapas de accesibilidad relativa o mapas de isócronas.

Cabe resaltar que para obtener un mapa de isócronas que abarque el territorio objeto de estudio si es necesario utilizar la información vectorial completa de las vías y posteriormente la topología generada por un software de análisis de rutas. Con base en esta topología se calculan los caminos mas cortos desde hospitales de segundo nivel a todos los otros puntos de conexión entre los tramos de la red vial departamental, con este atributo de tiempo se genera una simbología clasificada que permite visualizar el problema en cuestión.

### **3. OBJETIVOS:**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL:**

Proponer una metodología para la estructuración de una red geométrica que modela y abstrae la infraestructura de transporte existente para la obtención de isócronas de acceso a los centros de atención medica de segundo nivel.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Abstraer la infraestructura de transporte existente en un grafo simple o red geométrica a partir de capas geográficas de tipo línea correspondientes a las vías.
- Calcular índices de análisis topológico de red para la evaluación de conectividad y accesibilidad de la red
- Facilitar la articulación de información atributiva a través de consultas en *PostGIS* y geoprocesamientos que permitan la sobreposición e interacción de los datos.
- Evidenciar las ventajas del uso de los sistemas de información geográfica para el análisis espacial tomando como eje de trabajo el análisis de redes.

#### **4. JUSTIFICACIÓN:**

El acceso a los servicios de salud de la red pública hospitalaria ha sido un tema de especial interés, teniendo en cuenta que la formulación de políticas públicas oportunas podría entenderse como un hecho preventivo que resulta efectivo en el largo plazo (Valbuena, G. J. P., 2015)

Para entender el fenómeno de acceso a los servicios de salud desde una perspectiva física y geográfica se suele usar el análisis de redes que se basa en la teoría de grafos, sin embargo, gracias a los sistemas de información geográfica es posible integrar más variables que afecten la movilidad aparte de la distancia real (Alvarez-Palau y Aguilar, 2015). Para ello se hace necesario del conocimiento de herramientas de geoprocetamiento y consultas sobre bases de datos espaciales para involucrar impedancias como la velocidad promedio según el medio de transporte para determinar un evaluador en unidades de tiempo.

También es necesario entender las diferentes fuentes de datos para poder articularlos en un mismo espacio y aprovechar la riqueza de información que esto denota. El análisis espacial involucra integración de información espacial como interpretación de resultados cuantitativos como índices de accesibilidad y conectividad obtenidos a partir de matrices que relacionan los elementos del grafo, nodos y aristas. Por ello, se ve al ingeniero catastral como un profesional propositivo que hace uso de bases de datos relacionales y sistemas de información geográfica para analizar y acercarse un poco a la realidad modelada ocurrida en el territorio.

#### **5. MARCO TEORICO**

##### **5.1. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA:**

Los sistemas de información geográfica han permitido la integración de diferentes disciplinas, partiendo de que un 70 % de la información en general ocurre en un lugar determinado (Olaya, V., 2014). Sabiendo esto, se reconoce al SIG como una herramienta para trabajar información referenciada que permite la realización de tres aspectos fundamentales como son:

- Gestión de los datos a partir de procesos como lectura, edición y almacenamiento.
- Análisis de dichos datos a partir de consultas y elaboración de modelos complejos.
- Generación de resultados como mapas, informes y gráficos.

(Tomlin, C. D. ,1990) define de manera similar a los sistemas de información geográfica, como un conjunto de software y hardware diseñado para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos. Con ello cabe resaltar que el avance tecnológico y científico ha permitido incursionar en el desarrollo de ciencias de la información, en donde es posible la integración de algoritmos complejos para procesamiento y obtención de información.

### **5.1.1. QGIS:**

QGIS es un software para el uso de sistemas de información geográfica que ha sido construido en código abierto y permite el adelanto de diferentes actividades mediante el uso de complementos que han sido desarrollados por usuarios independientes y están disponibles para todas las personas, para su uso, modificación y aplicación en general. Estos complementos agregan funcionalidad al núcleo del software y pueden ser descargados desde la interfaz misma.

## **5.2. BASES DE DATOS ESPACIALES:**

Las **bases de datos** son entendidas como una gran colección de datos estructurados que modelan una parte del mundo real (Stefanakis, E., 2014). La obtención de este modelo implica un esfuerzo en dicha estructuración y articulación de los diferentes tipos de datos para con ello poder garantizar las funciones básicas como: el acceso de diferentes usuarios a la data, eficiencia en el almacenamiento, reglas de validación post carga de los datos y facilidad en la manipulación y consulta de la información.

La espacialidad se ve involucrada a partir de tres primitivas que permiten modelar la realidad como son el punto, la línea y el polígono. Con estas, es posible abstraer fenómenos espaciales y asignarles atributos que permiten entender la realidad de manera simplificada. Este tipo de bases de datos involucran un atributo que contiene información geométrica y coordenada de los sucesos. Es gracias a esta característica que se pueden realizar análisis que involucran operaciones como la coincidencia, superposición, adyacencia y diferentes operaciones topológicas mencionadas posteriormente.

### **5.2.1. SISTEMA GESTOR DE BASES DE DATOS (SGBD):**

Un SGBD es un software que permite establecer, usar y mantener una base de datos (Bernabé-Poveda & López-Vázquez, 2012). Con éste es posible garantizar el cuidado que debe dársele a las bases de datos en cuanto a concurrencia, optimización, integridad, verificación y optimización de las consultas.

Los sistemas gestores de bases de datos permiten almacenar grandes conjuntos de datos y con ello realizar operaciones mucho más eficientes, también permiten el acceso de varios usuarios cuidando los permisos de edición y administración y extraer información a partir de condiciones dadas en un lenguaje sencillo de consultas.

### **5.2.2. MODELO RELACIONAL DE DATOS:**

El modelo relacional permite la definición de estructuras de almacenamiento como llaves primarias y llaves foráneas que garantizan la integridad de los datos. Las estructuras que definen este modelo relacional son los atributos, tuplas y relaciones entre las tablas. Entendiendo esto, cabe mencionar que las tablas son colecciones de registros que tienen atributos, por ende, cada registro tendrá un valor atributivo propio y dichos atributos comprenden un dominio que puede ser un dato cadena de caracteres, un entero, una fecha, un decimal, entre otros.

### **5.2.3. POSTGRESQL:**

PostgreSQL es un gestor de bases de datos relacional y orientado a objetos. Su licencia y desarrollo es de código abierto, siendo mantenida por una comunidad de desarrolladores, colaboradores y organizaciones comerciales de forma libre y desinteresadamente.

### **5.2.4. EXTENSIÓN POSTGIS:**

PostGIS es una extensión de la base de datos relacional de objetos PostgreSQL que le permite manejar y consultar información espacial mediante consultas y funciones programadas en SQL.

### **5.2.5. PGROUTING:**

La extensión pgRouting complementa la base de datos geoespacial PostGIS para ofrecer funcionalidad en el enrutamiento y el análisis de redes. Dentro de esta extensión se encuentran funciones para creación de topología y algoritmos voraces como la ruta más corta de Dijkstra, Johnson, Floyd-Warshall, como también K-Dijkstra que ofrece diferentes alternativas de camino corto.

Una de las ventajas de esta extensión y del uso complementado del lenguaje SQL es que el parámetro de costo para la evaluación de los diferentes algoritmos, se puede calcular e involucrar múltiples variables para cada tramo.

### **5.3. ANÁLISIS ESPACIAL:**

El análisis espacial propende aprovechar y explorar la información geográfica buscando analizar fenómenos de manera multidimensional, para ello se realizan consultas de diferentes niveles según su complejidad. Primeramente, se tiene la visualización de los datos de manera directa o consultando su información atributiva. Luego se tienen las consultas de nivel dos que implican la extracción de información en función de la comparación, aquí también se pueden mencionar algoritmos espaciales como análisis de redes, vecino más cercano o funciones más sencillas como análisis de distancias, incidencias, desconexiones y sobreposición.

### **5.4. TOPOLOGÍA:**

Rama de las matemáticas que aborda problemas cualitativos intrínsecos de las configuraciones espaciales. La topología permite por medio de una función de homeomorfismo obtener un espacio a partir de otro teniendo en cuenta que hay variantes topológicas como el área, la longitud y la distancia, que como es de suponerse, serán características del espacio que se verán afectadas. Por otro lado, están las invariantes topológicas, las cuales se mantienen después de transformar el espacio y son conectividad, contención y no contención, adyacencia y coincidencia.

### **5.5. ANÁLISIS DE REDES:**

Las redes permiten la modelación del movimiento de diferentes elementos de interés como agua, electricidad, gas, datos o incluso personas. El manejo de estas redes es una de las funcionalidades principales de análisis en los sistemas de información geográfica, para ello se definen dos tipos:

- Red geométrica: Conjunto de aristas y nodos en donde es fundamental garantizar la conectividad y sobre la cual se pueden definir reglas de flujo a través de ella. Un ejemplo es la red de transporte, en donde el sentido de la vía es importante y debe respetarse.
- Red lógica: Conjunto de aristas y nodos en donde la conectividad es definida a partir de reglas de negocio, lo que implica la definición de subtipos, dominios y valores por defecto en la información atributiva de cada clase. Un ejemplo es la red de telefonía local básica conmutada en donde es necesario definir que existe una red primaria que se conecta a una red secundaria por medio de una central telefónica, o que la red secundaria se conecta a una red terciaria por medio de un armario de distribución.

La aplicación de estas técnicas de análisis a la gestión del territorio permite mejorar la movilidad de personas y vehículos a la par que se ahorra tiempo y dinero al optimizar los desplazamientos. Cabe resaltar que este análisis se basa en la teoría de grafos y dígrafos debido a que utiliza algoritmos fundamentados en dicha matemática cualitativa entendida como topología.

El análisis de redes también es un eje fundamental del análisis espacial debido a la connotación propia que tiene la infraestructura de transporte en el territorio. Se sabe que un mayor desarrollo de infraestructura vial implica mayores oportunidades de articulación social y económica lo que potencializa las relaciones y el crecimiento.

Para poder realizar análisis sobre una red se debe garantizar la regla topológica de la conectividad, por ende, es necesario preparar la información realizando las ediciones necesarias mencionadas a continuación.

TABLA 1 PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA ANALISIS DE REDES GARANTIZANDO LA CONECTIVIDAD.

ANTES DE LA EDICIÓN	DESPUÉS DE LA EDICIÓN	DESCRIPCIÓN
		Eliminación de pequeños objetos
		Rompimiento de arcos que se cruzan
		Extensión de tramos
		Ajustar nodos agrupados
		Borrar objetos colgantes

Tomado de (Stefanakis, E., 2014).

### 5.5.1. GRAFO O RED:

Conjunto de puntos (llamados elementos, vértices, nudos o nodos) con líneas que unen pares de vértice de ellas; en algunos casos se usa red como sinónimo de grafo.

También puede definirse como una abstracción matemática entendida como  $G= (V, A)$  donde  $V$  es un conjunto de puntos no nulo y  $A$  es un conjunto de líneas que unen dos puntos pertenecientes a  $V$ , en ese caso  $A$  si puede ser un conjunto vacío (Álvarez, M., & Parra, J., 2013).

De la misma manera se puede definir un **dígrafo** como una terna  $D = (V, A, \delta)$ , donde  $\delta$  es la función de incidencia que indica la dirección de la arista.

### **5.5.2. RED GEOMÉTRICA:**

Una red geométrica es un conjunto de ejes y cruces conectados, junto con reglas de conectividad. Estas proporcionan una manera de modelar redes e infraestructuras habituales del mundo real. La distribución de agua, las líneas eléctricas, la conducción de gas, los servicios telefónicos, el flujo del agua de un río o personas sobre infraestructura de transporte. Estos son ejemplos de flujos de recursos que se pueden planear y analizar mediante una red geométrica. (ARCGIS, 2020)

### **5.5.3. RED DE TRANSPORTE:**

La representación topológica de una red de transporte es similar a una red de nodos y enlaces en la cual las calles, las carreteras, las vías férreas y las combinaciones intermodales son mayoritariamente modeladas como estructuras que definen una topología de red. Tales topologías pueden tener una forma regular e irregular. Sin embargo, cabe resaltar que para que se trate de una red de transporte se deben tener tantas geometrías tipo línea como calles, carreras o tramos existan y sobre estos se definen reglas de circulación como también diversas impedancias propias de cada caso. Dicho de otra manera, una red de transporte es también una red geométrica por componerse de nodos y aristas, pero una red geométrica no es necesariamente una red de transporte, sino que puede ser un modelo abstracto.

### **5.5.4. ALGORITMOS VORACES:**

Los algoritmos voraces son fuertemente utilizados para problemas de optimización, se aplican sobre grafos para la obtención de árboles que cumplan una condición de minimización de costos.

**Algoritmo Dijkstra:** Es el algoritmo de solución estándar para el problema de la ruta más corta entendida como una técnica punto a punto. (Buchhold, V., 2015).

- **RUTA MAS CORTA:** Este algoritmo busca el camino más corto entre un punto de inicio y uno destino y para ello tiene como parámetros obligatorios una capa de tipo línea que defina la red de transporte, un punto de inicio con coordenadas planas y un punto final con la misma condición, esto es importante para garantizar las unidades de distancia dadas en un sistema adecuado, también necesita que se le defina el criterio de optimización dando como opción la distancia o el tiempo de recorrido.

