

**DESARROLLO DE SIG WEB PARA LA VISUALIZACIÓN DE ACCESIBILIDAD DEL
TRANSPORTE URBANO MASIVO MIO EN LA CIUDAD DE CALI**

KAREN LIZETH BEDOYA MORALES

ANDREA XIMENA BUENDIA NARANJO



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES®**

 **Acreditación Institucional
de Alta Calidad**
Resolución 4792 del 15 de mayo de 2019

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES**

2021

**DESARROLLO DE SIG WEB PARA LA VISUALIZACIÓN DE ACCESIBILIDAD DEL
TRANSPORTE URBANO MASIVO MIO EN LA CIUDAD DE CALI**

**KAREN LIZETH BEDOYA MORALES
ANDREA XIMENA BUENDIA NARANJO**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES**

2021

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios y a nuestras familias por su paciencia y apoyo...

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo, desarrollar un SIG web que permita consultar la accesibilidad a la red de transporte urbano masivo en la ciudad de Cali; el cual permite la visualización y consulta de las estaciones de la red troncal del transporte masivo MIO. El SIG Web opera mediante la creación de una base de datos espacial en PostgreSQL, la cual se alimenta de información alfanumérica de los barrios, las estaciones de la red troncal y las rutas en las que opera la red troncal del transporte masivo MIO en la ciudad de Cali, así como la adición en la base de datos de los indicadores de accesibilidad calculados en el análisis de redes mediante la implementación de grafos. Por otro lado, la información es usada por el servidor de mapas MapServer y visualizada a través de librería Leaflet. A partir de la integración de los componentes del sistema fue posible la generación del servidor Web el cual permite la visualización de la red troncal y sus estaciones en la ciudad de Cali, así como el despliegue y consulta de la información de la accesibilidad e indicadores, tiempos mínimos desde una estación de partida a una estación de llegada, y rutas optimas; permitiendo tener acceso ordenado y rápido de la información geoespacial.

PALABRAS CLAVES: SIG Web, transporte masivo, accesibilidad

ABSTRACT

The present work aims to develop a web SIG that allows consulting the accessibility to the mass urban transport network in the city of Cali; which allows the visualization and consultation of the MIO mass transport trunk network stations. The Web SIG operates by creating a spatial database in PostgreSQL, which is fed with alphanumeric information of the neighborhoods, the trunk network stations and the routes on which the MIO mass transport trunk network operates in the city. de Cali, as well as the addition in the database of the accessibility indicators calculated in the network analysis through the implementation of graphs. On the other hand, the information is used by the MapServer and viewed through the Leaflet library. From the integration of the system components, it was possible to generate the Web server which allows the visualization of the trunk network and its stations in the city of Cali, as well as the display and query of accessibility information and indicators, minimum times from a departure station to an arrival station, and optimal routes; have orderly and fast access to geospatial information.

KEY WORDS: Web GIS, mass transit, accessibility

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	13
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. OBJETIVO GENERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. MARCO DE REFERENCIA.....	16
4.1. REFERENTE CONCEPTUAL	16
4.1.1. <i>Transporte</i>	16
4.1.2. <i>Redes de transporte</i>	16
4.1.3. <i>Sistema BRT</i>	16
4.1.4. <i>Accesibilidad</i>	17
4.1.5. <i>Conectividad o cohesión</i>	17
4.1.6. <i>Cobertura</i>	17
4.1.7. <i>Grafos</i>	17
4.1.8. <i>Topología de un grafo</i>	18
4.1.9. <i>Sistemas de información geográfica</i>	19
4.1.10. <i>SIG web</i>	19
4.1.11. <i>Bases de datos geográficas</i>	19
4.2. REFERENTE LEGAL O NORMATIVO	19
4.3. ANTECEDENTES	20
4.4. REFERENTE TEORICO	23
4.4.1 Número ciclomático μ (Berge 1962)	23
4.4.2 Medidas de conexión	24
4.4.2.1 Estado	24
4.4.2.1.1 Índice Betta (Kansky 1963)	24
4.4.2.1.2 Índice alfa o Grado de "ciclicidad" (Kansky 1963)	24
4.4.2.1.3 Índice Gamma (Kansky 1963)	24
4.4.2.2 Forma	25
4.4.2.2.1 Separación entre estaciones (S)	25
4.4.3 Matriz de adyacencia	25
4.4.4 Matriz de accesibilidad topológica	25
4.4.5 Número Asociado o de Köning N_s	26
4.4.6 Índice de Shimbél	26
4.4.7 Medidas de accesibilidad global	26
4.4.7.1 Índice G de dispersión	26
4.4.7.2 Índice de Accesibilidad Media (IAM)	26
4.4.8 Robustez (Newman, 2003)	27
4.4.9 Centralidad (Betweenness) Freeman (1977, 1979)	27
4.4.10 Cobertura	28
4.4.11 Algoritmo de Floyd Warshall (Bernard Roy y Stephen Warshall, 1959) (Robert Floyd, 1962)	28
4.4.12 Algoritmo Dijkstra (Edsger Dijkstra, 1959)	28
4.4.13 Índice de Rodeo	28

4.4.13.1	<i>Índice de accesibilidad Real (Ar)</i>	28
4.4.13.2	<i>Índice de accesibilidad ideal (Ai)</i>	29
4.4.13.3	<i>Índice de Rodeo por Municipio (Rm)</i>	29
5.	METODOLOGÍA	29
5.1.	TIPO DE TRABAJO.....	29
5.1.1.	<i>FASE 1. Caracterización espacial del transporte público BRT en la ciudad de Cali</i>	29
5.1.2.	<i>FASE 2. Propiedades topológicas con la aplicación de los grafos.</i>	30
5.1.3.	<i>FASE 3. Construcción de la base de datos</i>	30
5.1.4.	<i>FASE 4. Diseño del modelo conceptual SIG Web</i>	30
5.1.5.	<i>FASE 5. Diseño de la arquitectura del SIG Web</i>	30
5.2.	PROCEDIMIENTO.....	30
5.2.1.	<i>FASE 1. Caracterización espacial del transporte público BRT en la ciudad de Cali</i>	30
5.2.1.1.	<i>Recopilación de la información:</i>	30
5.2.1.2.	<i>Análisis de la información:</i>	30
5.2.2.	<i>FASE 2. Propiedades topológicas con la aplicación de los grafos</i>	30
5.2.2.1.	<i>Selección de variables para el análisis de la red:</i>	30
5.2.2.2.	<i>Generación del grafo de la red BRT:</i>	31
5.2.2.3.	<i>Identificación de índices a calcular:</i>	31
5.2.3.	<i>FASE 3. Construcción de la base de datos</i>	31
5.2.3.1.	<i>Información espacial de la ciudad de Cali:</i>	31
5.2.3.2.	<i>Diseño de la base de datos: especificación:</i>	31
5.2.4.	<i>FASE 4. Diseño del modelo conceptual SIG Web</i>	40
5.2.4.1.	<i>Análisis de la información e identificación de los atributos, entidades y conexiones:</i>	40
5.2.4.2.	<i>Consultas especiales (códigos):</i>	40
5.2.4.3.	<i>Identificación de los módulos del SIG Web:</i>	42
5.2.5.	<i>FASE 5. Diseño de la arquitectura del SIG