**ISO ÁREAS:** Este algoritmo se fundamenta en la obtención de una nube de puntos a partir de la evaluación en los vértices de los tramos de red, analizando si el costo de recorrido está dentro del rango definido por el usuario, cabe resaltar que este costo puede evaluarse en términos de distancia como de tiempo. Si el vértice se encuentra dentro de este rango, se suma a la nube de puntos que conforman el área resultado y esta área puede evidenciarse como contornos, polígonos, ráster, o simplemente una nube de puntos.

## 5.6. MEDIDAS DE CONECTIVIDAD Y ACCESIBILIDAD:

La **conectividad** es una medida sobre la capacidad de servicio de la red en función de su configuración, más propiamente tratándose de los vínculos que genera un nodo con los otros. En el caso puntual de una red geométrica que modela una red de transporte, calcular el grado de conexión de un nodo permite entender de manera aproximada, como se relaciona este nodo con el entorno y si el nodo es una abstracción de un caserío denotaría un grupo de personas, el cual tiene un mayor o menor grado de posibilidad de acceso a diferentes mercados. De acuerdo con (Madrid y Ortiz (2005), entre los índices topológicos más utilizados se pueden nombrar los siguientes:

- Índice Beta ( $\beta$ ) o de conexión máxima: describe el grado de conexión de la red a través del número de arcos sobre el número de nodos. Cuando su valor es equivalente a 0, indica una red nula. Si su valor es igual a 1, la red es de un solo circuito, y de 1 a 3 significa que son redes complejas; puede decirse que, a mayor número de arcos, mayor es la conexión que representa.

$$\beta = \frac{\text{numero de arcos}}{\text{numero de nodos}}$$

$$\beta \text{ maximo} = \text{nodos} * \frac{\text{nodos} - 1}{2}$$

- Índice gamma ( $\gamma$ ): Se obtiene al dividir el número de arcos existentes en la red entre el máximo posible de arcos sobre el número real de nodos de la red. Su cercanía al valor 1 representa una red idealmente más conectada.

$$\gamma = \frac{2}{N(n - 1)}$$

- Índice gamma ( $\Gamma$ ): señala el valor porcentual de arcos que debe introducirse en cada nodo para obtener una red más integrada. Un valor cercano al 100 % supone una red ideal, lo cual está alejado de la realidad.

$$\Gamma = \frac{\text{arcos}}{3(\text{nodos} - 1)} * 100$$

- **Número ciclomático ( $\mu$ ):** corresponde al número de circuitos presentes en un grafo. Un circuito es cada una de las maneras de ir desde un nodo hasta el mismo sin tener que pasar dos veces por la misma arista.

$$\mu = \text{arcos} - (\text{nodos} - 1)$$

- **Índice alfa ( $\alpha$ ):** se obtiene de la relación entre el número de circuitos existentes y el máximo posible de la red.

$$\alpha = \frac{\mu}{2(\text{nodos} - 5)}$$

En el análisis topológico, **la accesibilidad** es un índice que define el número de veces que es necesario atravesar un arco para llegar a un nodo de referencia. En consecuencia, los nodos tendrán mayor jerarquía cuando esta cantidad es inferior o posibilita mayor facilidad para acceder de uno a los restantes.

Para poder cuantificar este aspecto es necesaria la construcción de una matriz binaria de accesibilidad topológica, la cual necesita como insumo una matriz previa de conectividad.

- **Matriz de Conectividad:** Consiste en una tabla binaria de doble entrada donde se consignan el número de arcos y nodos en filas y columnas respectivamente. En ella las relaciones topológicas se representan con valor de 1 si los nodos están conectados por un arco, o valor de 0 en caso contrario. (G, D. R. V., Zona, L. a, Del, M., México, V. D. E., México, V. De, Transporte, R., & Metropolitana, Z., 2009).
- **Matriz de Accesibilidad topológica:** se genera a partir de la anterior, reemplazando los 0 por las distancias entre los nodos de la red, expresada por el número de arcos que deben atravesarse para llegar de un nodo a otro, siguiendo el camino más corto. A partir de ella se calcularon dos medidas: *Número Asociado (NS)*, y el Índice de *Shimbel*, con el objeto de reconocer y analizar la accesibilidad en los nodos de la red. (G, D. R. V., Zona, L. a, Del, M., México, V. D. E., México, V. De, Transporte, R., & Metropolitana, Z., 2009).
- **Número Asociado o de Köning (NS):** Se refiere a la distancia topológica (expresada en número de arcos) para alcanzar el nodo más distante por el camino más corto. Representa la accesibilidad de ese nodo al más lejano de la red, y significa que cuanto más bajo es el número, más alto es el grado de accesibilidad. En la Matriz de Accesibilidad Topológica se lo identifica porque es el número mayor de cada fila.

- *Índice o Número de Shimbél* o de accesibilidad topológica: se obtiene sumando los valores de cada fila en la Matriz de Accesibilidad, y representa el número de arcos que es necesario atravesar desde un nodo a los demás por el tramo más corto, siendo más accesible el nodo que presente el índice más bajo.

$$Shimbel = \sum D_a(XY)$$

Donde  $D_a$  es la distancia en arcos, o número de arcos que separa a los nodos X y Y por el tramo más corto.

- Índice de Dispersión (G) : este mide el nivel de accesibilidad para el conjunto de la red, y se obtiene de la suma de todos los índices Shimbél del grafo (número de arcos que es preciso atravesar para llegar desde un nodo a los demás).

$$G = \sum Shimbel$$

- Índice de *Accesibilidad Media* (IAM): este índice determina un valor promedio de la accesibilidad en la red a partir del cociente entre, el índice G de Dispersión y el número de nodos existentes. Este promedio de la red permite comparar diferentes grafos, o ver dentro de una misma red la accesibilidad de cada nodo (índice de Shimbél) respecto a la media (índice G); los que superan el promedio, son los menos accesibles.

$$IAM = \frac{G}{nodos}$$

## 6. ALCANCES Y LIMITACIONES:

El correcto modelamiento de una red de transporte multimodal permite analizar los tiempos aproximados destinados por las personas para trasladarse desde su vivienda hasta la locación de interés, sin embargo, para lograr dicho análisis se necesita un nivel de detalle para cada tramo que existe en la infraestructura vial y también en la base de datos geográfica, para sobre dicha geometría tipo línea plasmar información atributiva acerca de las impedancias y características de cada tramo. Esto hace que el análisis de una red de transporte fielmente expuesta implique un volumen de datos mayor y no existente para el área propuesta en este trabajo. También cabe resaltar que es un análisis más comúnmente propuesto para centros urbanos. Por lo que la aproximación mediante la teoría de grafos simples para la zona de estudio teniendo en cuenta que pertenece a una escala

regional, se acerca de manera acertada y útil a lo ocurrido en la realidad.

Entender las necesidades de la población migrante en cuanto a acceso a la salud, en función de las facilidades o limitaciones a la movilidad a partir de la generación de isócronas permitirá delimitar las zonas que presentan mayor vulnerabilidad al enfrentar una urgencia de atención de segundo nivel, beneficiando de esta manera a la población afectada debido a que las entidades involucradas en gestionar ayudas y plantear soluciones contarán con un producto desarrollado que les permitirá acercarse mejor al territorio que presenta la necesidad y también tomar decisiones con base en un análisis espacial que evalúa no solo la existencia de las vías sino que además modela la realidad de movilidad de los migrantes a pie, o incluso analiza las diferentes impedancias propias de cada tramo como la pendiente.

Este documento propone una metodología replicable en los diferentes departamentos, sin embargo, se limita su desarrollo a La Guajira debido a la cantidad de información que debe abstraerse para conformar una red geométrica ligada significativamente a la realidad para poder garantizar la riqueza de información que permite el análisis vectorial. Por otro lado, el departamento contiene casi un tercio de los nuevos asentamientos informales identificados en todo el territorio nacional, lo que lo hace el departamento con mayor presencia de dichas agrupaciones, esto puede deberse a que es uno de los departamentos colindantes con el territorio venezolano y por ende presentar una dinámica de migración tanto permanente como transitoria o pendular.

## 7. METODOLOGÍA:

### 7.1. DIAGRAMA DE FLUJO METODOLÓGICO:

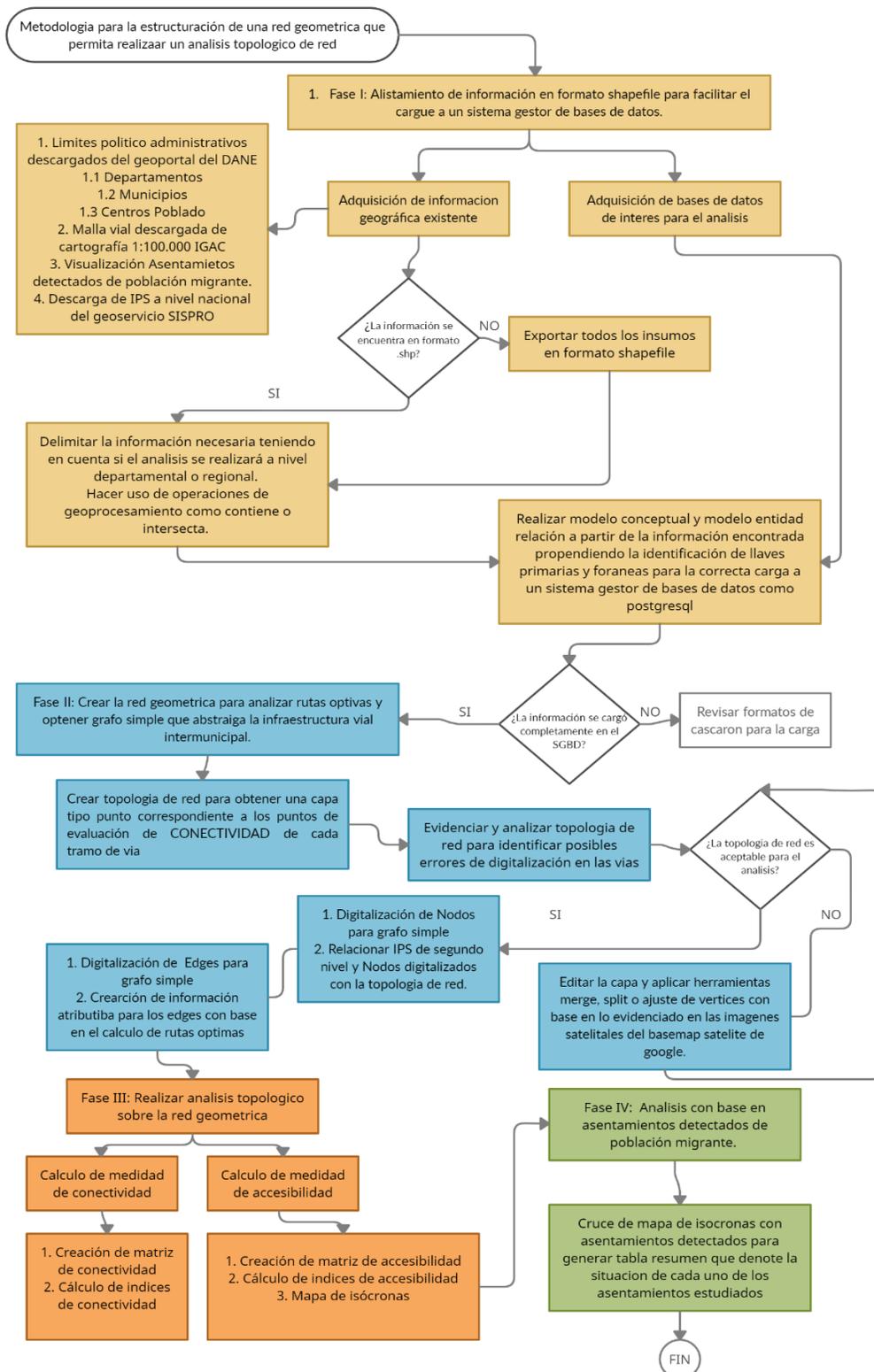


FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO METODOLÓGICO.

Esta metodología se propone para el departamento de la Guajira, sin embargo, se extiende su aplicación a todo el territorio nacional en donde se quiera obtener, mediante el análisis vectorial espacial y análisis de grafos, un mapa de isócronas que permita visualizar de forma sencilla cuales son los asentamientos de población migrante que se encuentran a un mayor intervalo de tiempo del acceso a la atención hospitalaria de segundo nivel.

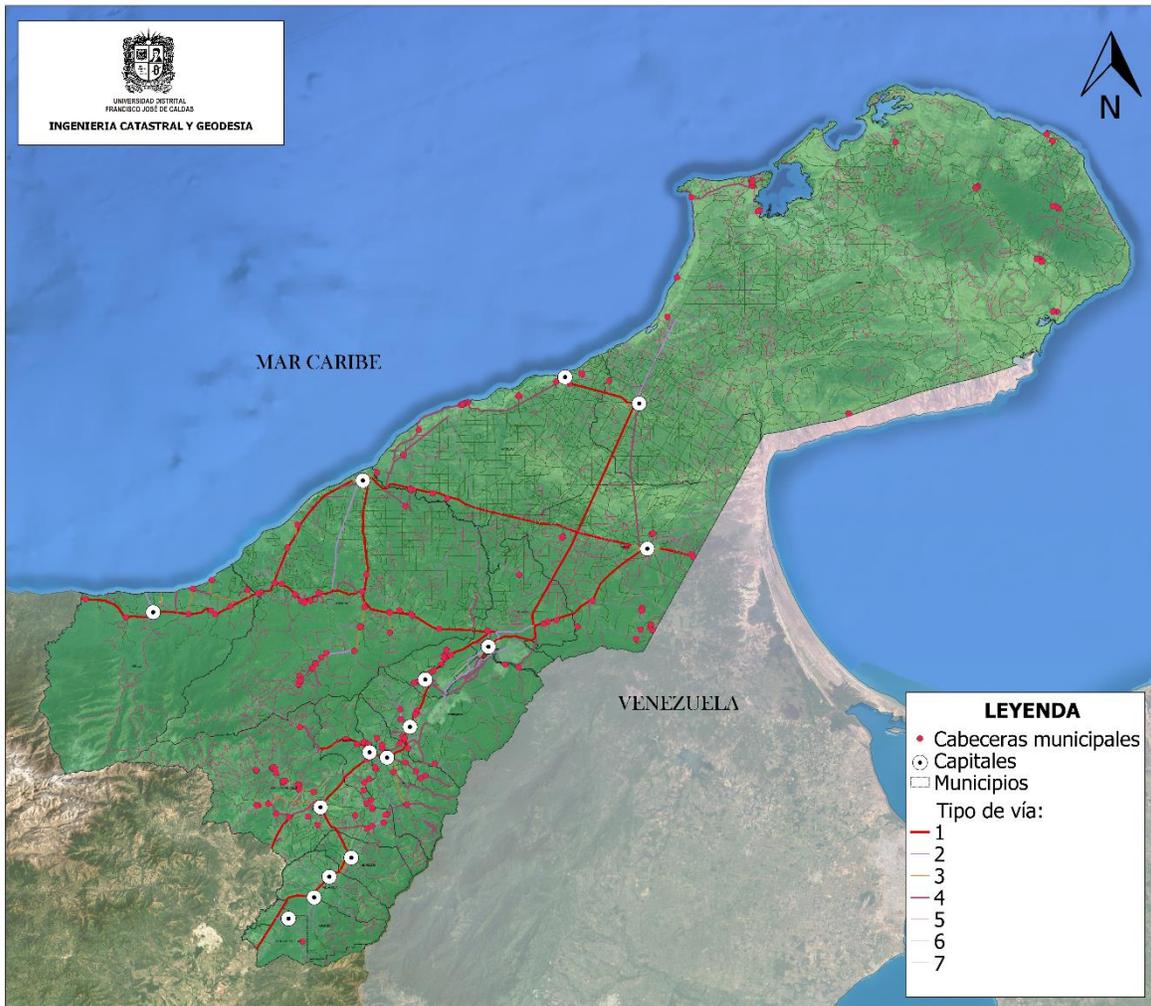


FIGURA 2. DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA

La figura anterior corresponde al departamento de la Guajira, este mapa muestra los 15 municipios que lo conforman y dentro de ellos un total de 226 centros poblado que se ven inmersos dentro de la red de infraestructura vial. Sin embargo, puede evidenciarse que solo los centros poblado más grandes se encuentran conectados por vías tipo 1 o tipo 2 y sumado a ello cabe resaltar que a primera vista es evidente como la parte nororiental perteneciente al municipio de Uribia se encuentra significativamente desarticulada de la red principal.

Este primer acercamiento al departamento permite observar cómo se ha desarrollado el territorio entorno a las capitales municipales teniendo como factor articulador la infraestructura de transporte, que como se ha mencionado, es un sujeto clave para el desarrollo de mercados y por ende el crecimiento económico de los territorios.

Con base en esta primera observación y persiguiendo el objetivo de entender la estructuración y características de la red vial actual es necesaria la correcta estructuración de una red geométrica simple que la abstraiga, esto sin perder la riqueza atributiva propia de la información vectorial como lo es la distancia real que recorre un sujeto para movilizarse de un lugar a otro. Cabe resaltar que lo que se busca con el grafo simple es el cálculo de índices de accesibilidad y conectividad que describen el comportamiento de una red topológica.

Previo a la construcción de un grafo simple, es necesario que la red vial se encuentre en condiciones óptimas para correr un algoritmo de análisis de rutas, para ello se propone en primera instancia preparar los insumos teniendo en cuenta las reglas topológicas que se deben garantizar para este análisis como lo es la conectividad de los tramos.

## 7.2. FASE 1: ALISTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN FORMATO SHAPEFILE:

Pensando en la necesidad de montar la información geográfica dentro de una base de datos relacional es necesario que los archivos se encuentren en un tipo apto para su cargue, dicho cargue se realizará utilizando el complemento *PostGIS bundle 3* que requiere como insumo un *shapefile* que será cargado a la base de datos como una tabla.

Los insumos principales a este punto son:

- **Marco geoestadístico nacional – DANE:** Dentro de esta capa se encuentran el primer nivel de división político administrativa del territorio: Departamento, también el segundo nivel: Municipio.
- **Nivel geográfico Área Censal Urbana – DANE:** Esta capa cuenta con información de las cabeceras y centros poblado del territorio nacional.
- **Cartografía básica en escala 1:100000 – IGAC:** Para el análisis de accesibilidad se tendrá como insumo principal la red vial del departamento que cuenta con una jerarquización de las vías propuesta por
  - Cabe resaltar que, si la información de OSM se muestra más completa, puede hacerse uso de este insumo. Sin embargo, la clasificación de velocidad de los tramos fue propuesta en función de la clasificación de las vías obtenida en la cartografía básica del IGAC, lo cual se explicará en la segunda fase.

- **IPS – SISPRO:** Esta capa es obtenida dentro del Geoservicio del SISPRO. Cuenta con todas las instituciones prestadoras de salud en el territorio nacional, teniendo en cuenta instituciones públicas como privadas.

Pensando en que la accesibilidad se calculará con base en la longitud de las vías, es necesario poner las capas geográficas en un sistema de referencia que tenga la unidad en metros. Se escogió el sistema de coordenadas proyectado, con las siguientes características:

**TABLA 2 SISTEMA DE REFERENCIA PROYECTADO**

<b>MAGNA COLOMBIA BOGOTÁ</b>	
EPSG	3116
Proyección	Transversa de Mercator
Falso Este	1000000
Falso Norte	1000000
Meridiano central	-74,07750792
Latitud de origen	4.59620042
Factor de estala	1
Unidad lineal	Metro
Sistema de coordenadas geográficas	GCS_MAGNA
DATUM	MAGNA
Primer meridiano	Greenwich

Este sistema de referencia proyectado debe tenerse en cuenta en el momento de cargue de los shapefiles a la base de datos debido a que la extensión espacial solicitará un código de identificación para aterrizar los datos en el entorno adecuado y posibilitar la interacción entre las diferentes capas, esto evitando errores por capas al vuelo.

Cabe resaltar que la información en principio se encuentra para todo el territorio nacional, pero para el análisis de red que aquí se propone, se sugiere filtrar las capas por medio de operaciones espaciales como *intersección* para dejar solo las geometrías que se encuentran dentro del departamento objeto de estudio.

Al tener la información suficiente para el análisis de red dentro del departamento y pensando en que esta fase busca facilitar el cargue de información a un *SGBD como lo es PostgreSQL* cabe mencionar que los análisis espaciales dentro de una base de datos relacional necesitan que las *geometrías sean simples*, con esto se hace referencia a la no existencia de conjuntos de polígonos, líneas o puntos dentro de un mismo registro.

En este caso fue necesario utilizar la herramienta *Multiparte a monoparte de QGIS* sobre las vías del departamento, estas en un principio eran 6565 geometrías y, posterior a la ejecución de la herramienta, se obtuvieron 12276. Este aumento en la cantidad de geometrías se debe a que después de la ejecución, líneas como la resaltadas en la (FIGURA 2) dejaron de ser un solo registro para ser la cantidad de registros correspondientes a los tramos generados a partir de cada intersección.

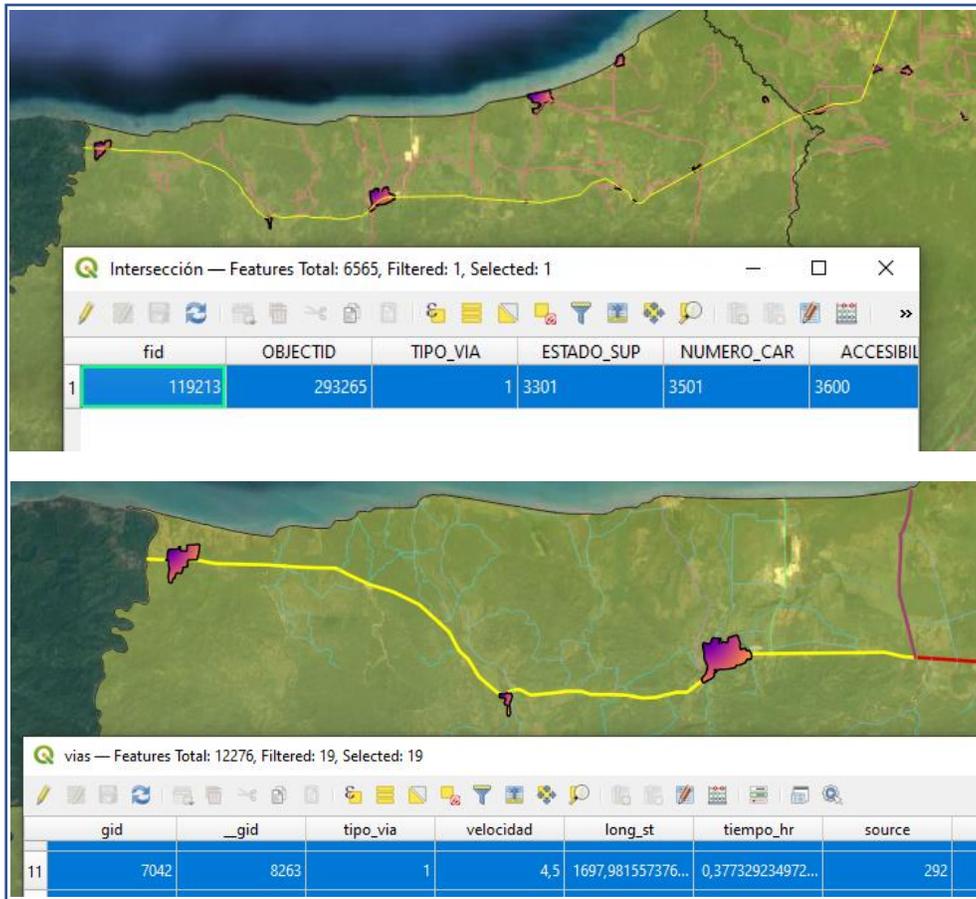


FIGURA 3. EJECUCIÓN DE MULTIPARTE A MONOPARTE (ARRIBA: OBJETO MONOPARTE – ABAJO SELECCIÓN DE MULTIPLES PARTES)

El resultado de acotar los insumos de trabajo permite una mejor visualización del problema y con base en ello se procede a construir un modelo entidad relación (FIGURA 3) y posteriormente un diccionario de datos (TABLA 3) el cual será de gran utilidad para entender las operaciones necesarias dentro de PostgreSQL debido a la trazabilidad e interconexión que denota en una sola vista.



**TABLA 3 DICCIONARIO DE ENTIDADES**

<b>NOMBRE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>TIPO Y FUENTE</b>
DEPARTAMENTOS	Los departamentos en Colombia corresponden al primer nivel de división político administrativa del territorio en los que se agrupan los municipios.	Entidad: polígono. Fuente: MGN DANE
MUNICIPIOS	Los municipios en Colombia corresponden al segundo nivel de división político administrativa del territorio, dentro de estos se tienen centros poblado, cabeceras municipales y veredas.	Entidad: polígono. Fuente: MGN DANE
CAB_C_POBLADOS	Un centro poblado se define como una concentración de mínimo veinte (20) viviendas contiguas, vecinas o adosadas entre sí, ubicada en el área rural de un municipio o de un Corregimiento Departamental. Dicha concentración presenta características urbanas tales como la delimitación de vías vehiculares y peatonales.	Entidad: polígono. Fuente: MGN DANE
VIAS	Esta entidad está compuesta por una malla vial jerarquizada según el Instituto Panamericano de Geografía e Historia, esta clasificación es citada dentro del documento de Especificaciones técnicas cartografía básica del IGAC.	Entidad: línea Fuente: IGAC cartografía base 100k
IPS	Las IPS son Instituciones prestadoras de servicios de salud como consulta médica, servicios hospitalarios, servicios clínicos y cuidados generales. Dentro de esta entidad se cuenta con información de instituciones de naturaleza jurídica pública como privada y su calificación del nivel con el que cuentan según la capacidad operativa y física del establecimiento.	Entidad: punto Fuente: Ministerio de Salud y Protección Social. Publicador: Sistema Integral de Información de la Protección Social. SISPRO
TOPOLOGIA	Esta entidad es el resultado de usar la extensión PGROUTING en PostgreSQL, mas puntualmente la función pgr_createTopology sobre la capa vías. En este proceso se evalúa la conectividad de las líneas y se crea una nueva entidad tipo punto que se entiende como los nodos de la red.	Entidad: punto Fuente: Elaboración propia a partir de pgrouting
NODOS_GRAFO_SIMPLE	Esta entidad es el resultado del proceso de digitalización de puntos situados sobre los centros urbanos de mayor área de cada municipio y las interconexiones principales de las vías jerarquizadas de orden 1 y 2. Se utilizará para realizar el análisis de vías intermunicipales basado en teoría de grafos e índices de conectividad y accesibilidad.	Entidad: punto Fuente: Elaboración propia, resultado de digitalización.
EDGES_GRAFO_SIMPLE	Esta entidad es el resultado de la digitalización de conexiones entre los nodos anteriormente mencionados teniendo en cuenta las vías intermunicipales tomadas al calcular el camino más corto entre los nodos identificados previamente. Estos edges abstraen la infraestructura de red intermunicipal.	Entidad: polígono Fuente: Elaboración propia, resultado de digitalización.
RUTAS_NODO_NODO	Tabla de paso que consume el costo que implica trasladarse desde un nodo del grafo simple a otro sobre las vías del departamento	Entidad: tabla sin geometría Fuente: Elaboración propia a partir de pgr_dijkstraCost
RUTAS_IPS_TOPO	Tabla de paso que consume el costo que implica trasladarse desde las IPS de segundo nivel a todos los nodos que conforman la topología de las vías.	Entidad: tabla sin geometría / se puede hacer join a la geometría de TOPOLOGIA. Fuente: Elaboración propia a partir de pgr_dijkstraCost

TABLA 4 DICCIONARIO DE DATOS

NOMBRE	PERTENECE	ESTRUCTURA		DESCRIPCIÓN
		TIPO DE DATO	LONGITUD	
PK_DPTO_CCDGO	DEPARTAMENTOS	string	2	Código identificador del departamento según la división político administrativa propuesta por el DANE.
DPTO_CNMBR	DEPARTAMENTOS	string	50	Nombre del departamento
PK_MPIO_CCNT	MUNICIPIOS	string	5	Código identificador del municipio según la división político administrativa propuesta por el DANE.
FK_depto_ccdgo	MUNICIPIOS	string	2	Llave foránea que relaciona municipios con departamentos.
Mpio_cnmb	MUNICIPIOS	string	30	Nombre del municipio
PK_cod_cpob	CAB_C_POBLADOS	string	8	Código identificador del centro poblado según la división político administrativa propuesta por el DANE.
FK_mpio_ccnt	CAB_C_POBLADOS	string	5	Llave foránea que relaciona centros poblado con municipio.
PK_gid	VIAS	int		Identificador de geometría, creado automáticamente cuando se carga a postgres.
tipo_via	VIAS	int		Número del 1 al 8 según clasificación del IGAC basada en la clasificación del IPGH.
velocidad	VIAS	double		Velocidad promedio (km/hr) de un caminante a través de las vías según la jerarquía.
longitud	VIAS	double		Longitud en metros.
tiempo_hr	VIAS	double		Tiempo en horas calculado a partir de la fórmula: $t = \frac{d}{v \cdot 1000}$
source	VIAS	int		Numero entero que denota el nodo iniciar de cada tramo de vía. Se llena automáticamente al crear la topología.
target	VIAS	int		Numero entero que denota el nodo final de cada tramo de vía. Se llena automáticamente al crear la topología.
PK_cod_habi	IPS	string	12	Llave primaria de las IPS. Numero de habilitación de la institución para prestar servicios de salud.
naturaleza	IPS	int	1	Naturaleza jurídica de la IPS: 1: Pública 2: Privada
nombre	IPS	string	30	Nombre de la IPS.
direccion	IPS	string	30	Dirección de la IPS.
FK_mpio_ccdgo	IPS	string	5	Llave foránea que relaciona las IPS con el municipio al que pertenecen.
nivel	IPS	int		Nivel de complejidad de atención de la IPS según resolución 5261 de 1994 del ministerio de Salud.
PK_id	TOPOLOGIA	int		Llave primaria. Identificador de los nodos creados a partir de las vías.
PK_gid	NODOS_GRAFO_SIMPLE	int		Identificador de la geometría de los nodos digitalizados.

FK_id_topologia	NODOS_GRAFO_SIMPLE	int		Llave foránea que relaciona los nodos digitalizados con la topología de red creada.
FK_cod_cpob	NODOS_GRAFO_SIMPLE	string	8	Llave foránea que relaciona nodo digitalizado con el centro poblado que representa.
tipo_nodo	NODOS_GRAFO_SIMPLE	string	10	Los nodos pueden ser centros poblado o intersección de las vías.
PK_id_edge	EDGES_GRAFO_SIMPLE	Int		Identificador de la geometría de los edges digitalizados.
FK_list_nodos_intersect	EDGES_GRAFO_SIMPLE	string	7	Lista de los identificadores de nodos con los que se intercepta la línea, separados por una coma.
costo	EDGES_GRAFO_SIMPLE	double		Tiempo en horas que le toma a un caminante atravesar el edge que abstrae la infraestructura vial real.
start_vid	RUTAS_NODO_NODO	Int		Nodo de inicio de la ruta
end_vid	RUTAS_NODO_NODO	Int		Nodo final de la ruta
agg_cost	RUTAS_NODO_NODO	double		Evaluador de la mejor ruta, en este caso se habla del tiempo en horas que le costaría a un caminante para trasladarse de un nodo a otro.
start_vid	RUTAS_IPS_TOPO	Int		Identificador de punto de inicio de la ruta, en este caso será el nodo más cercado a un hospital de segundo nivel.
end_vid	RUTAS_IPS_TOPO	Int		Identificador del punto final de la ruta. Serán el resto de nodos que componen la topología de la red vial.
agg_cost	RUTAS_IPS_TOPO	double		Costo en horas que le toma a un caminante dirigirse desde un nodo al hospital más cercado de segundo nivel.

### 7.3. FASE 2: CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS ESPACIAL:

En primera medida debe crearse una base de datos **dentro del SGBD PostgreSQL** que permita el **almacenamiento, consulta y manejo de información geográfica**. Para ello es necesario crear la **extensión PostGIS** dentro de la base de datos y de paso una extensión que permitirá el análisis de rutas como lo es **PGRouting**.

Teniendo habilitada la extensión *PostGIS* se habilita también la aplicación *PostGIS Budle 3* entendida como un módulo bastante amigable para la carga de capas geográficas a una base de datos relacional.

En la (FIGURA 4) se puede observar la aplicación para importar o exportar información geográfica de una base de datos espacial. En este caso la acción a realizar es el importe desde un archivo shapefile a una tabla dentro de la base de datos existente la cual debe ser previamente enlazada. En este punto es clave resaltar el código **EPSG 3116**, el cual debe asignarse en el campo de SRID el cual en ocasiones presenta fallas por lo que se sugiere consultar con el comando **SELECT \* FROM geometry\_columns** para garantizar que el sistema de referencia es el asignado al momento de cargar la información y de no ser así realizar el ajuste necesario.

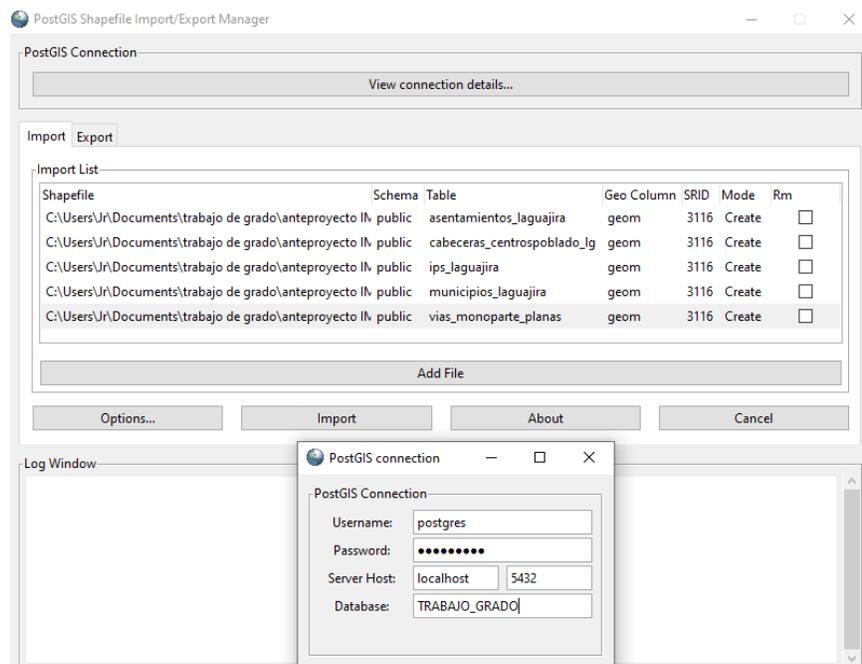


FIGURA 4. POSTGIS BUDLE 3

### 7.3.1. CREACIÓN DE INSUMOS RESTANTES PARA EL ANÁLISIS DE RED:

Como se mencionó anteriormente, hay tablas dentro del modelo de conceptualización que no fueron cargadas en el punto anterior debido a que son el resultado de la ejecución de funciones dentro de la base de datos espacial. Por ello, en este punto se busca avanzar en el cumplimiento de lo planteado en dicho modelo.

En primera instancia se busca obtener la tabla **TOPOLOGIA\_punto** debido a que como se observa en la conceptualización del problema, dicha capa solo depende de la existencia de las vías. Sin embargo, cabe resaltar que deben ser creados todos los atributos propuestos en la conceptualización.

La primera consulta consiste en crear los campos velocidad, longitud, tiempo en horas, source y target; de estos atributos, los dos últimos van a llenarse de manera automática al ejecutar la función *pgr\_create\_topology* que se corre sobre las vías. Estos atributos serán usados como evaluadores de la función de camino más corto *pgr\_dijkstraCost*.

Es de resaltar que este trabajo propone hacer uso de la jerarquización de las vías propuesta por el IGAC y con base en esta, asignar una velocidad promedio peatonal

con base en lo trabajado por (Puebla, J. G., Alventosa, C., Redondo, J. C., Paniagua, E., & Palomares, J. C. G., 2002).

TABLA 5 VELICIDAD PROMEDIO DE UN CAMINANTE SEGUN CLASIFICACIÓN DE LAS VIAS

TIPO	CATEGORIA	CARACTERISTICAS	TRANSITO	Velocidad asignada (km/hr)
1	2 carriles o mas	Revestimiento duro, carretera pavimentada	Todo el año	4,5
2	2 carriles o mas	Revestimiento ligero o suelto, no pavimentada	Menor flujo en época de lluvia	4,5
3	1 carril	Revestimiento duro, carretera pavimentada	Todo el año	4,5
4	1 carril	Revestimiento ligero o suelto, no pavimentada	Menor flujo en época de lluvia, puede deteriorarse	3,5
5	1 carril	Terreno natural o estabilizado	Transitable en tiempo seco	2,5
6	Vía natural	Sin revestimiento	Vía natural tracción	2,5
7	Camino sendero	Natural o construido	Por personas y animales de carga	2,5
8	Peatonal	Puede contar con revestimiento	Peatonal	2,5

La función *pgr\_create\_topology* arroja como resultado la capa tipo punto mencionada en el modelo de conceptualización y tiene el comportamiento evidenciado en la (FIGURA 4). Dicha tabla tomará el nombre de la capa insumo más la extensión *\_vertices\_pgr* por ende debe renombrarse según lo propuesto dentro del diccionario de entidades. Se resalta que se debe asignar un rango de tolerancia pequeño para no generar supuestos incorrectos en la red, este será de 0,00001m.

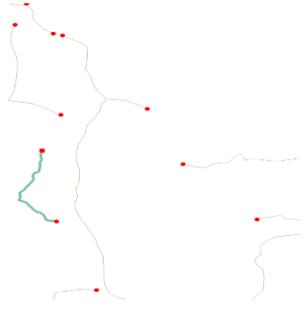
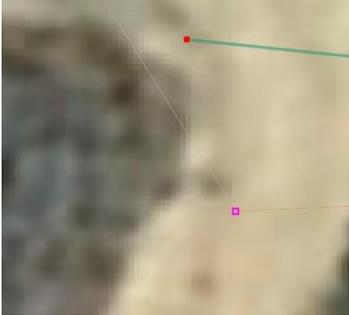
Esta topología corresponde a los nodos de conectividad de la red vial, por ende, esta capa es útil para evidenciar errores en la digitalización que entorpecen el análisis de camino más corto. Por ello se procede a identificar los puntos que están separados a una distancia menor de 50 centímetros para que la búsqueda de estos errores de digitalización sea as fácil dentro de *QGIS*. Se sugiere usar el basemap de Google satélite para identificar si los errores marcados deben ser unidos o ignorados por corresponder a la no conectividad por ríos u otros factores. En este punto es necesario editar la capa dentro de *QGIS*, lo cual implica la carga nuevamente al SGBD corregida

Se encontraron situaciones como los mostrados en la (TABLA 6).



FIGURA 5. TOPOLOGIA DE RED VIAL EN LA GUAJIRA

TABLA 6. POSIBLES ERRORES EN LA DIGITALIZACIÓN DE LAS VIAS.

SITUACIÓN TOPOLÓGICA	DESCRIPCIÓN DE LA EDICIÓN DE LA CAPA
	<p>Eliminación de tramos desconectados</p>
	<p>Edición de vértices para garantizar conectividad en la vía.</p>
	<p>No se realizó edición debido a que la desconexión se debe a la presencia de un río.</p>

Como se dijo, teniendo las vías editadas se procede a cargar de nuevo la capa a la base de datos eliminando la anterior. Esto debido a que, para poder editar la capa, esta no debe pertenecer a la base de datos por lo que se edita el insumo mencionado en la fase 1.

Continuando con el objetivo de esta fase que es la obtención de la totalidad de insumos para el análisis topológico de red, se procede a llenar la información atributiva que depende de la geometría para realizar un cálculo en las unidades del

sistema de referencia que en este caso es metros. El atributo a calcular es el tiempo en horas para lo cual se usó la siguiente ecuación.

$$tiempo[horas] = \frac{distancia [metros]}{velocidad \left[ \frac{km}{hora} \right] * 1000}$$

Con el cálculo de este atributo ya se cuenta con una estructuración correcta y con los campos mínimos de análisis de ruta óptima que son: identificador para cada nodo y un atributo que denote el costo, para este caso, el tiempo es la variable clave por lo que el tiempo en horas será dicho evaluador.

Es de resaltar nuevamente la utilidad del modelo de conceptualización del problema, pues teniendo la capa TOPOLOGIA\_punto es posible hallar la tabla NODO que como se observa en la (FIGURA 3) depende tanto de esta tabla como de los centros poblado. Para poder crearla y partiendo de la necesidad de abstraer la realidad propuesta del departamento, se procede a identificar cual es el centro poblado con mayor área de cada municipio haciendo uso de funciones de *PostGIS* como *ST\_AREA* la cual arroja un dato tipo double y *ST\_INTERSECTS* que arroja un dato de tipo booleano. Es de resaltar que ambas funciones pertenecen a la extensión *PostGIS* por lo que utilizan el atributo de la geometría geom.



FIGURA 6. CABECERAS MUNICIPALES EN LA GUAJIRA.

En la figura anterior se observan los 15 centros poblado resultantes de la consulta anterior que de forma evidente puede afirmarse que corresponden a las ciudades capitales de los municipios.

Es útil hacer referencia nuevamente al modelo de conceptualización del problema puesto que el insumo subsecuente hereda información de la tabla TOPOLOGIA\_punto y de la tabla CENTRO\_POBLADO. La tabla NODO se crea a partir de las ya mencionadas haciendo uso de las herramientas de digitalización y creación de capas vectoriales de QGIS. Como es de suponer, la tabla EDGE parte de la existencia de NODO y también se digitaliza dentro del entorno libre QGIS.

Para este punto solo queda faltando la tabla RUTA\_NODO\_NODO que tiene como objetivo asignarle un costo a los EDGE creados partiendo de la distancia real atribuida a las vías del departamento. Aquí es necesario dirigirse nuevamente al

SGBD para crear un atributo de tipo varchar que pueda utilizarse como llave foránea para relacionar los EDGE simples con las rutas reales sobre las vías del departamento.

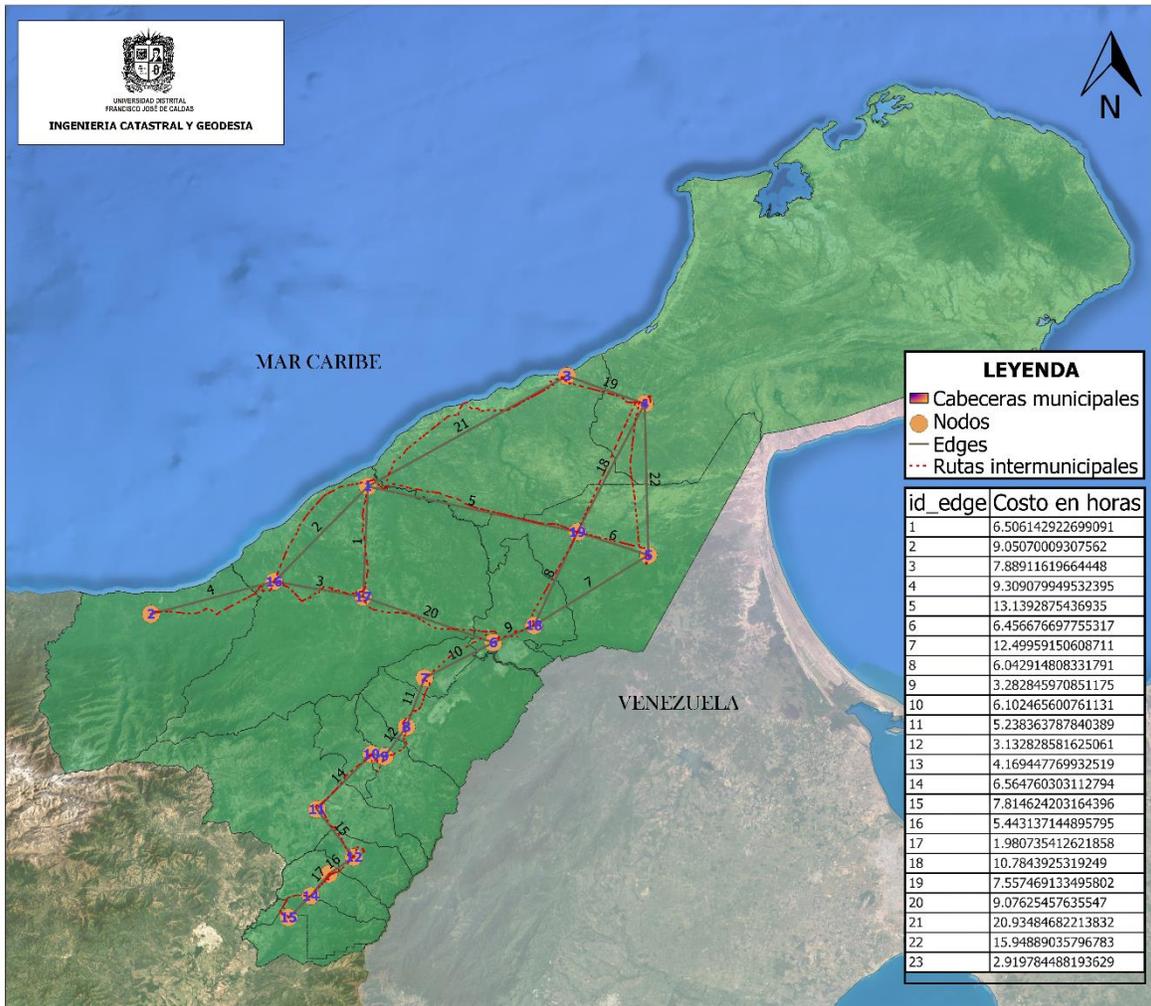


FIGURA 7. RUTAS NODO A NODO.

En la figura anterior se puede observar como el algoritmo *pgr\_dijkstra* crea rutas optimas sobre las vías del departamento y este costo puede relacionarse con los edges del grafo simple a partir de una llave foránea construida dentro de la base de datos.

#### 7.4. FASE 3 ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE RED:

Partiendo del grafo simple obtenido en la fase anterior y expuesto en la (FIGURA 8), se procede a evaluar la cohesión de la red geométrica mediante el cálculo de medidas de conectividad. Para ello se construyó una matriz de conectividad binaria

de tamaño (nxn) siendo n el número de nodos existentes, en este caso (19x19) (ANEXO I).

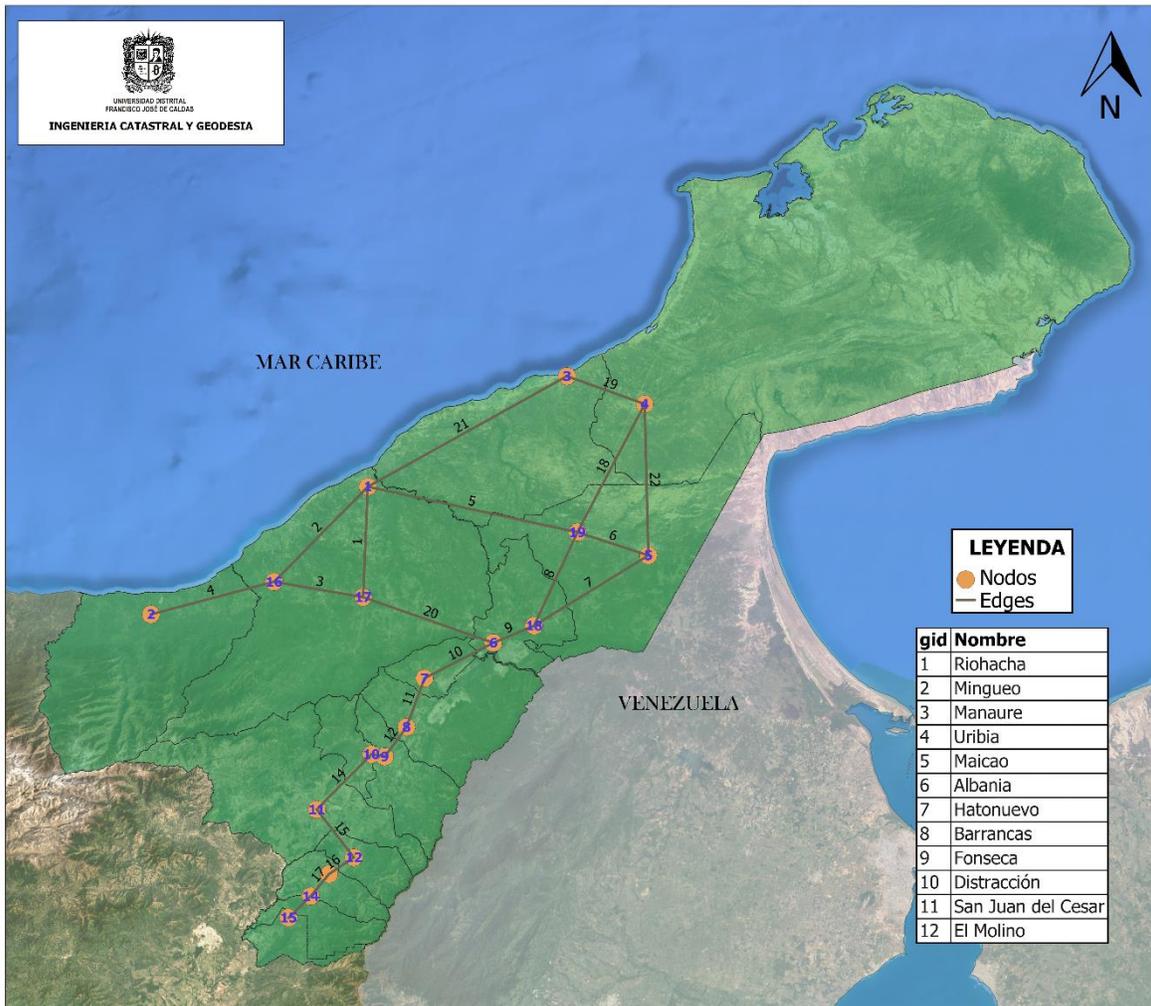


FIGURA 8. GRAFO SIMPLE

La figura 8 muestra el grafo propuesto para abstraer la infraestructura vial intermunicipal del departamento de La Guajira, la identificación de los nodos obedece al identificador de la geometría por ello se adjunta la tabla que permite reconocer el nombre de la cabecera municipal que representa.

#### 7.4.1 EVALUACIÓN DE CONECTIVIDAD DE LA RED VIAL INTERMUNICIPAL:

Para conocer el grado de conectividad de la red se propone el cálculo de los siguientes índices.

$$\beta = \frac{\text{arcos}}{\text{nodos}} = 1,2105$$

Este índice arroja una medida de conectividad de la red, en los casos en los que el índice es igual a uno se entiende como una red de circuito o camino único. Para el grafo propuesto se obtuvo una índice beta de 1,2105 lo que puede entenderse como una red compleja, este valor se compara con el mayor valor posible

$$\beta_{max} = \frac{\text{nodos} * (\text{nodos} - 1)}{2} = \frac{19 * (19 - 1)}{2} = 171$$

Al compararse el indicador Beta con su máximo podemos concluir que la red a pesar de ser compleja presenta solo un 7% de la conectividad posible.

$$\Gamma = \frac{\text{arcos}}{3 * (\text{nodos} - 1)} * 100 = \frac{23}{3 * (19 - 1)} * 100 = 42,59\%$$

Partiendo el valor Beta cercano a uno lo que implica que la red no esté idealmente conectada cabe calcular el índice gamma  $\Gamma$ , el cual denota la necesidad de introducir un 42,59% de aristas para lograr una red más integrada.

Ahora se calcula el índice de número ciclomático.

$$\mu = 23 - (19 - 1) = 5$$

De este resultado podemos decir que la red permite ir de un nodo a él mismo de 5 maneras diferentes en las cuales no se repite arista.

Es útil conocer el porcentaje que tiene la red del máximo de circuitos posible para ello se calcula el índice

$$\alpha = \frac{\mu}{2 * (n - 5)} * 100 = \frac{5}{2 * (19 - 5)} * 100 = 17,85\%$$

Este índice  $\alpha$  denota que la red posee más del 17% de los máximos posibles circuitos, este porcentaje indica que el desarrollo de la conectividad de la red es insuficiente frente a los parámetros establecidos cuando se trata de un grafo completamente conectado.

#### 7.4.2. EVALUACIÓN DE ACCESIBILIDAD DE LA RED VIAL INTERMUNICIPAL:

Para este cálculo es necesario partir de una matriz de accesibilidad, la cual fue construida con base en la matriz de conectividad y puede verse en la (ANEXO II).

De esta matriz cabe resaltar que los ceros de la matriz binaria de conectividad fueron remplazados por la cantidad de arcos que se deben atravesar a partir del camino más corto. Por lo que las filas 2,3,4,5 obtendrán valores mas altos respecto a los nodos 13,14 y 15 y viceversa.

Primeramente, se obtuvo el número asociado (NS) cuyo resultado se resume en la (TABLA 9).

TABLA 7 INDICES DE ACCESIBILIDAD

NODO (gid)	NS	SHIMBEL
1	11	78
2	12	98
3	13	101
4	12	92
5	11	82
6	9	65
7	8	66
8	7	69
9	7	74
10	8	81
11	9	90
12	10	101
13	11	114
14	12	129
15	13	146
16	11	83
17	10	72
18	10	74
19	11	81

El resultado NS expone a los nodos 8 y 9 como los más accesibles dado que es el número de arcos que se debe recorrer al punto más lejano de la red.

El índice de shimbels, al ser la suma de los arcos que se deben recorrer para ir a todos los demás nodos por el camino más cercano, arroja a los nodos 6 y 7 como los más accesibles. Estos nodos corresponden a Albania y Hatonuevo, cascos urbanos que se encuentran aproximadamente en el centro del departamento.

También se puede evidenciar que los nodos más alejados son el 3 y el 15, que corresponden a Manaure y La Jagua del Pilar respectivamente.

## 7.5. OBTENCIÓN DE PRODUCTO FINAL: MAPA DE ISÓCRONAS OBTENIDO A PARTIR DE UNA NUBE DE PUNTOS:

Para obtener el mapa de isócronas se parte de la topología de la red y de las IPS de segundo nivel identificadas en el departamento. Para ello se relaciona cada IPS con el nodo de la topología más cercano a ella haciendo uso de la función *ST\_DWithin* para optimizar el algoritmo condicionándolo a la realización de este solo para las geometrías que caben dentro del parámetro dado como máximo en la función que en este caso fue 2 kilómetros. Los resultados se observan en la (FIGURA 8).

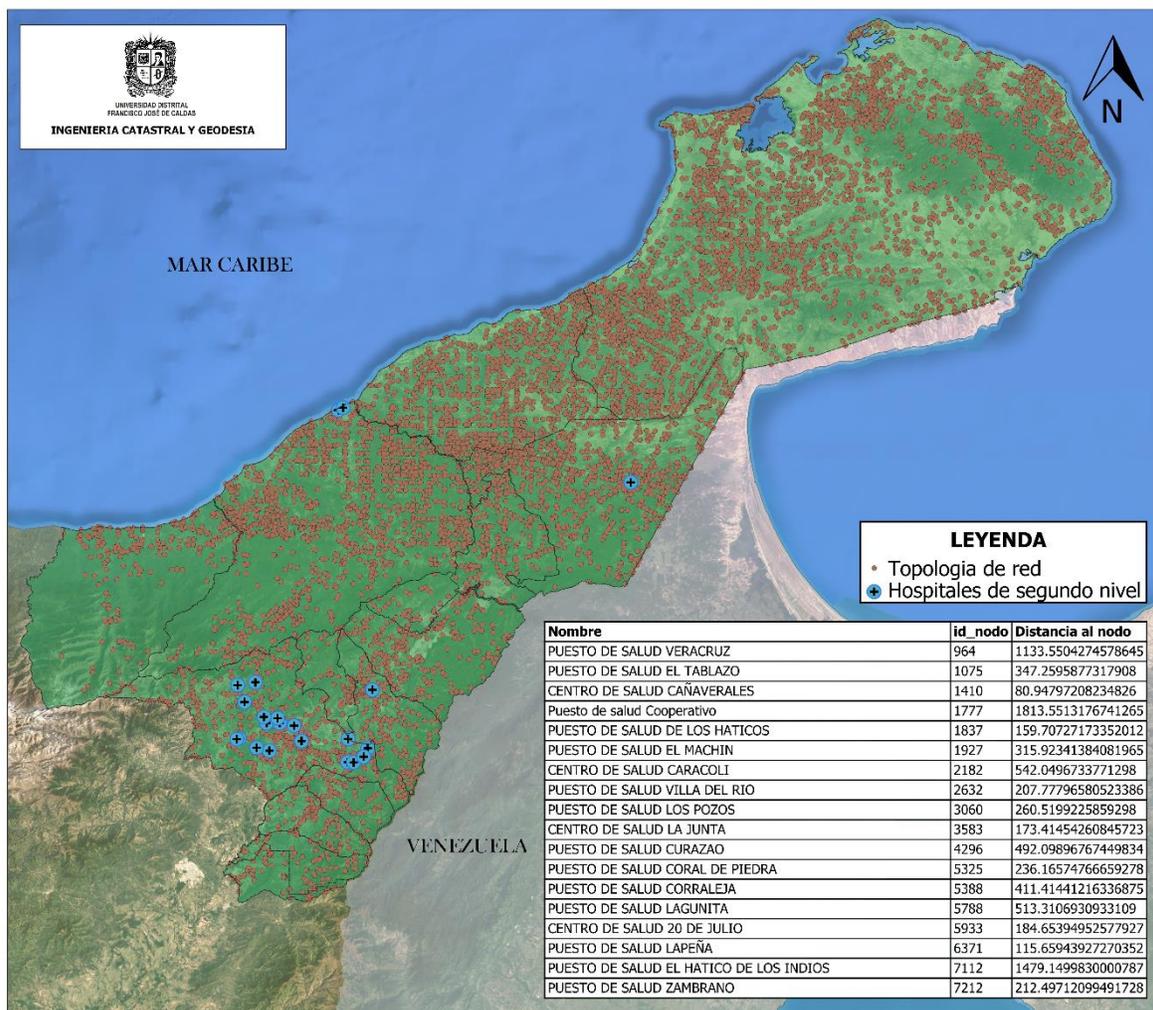


FIGURA 9. IDENTIFICADOR DE LA TOPOLOGIA DE RED ASIGNADO A LOS HOSPITALES DE SEGUNDO NIVEL.

Cabe resaltar que la distancia más grande a la que se encontraba un nodo de la topología de un hospital de segundo nivel es el puesto de salud cooperativo a 1,8

kilómetros. También es evidente que dichos hospitales se encuentran sólo en tres de los 15 municipios del departamento.

Ahora, teniendo los identificadores de los nodos de la topología para cada IPS, se procede a usarlos como nodos de inicio en el algoritmo de dijkstra que ejecuta la función *pgr\_dijkstraCost* y como nodo destino se utilizan todos los correspondientes a la topología de la red vial.

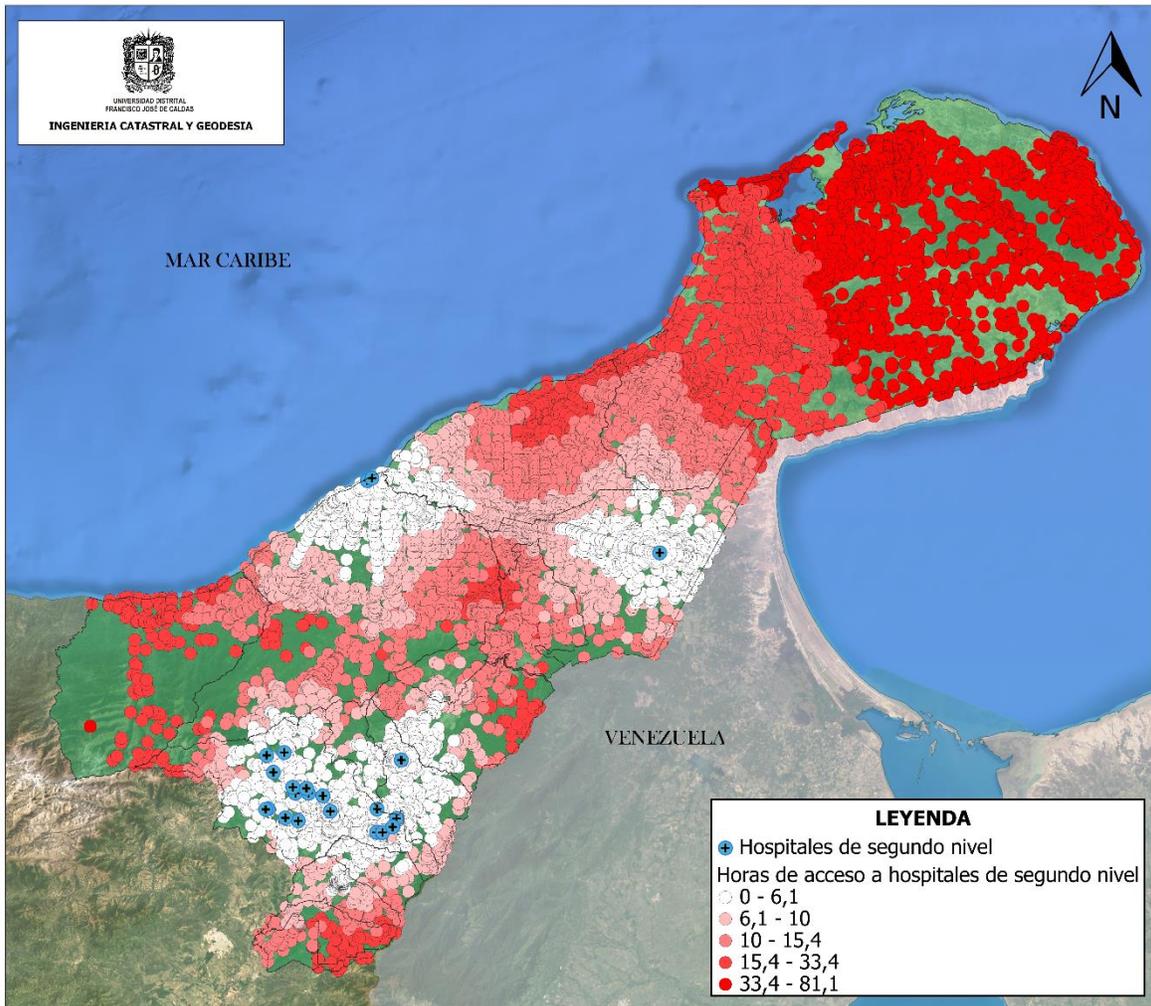


FIGURA 10. MAPA DE ACCESIBILIDAD OBTENIDO A PARTIR DE ISÓCRONAS DESDE HOSPITALES DE SEGUNDO NIVEL.

El resultado visto en la (FIGURA 8) puede ser entendido como un mapa de iso áreas obtenido a partir de una nube de puntos. Es de utilidad comparar los resultados con los que arroja un geoprocésamiento directo como un buffer. Para ello se debe partir del uso de una distancia cartesiana a partir de la cual se configura la circunferencia o buffer. Esta distancia para ser comparable con el resultado del análisis de rutas

debe ser calculada en función de la velocidad del caminante y el tiempo que arrojó el algoritmo, por ende, se propone un buffer primer anillo de 27450 metros de radio.

$$\text{Buffer } 6,1h = 4,5 \left( \frac{\text{km}}{\text{hra}} \right) * 6,1(\text{hra}) = 27.45 \text{ km}$$

$$\text{Buffer } 10h = 4,5 \left( \frac{\text{km}}{\text{hra}} \right) * 10(\text{hra}) = 45 \text{ km}$$

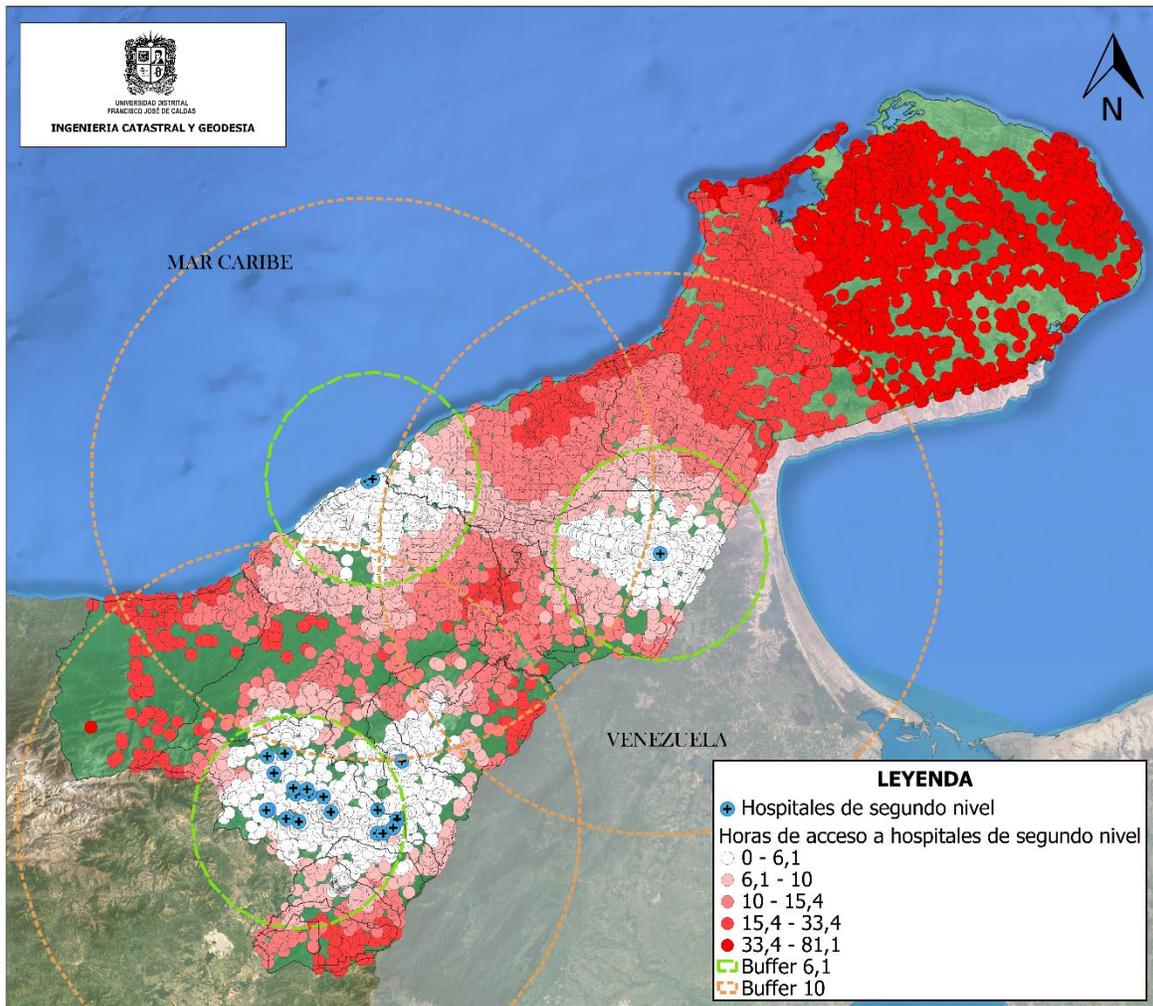


FIGURA 11. COMPARACIÓN DE RESULTADO ISÓCRONAS CON BUFFERS.

La (FIGURA 9) muestra como el cálculo de un buffer estaría introduciendo zonas que antes no habían sido calificadas dentro del rango de tiempo dado. Esta situación en un análisis de accesibilidad a la salud puede considerarse un error por comisión, debido a que son más los usuarios que podrían suponerse como posibilitados para acceder de manera oportuna a los servicios, por ende, se piensa el análisis de rutas como el más óptimo para estudiar la accesibilidad a salud.

## 7.5. FASE 4: ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS DE POBLACIÓN MIGRANTE:

Teniendo como insumo el análisis de accesibilidad, conectividad e isócronas, se cruzan con la información de asentamientos para arrojar una tabla resumen que plasme la situación de cada uno de los asentamientos estudiados.

Se obtienen los asentamientos que se encuentran a más de 9 horas de atención hospitalaria especializada prestada por las IPS de segundo nivel. (TABLA 10)

TABLA 8 ASENTAMIENTOS A MAS DE 9 HORAS DE ATENCIÓN DE SALUD DE SEGUNDO NIVEL

id_settlem	MUNICIPIO	HORAS A HOSPITAL
CO44560099	Manaure	17.24502728592836
CO44560021	Manaure	17.24502728592836
CO44090143	Dibulla	16.68227294627389
CO44560326	Manaure	16.1863510118837
CO44560325	Manaure	16.1863510118837
CO44560022	Manaure	16.1863510118837
CO44560330	Manaure	15.502938287633487
CO44560331	Manaure	15.462620601064785
CO44560329	Manaure	15.462620601064785
CO44847013	Uribía	14.048815007002545
CO44847333	Uribía	13.2380840531044
CO44847332	Uribía	13.2380840531044
CO44847334	Uribía	13.065317270288153
CO44847104	Uribía	13.065317270288153
CO44847335	Uribía	12.984286302997294
CO44847336	Uribía	12.85918194804272
CO44847014	Uribía	12.35074808235235
CO44847016	Uribía	12.320944035039801
CO44847338	Uribía	12.275793834318584
CO44847337	Uribía	12.275793834318584
CO44847017	Uribía	12.275793834318584
CO44035434	Albania	12.006049877316913
CO44035433	Albania	12.006049877316913
CO44847107	Uribía	11.918753155149664
CO44847106	Uribía	11.918753155149664
CO44847015	Uribía	11.918753155149664
CO44847105	Uribía	11.857659619267734
CO44035432	Albania	10.916669698341279
CO44035431	Albania	10.916669698341279
CO44035430	Albania	10.42136503561164

## 8. RECURSOS:

Para lograr los objetivos de este proyecto es indispensable la estructuración de una red geométrica que modela y abstrae una red de transporte. Y para ello se hace uso de un recurso tecnológico como lo es el software libre *QGIS* y un gestor de bases de datos como es *PostgreSQL* los cuales pueden ser instalados en un hardware de gama media y será gestionado por un profesional en información espacial. Se enumeran entonces los siguientes insumos.

### 8.1 INSUMOS:

- **Marco geoestadístico nacional – DANE:** Dentro de esta capa se encuentran el primer nivel de división político administrativa del territorio: Departamento, también el segundo nivel: Municipio.
- **Nivel geográfico Área Censal Urbana – DANE:** Esta capa cuenta con información de las cabeceras y centros poblado del territorio nacional.
- **Cartografía básica en escala 1:100000 – IGAC:** Para el análisis de accesibilidad se tendrá como insumo principal la red vial del departamento que cuenta con una jerarquización de las vías propuesta por
  - Cabe resaltar que, si la información de OSM se muestra mas completa, puede hacerse uso de este insumo. Sin embargo, la clasificación de velocidad de los tramos fue propuesta en función de la clasificación de las vías obtenida en la cartografía básica del IGAC, lo cual se explicará en la segunda fase.
- **IPS – SISPRO:** Esta capa es obtenida dentro del Geoservicio del SISPRO. Cuenta con todas las instituciones prestadoras de salud en el territorio nacional, teniendo en cuenta instituciones públicas como privadas.

### 8.2 RECURSO HUMANO:

- **Coordinador del Proyecto:** Se requiere un profesional capacitado en el manejo de herramientas SIG y con conocimientos amplios en gestión y manejo de información espacial. Este especialista será el encargado de supervisar las tareas propuestas en la sección anterior y también de chequear la información resultante de cada una de ellas.
- **Pasante:** Para el desarrollo de este proyecto se necesita el saber y horas labor de un pasante estudiante de pregrado en Ingeniería Catastral y Geodesia con conocimientos en gestión de información espacial por medio de herramientas tecnológicas SIG y apoyo en imágenes satelitales, con un

buen manejo de bases de datos y topología de redes, lo que le permitirá aportar una interpretación sujeta a lo que es la teoría de grafos.

El pasante deberá cumplir con las tareas asignadas en el ítem anterior y poner los resultados a disposición y evaluación del coordinador del proyecto.

### **8.3 RECURSOS TECNOLOGICOS:**

El software permite la creación de una conexión entre el visor de datos geográficos y la base de datos relacional, denotando una articulación efectiva entre el usuario y los datos para tomar mejores decisiones y mantener el contexto de la información.

#### **8.3.1. SOFTWARE QGIS VERSIÓN 2.18.2 Y 3.10.6 O POSTERIORES:**

Como se mencionó en apartados anteriores, el software *QGIS* permite de forma libre manejar la información espacial insumo previamente a la creación de la base de datos, y posterior a su estructuración, facilita la visualización de estos.

Se sugiere contar con las dos versiones debido a que en ocasiones se evidenció que la versión 3.10.6 presentaba errores al momento de crear la conexión con la BDE, dificultando la visualización de las tablas creadas dentro de *PostgreSQL*. Mientras que la versión más antigua a pesar de no contar con complementos de análisis de rutas comparable con el proceso realizado dentro de *PostGIS*, garantiza una conexión continua con la BDE.

#### **8.3.2. SOFTWARE PGADMIN 4:**

Este software soporta una estructura de bases de datos relacionales que a su vez permite la instalación de extensiones como *PostGIS* en su versión 3.0.1 y *PGRouting* en su versión 3.0.0, estas facilitan el uso de funciones espaciales de geoprocésamiento y análisis espacial de rutas respectivamente.

En este punto se considera necesario listar las funciones utilizadas a lo largo del trabajo para facilitar su réplica teniendo claro los atributos que solicita cada una.

##### **8.3.2.1. FUNCIONES PERTENECIENTES A LA EXTENSIÓN PostGIS:**

Como se mencionó antes, esta extensión permite la creación de bases de datos espaciales y suma al paquete de funciones, todas aquellas relacionadas con geoprocésamientos directos, se listarán las funciones que fueron utilizadas para llevar a cabo este proyecto:

- *ST\_length* (geom): Esta función solicita como atributo el campo que almacena la geometría de cada registro, en este caso la geometría debe ser de tipo línea para que su longitud sea arrojada como resultado, si se quisiera calcular otro tipo de valor geométrico como perímetro de un polígono, la función no sería la adecuada. El resultado que arroja es de tipo double y se encontrará en las unidades del sistema de referencia de la capa, por lo que es importante hacer las conversiones necesarias y tenerlo claro a la hora de listar los resultados.
- *ST\_area* (geom): Esta función solicita como atributo el campo de la geometría, pero en este caso el cálculo se realiza en dos dimensiones por lo que la geometría debe ser de tipo polígono y como se mencionó en un principio, no contar con geometrías multiparte o con aros porque estos casos hacen que los cálculos sean errados. De la misma manera que la anterior, esta función arroja los resultados en el mismo sistema de referencia que la capa insumo, por ende, se debe prestar especial atención a lo solicitado y a los resultados, obteniendo así un dato tipo double.
- *ST\_intersects* (geom1, geom2): Esta función permite conocer si dos geometrías del mismo tipo o de diferente tipo se intersecan en alguno de sus puntos. Como se observa, los atributos de entrada son también los campos de geometría de las dos capas involucradas por lo que es de vital importancia que el sistema de referencia de estas sea el mismo para poder relacionar la información de manera correcta. Esta función arroja un dato de tipo booleano que permite condicionar procesos facilitando los algoritmos dentro del software.
- *ST\_distance* (geom1, geom2): Esta función espacial permite conocer la distancia entre dos geometrías, por ende, los atributos de entrada son los campos que albergan dicha información y el resultado será de tipo double en las unidades del sistema de referencia de las capas.
- *ST\_DWithin* (geom1, geom2, distancia): Esta función al igual que la anterior evalúa la distancia entre dos geometrías del tipo que se quiera, sin embargo, se observa que pide un atributo diferente a las geometrías involucradas, este es una distancia dada para que el algoritmo evalúe si la condición se cumple. Por ejemplo, al preguntarle si los hospitales están a 30 metros de un nodo y esta se cumple, no arrojará el valor de la distancia entre ellas, sino que arrojará un valor de tipo booleano que denota si la geometría dos se encuentra dentro del radio de búsqueda generado a partir de dicha distancia.

### 8.3.2.2. FUNCIONES PERTENECIENTES A LA EXTENSIÓN PGROUTING:

- *pgr\_createTopology*('capa vías', tolerancia, 'geometría', identificador): Como se observa, la función demanda información de la capa sobre la cual se quiere evaluar la conectividad, en este caso será la capa de vías a la cual se le asigna un valor de tolerancia en metros el cual debe ser muy pequeño porque a partir de este, el algoritmo buscará corregir los errores de la digitalización ya sea extendiendo arcos, cortándolos, juntándolos o las diferentes operaciones listadas en la TABLA 1. Por otro lado, esta función arrojará como resultado una nueva capa vectorial de tipo punto correspondiente a los nodos de la red vial.
- *pgr\_dijkstra*('sentencia SQL', id, id, sentido): Esta función llamada como el algoritmo voraz en la teoría de grafos busca obtener la geometría del camino mas corto entre dos puntos dados junto con el costo en cada tramo. Es importante mencionar que la sentencia SQL que se solicita al principio debe arrojar información acerca de la capa de vías, el campo identificador de los nodos objetivo y destino y el evaluador, posteriormente pide un dato de tipo entero correspondiente al identificador source o target, cabe mencionar que se pueden empaquetar diferentes identificadores haciendo uso de un array a la consulta que los tenga. Por último, la función evalúa el sentido de las vías de contar con él, sin embargo, en este trabajo no se contaba con dicha información por lo que se puso false como parámetro.
- *pgr\_dijkstraCost*('sentencia SQL', id, id, sentido): Como puede observarse, esta función tiene la misma estructura que la anterior, sin embargo los resultados de *pgr\_dijkstraCost* no contemplan la geometría de la ruta optima, en este caso solo se tendrá un registro con el nodo de inicio, el nodo final y el costo total del recorrido.

## 9. CONCLUSIONES

El análisis espacial en su primer nivel, entendido como la visualización y exploración de los datos, es facilitado por el uso de sistemas de información geográfica que permiten la clasificación y ajuste de simbología de diferentes variables. En este trabajo se pudo abstraer el comportamiento de la infraestructura vial intermunicipal en la Guajira a partir de la clasificación de las vías según la categorización del IGAC.

Con base en dicha abstracción fue posible proponer un análisis de segundo nivel, el cual implica la ejecución de un algoritmo aplicado como lo es el cálculo de medidas de conectividad y accesibilidad de una red topológica. Con este cálculo se pudo calificar la red intermunicipal de la Guajira como desconectada, al obtener que la red solo presentaba un 7% de la conectividad posible con base en el conjunto nodal propuesto, entendido como las cabeceras más grandes de cada municipio y los puntos de interconexión visualizados previamente. También se obtuvo que para tener una red más integrada era necesario introducir un 42,59% más de aristas, lo que podría leerse como una necesidad latente del departamento de construir mejor infraestructura vial, lo cual, de la mano con (Sanabria G., S. ,2008) sería un determinante para potenciar el crecimiento económico del departamento y por ende su calidad de vida.

Por otro lado, se pudo evidenciar que la articulación entre un software de visualización de datos espaciales como QGIS y un software gestor de bases de datos espaciales como *pgAdmin* con su extensión *PostGIS*, es de bastante utilidad debido a que permite automatizar procesos o procesar grandes grupos de información en una sola sentencia y visualizar los resultados de forma inmediata, lo que permite corregir errores en la marcha y no al momento de validar los resultados.

Para ejemplificar esta cuestión se tiene la generación de la topología de las vías debido a que al ser forjada en *PostGIS* se creó una capa de puntos que facilitó la identificación de errores en la digitalización, entendidos como desconexión de tramos que en la realidad si presentaban un comportamiento continuo. Cabe resaltar que de pasar por alto estos errores se tendrían errores en el cálculo de rutas optimas y por ende los resultados podrían generar outliers en los tiempos de acceso a los hospitales.

Siguiendo el mismo precepto, se concluye que es de vital importancia alistar la información previamente a la ejecución de cualquier algoritmo, en este caso, la relación topológica indispensable fue la conectividad, por lo que entender los posibles errores topológicos y sus respectivas ediciones, se convirtió en la parte más tediosa del ejercicio ocupando una gran cantidad de tiempo.

Se pudo evidenciar que para sacar el mayor provecho a una base de datos espacial es necesario estructurarla garantizando sus funciones básicas como la eficiencia en el almacenamiento de los datos, las reglas de validación post carga y la facilidad de manipulación y facilidad en la consulta e interacción de los datos. Para ello se construyeron los diccionarios de entidades y atributos, los cuales permitieron un mayor entendimiento de las relaciones y características de los objetos que la constituyen.

Por último, cabe resaltar que esta metodología propone un camino a seguir para la realización de un análisis espacial fundamentado en el análisis de redes, sin embargo, la construcción de una base de datos relacional que tenga en cuenta la espacialidad de la información permite la ejecución de diversos algoritmos que no solo tengan en cuenta reglas topológicas como la conectividad, sino que también permitan evaluar contención, proximidad, vecinos cercanos, entre otros.

### **9.1. TRABAJOS FUTUROS:**

Los resultados obtenidos en este proyecto permiten proponer diferentes análisis espaciales entorno a la infraestructura de transporte intermunicipal, en principio se parte de la simplicidad que caracterizó al grafo y lo dicente de los indicadores de conectividad y accesibilidad. Haciendo uso de estos indicadores es posible evaluar y comparar información socioeconómica en los municipios partiendo de una hipótesis a priori en donde, siguiendo los postulados de (Sanabria G., S., 2008), se tenga a los nodos más desconectados o menos articulados como posibles cabeceras municipales con tasas bajas en variables socioeconómicas como desempleo, ingreso per cápita o educación partiendo de que la articulación con el resto de la red denota una ampliación en los mercados y por ende en la oferta de diferentes bienes y servicios.

De la mano de lo anterior y propendiendo analizar la situación del territorio nacional, podría pensarse en la evaluación de dichos indicadores en cada uno de los departamentos para construir una base de datos de corte transversal que involucre variables socioeconómicas a nivel departamental, con ello podría estudiarse si existe una relación de contagio espacial que genere un rezago en algunas regiones del país alejadas de las grandes centralidades. Este análisis permitiría la comparación de resultados en los diferentes departamentos utilizando diferentes técnicas de análisis espacial con un grado mayor de robustez estadística como lo son los propuestos por (Moreno, R., & Vayá, E., 2002) en donde posterior al análisis exploratorio de datos espaciales se construye un modelo econométrico que involucra la espacialidad mediante un rezago generado a partir de una matriz de contigüidad o de pesos.

También cabe resaltar que el objetivo de los diferentes análisis espaciales que involucren variables socioeconómicas es generalmente el crecimiento económico que puede entenderse por muchos autores como calidad de vida. Para ello es necesario la correcta gestión de los recursos dentro de la formulación de proyectos de política pública, esta última debería tener en cuenta variables que no son solo capturadas en encuestas, sino que también pueden ser generadas dentro de un análisis geográfico y espacial arrojando medidas cuantitativas comparables como los índices topológicos obtenidos en el presente trabajo.

Por último, se menciona que la posibilidad más inmediata de continuación de este trabajo es la realización de una interpolación de los resultados para convertir la nube de puntos de isócronas en polígonos que puedan calificarse como isoareas cerradas y concretas que permitan otro tipo de articulación de la información como la involucración de datos ráster.

## 10. CRONOGRAMA:

Cronograma de actividades												
Actividades a desarrollar	Mes uno				Mes uno				Mes uno			
	SEMANA				SEMANA				SEMANA			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<p>Alistamiento de información en formato shape integrando diferentes fuentes de datos dentro de un sistema de información geográfico.</p> <p>1. Consecución y visualización de insumos cartográficos a nivel nacional</p> <p>i. Infraestructura vial jerarquizada (IGAC).</p> <p>ii. Infraestructura de servicios (Open Street maps)</p> <p>iii. Asentamientos informales de población migrante (IMMAP)</p> <p>iv. Cabeceras municipales y centros poblado (DANE)</p> <p>v. IPS (geoservicio SISPRO)</p> <p>2. Depuración de información ajustándose a la zona de estudio mediante filtros espaciales y geoprocesamientos como intersección polígono-línea, polígono-polígono y polígono-punto.</p> <p>3. Preparar información para construir la base de datos en postgreSQL</p> <p>i. Diccionario de entidades</p> <p>ii. Modelo entidad relación</p> <p>iii. Diccionario de atributos</p>												
<p>Crear la red geométrica de puntos y líneas a partir de los shapes generados en la fase anterior.</p> <p>4. Revisión de capas filtradas para editar y eliminar información de más persiguiendo la optimización de los algoritmos sobre la red geométrica compuesta de líneas y nodos.</p> <p>5. Generación de la topología de red a partir de la capa geográfica de vías y posteriormente generar los nodos del grafo simple a partir de cabeceras y centros poblado.</p> <p>6. Corrección de errores en la digitalización de las vías a partir de la topología.</p>												
<p>7. Unión de información atributiva a partir de capa de instituciones prestadoras de salud de segundo nivel y topología generada.</p> <p>8. Cálculo de rutas optimas entre los nodos para asignarle información atributiva a los EDGES digitalizados.</p>												
<p>9. Cálculo de costo de rutas optimas desde los hospitales de segundo nivel a los puntos de la topología de red.</p> <p>10. Generación de mapa de isócronas.</p>												
<p>Evaluación de cohesión de la red geométrica mediante cálculo de índices de conectividad.</p> <p>11. Creación de matriz de conectividad</p> <p>12. Cálculo de índices de conectividad</p> <p>13. Generación de producto grafico que muestre resultado de los índices</p>												
<p>Evaluación de accesibilidad de la red geométrica mediante cálculo de índices de accesibilidad.</p> <p>14. Creación de matriz de accesibilidad tomando como insumo la matriz de conectividad y los cálculos de algoritmos de camino más corto.</p> <p>15. Cálculo de índices de accesibilidad.</p>												
<p>Análisis de asentamientos de población migrante.</p> <p>16. Teniendo como insumo los mapas de accesibilidad, conectividad e isócronas, se cruzan con la información de asentamientos para arrojar una tabla resumen que plasme la situación de cada uno de los asentamientos estudiados.</p>												

## 11. ANEXOS

### 11.1. ANEXO I

MATRIZ DE CONECTIVIDAD.

Origen\Destino	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
16	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
17	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
18	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
19	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

## 11.2. ANEXO II

TABLA 9. MATRIZ DE ACCESIBILIDAD.

Origen\Destino	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	2	1	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	1	3	1
2	2	0	3	4	4	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	4	3
3	1	3	0	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	2	2	3	2
4	2	4	1	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	3	3	2	1
5	2	4	2	1	0	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	3	3	1	1
6	2	3	4	3	2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	2	1	1	2
7	3	4	5	4	3	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	3	2	2	3
8	4	5	6	5	4	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	4	3	3	4
9	5	6	7	6	5	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	5	4	4	5
10	6	7	8	7	6	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	5	5	6
11	7	8	9	8	7	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	7	6	6	7
12	8	9	10	9	8	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	8	7	7	8
13	9	10	11	10	9	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	9	8	8	9
14	10	11	12	11	10	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	10	9	9	10
15	11	12	13	12	11	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	11	10	10	11
16	1	1	2	3	3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	0	1	3	4
17	1	2	2	3	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	0	2	3
18	3	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	3	2	0	1
19	1	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	4	3	1	0

## 12. BIBLIOGRAFIA

1. Álvarez, M., & Parra, J. (2013). *Teoría de grafos*.  
[http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1953/3/Alvarez\\_Nunez\\_Marcelino.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1953/3/Alvarez_Nunez_Marcelino.pdf)
2. Alvarez-Palau, E. J. y Aguilar, A. (2015). Accesibilidad territorial ferroviaria y distribución de población: Inglaterra y Gales, 1871-1931. *GeoFocus*, 15, 75-104. Recuperado de  
<http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/414>
3. Apparicio, P., Abdelmajid, M., Riva, M., & Shearmur, R. (2008). Comparing alternative approaches to measuring the geographical accessibility of urban health services: Distance types and aggregation-error issues. *International Journal of Health Geographics*, 7, 1–14. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-7-7>
4. Bautista, A. F. (2018). Análisis de accesibilidad y conectividad de la red vial intermunicipal en el micro-sistema regional de la provincia Centro en Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), 123–141.  
<https://doi.org/10.19053/01233769.8058>
5. Bernabé-Poveda, M. A. M. A., & López-Vázquez, C. M. C. M. (2012). Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE).
6. Bouzas, V. (2014). Aplicación de los SIG al transporte público. Recuperado de:  
<https://www.tysmagazine.com/aplicacion-de-los-sig-al-transporte-publico-ejemplo-practico-de-rutas-optimas/>
7. Buchhold, V. (2015). *Fast computation of Isochrones in road networks*. University of the State of Baden.
8. Durán Gil, C. A. (2017). Análisis espacial de las condiciones de vulnerabilidad social, económica, física y ambiental en el territorio colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 22(1), 67–84.  
<https://doi.org/10.19053/01233769.5956>
9. Fuentealba Alvarado, G. (2009). Estudio de aplicabilidad de TRANUS a la asignación de redes de transporte [Universidad del Bio Bio].  
[http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2306/1/Fuentealba\\_Alvarado\\_Gonzalo.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2306/1/Fuentealba_Alvarado_Gonzalo.pdf)
10. G, D. R. V., Zona, L. a, Del, M., México, V. D. E., México, V. De, Transporte, R., & Metropolitana, Z. (2009). *Revista Transporte y Territorio ISSN 1852-*

7175 Programa Transporte y Territorio Instituto de Geografía Facultad de Filosofía y Letras Universidad de Buenos Aires. 112–143.

11. IMMAP, (2020). Mapeo de asentamientos informales de población venezolana en el territorio colombiano a partir de imágenes satelitales y machine learning. Recuperado de <https://colombia.immap.org/deteccion-de-nuevos-asentamientos-a-traves-de-imagenes-satelitales/>
12. Madrid, A. y Ortiz, L. (2005). Análisis y síntesis en cartografía. Algunos procedimientos. Bogotá: Unibiblios.
13. Mejías Vera, M.A., Herrera Lorenzo, N., Vera Galván, J.R. y Pérez Pérez, M. (2010): Diseño de un modelo de datos de redes para el transporte multimodal.
14. Ministerio de relaciones exteriores de Colombia, (2020). *Radiografía Venezolanos en Colombia 30 de junio de 2020*.
15. Ministerio de salud y protección social, (2020). *Plan de respuesta del Sector salud al fenómeno migratorio*.  
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/COM/plan-respuesta-salud-migrantes.pdf>
16. Moreno, R., & Vayá, E. (2002). Econometría espacial: nuevas técnicas para el análisis regional. Una aplicación a las regiones europeas. *Investigaciones Regionales - Journal of Regional Research*, 2002(1), 83–106.
17. Obregón Biosca, S., Sánchez Escobedo, J., & Somohano Martínez, L. (2016). Planificación de rutas turísticas para autobús a través de indicadores de accesibilidad integral y de dotación de bienes materiales e inmateriales. *Transporte y Territorio*, 14, 144–166.  
<https://doi.org/10.34096/rtt.i14.2433>
18. Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica.  
[https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf)
19. ONU, DAES (2019). Portal de datos mundiales sobre migración. Recuperado el día 3 de octubre del año 2020 de  
[https://migrationdataportal.org/es?i=stock\\_abs &t=2019](https://migrationdataportal.org/es?i=stock_abs &t=2019)
20. Puebla, J. G., Alventosa, C., Redondo, J. C., Paniagua, E., & Palomares, J. C. G. (2002). Accesibilidad peatonal a la red sanitaria de asistencia primaria en Madrid. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 0(0), 269–280.  
<http://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC0202220269A/31143>

21. Prat, E., Pesquer, Ll., Olivet, M., Aloy, J., Fuste, J. y Pons, X. (2009): "Metodología para el análisis de accesibilidad a los recursos sanitarios: el caso de Cataluña", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 250-269.
22. Rodríguez Díaz, V. (2014). Accesibilidad geográfica de la población a la red de hospitales públicos de Andalucía: aportaciones desde el análisis de redes. Tesis Doctoral, 1–464. <https://rio.upo.es/xmlui/handle/10433/1534>
23. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2019). Transportation and the spatial structure. *The Geography of Transport Systems*, 49–94. <https://doi.org/10.4324/9781315618159-2>
24. Salas, A. S. (2008). *Acerca del algoritmo de Dijkstra*. <https://arxiv.org/pdf/0810.0075.pdf>
25. Sanabria G., S. (2008). *El papel del transporte en el crecimiento económico colombiano en la segunda mitad del siglo XX*.
26. Stefanakis, E. (2014). Chapter 4 Geographic Information Systems  
Geographic Information Systems • GIS ... – Geographic – Information – Systems.
27. Tomlin, C. D. (1990). *Geographin information systems and cartographic modelling*.
28. Valbuena, G. J. P. (2015). Geographical accessibility to health services: a case study for Barranquilla/Accesibilidad geográfica a los servicios de salud: un estudio de caso para Barranquilla/Acessibilidade geografica aos servicos de saude: um estudo de caso para Barranquilla. *Sociedad y Economía*, 28, 181+.  
<http://go.galegroup.com/ps/i.do?id=GALE%7CA402483546&v=2.1&u=udistrict&it=r&p=GPS&sw=w&asid=e4e748907d5d6a246ec02d09651d4fbb%5Cnhtp://go.galegroup.com.bdigital.udistrital.edu.co:8080/ps/downloadDocument.do?inPS=true&prodId=GPS&userGroupName=udistrict&tabID>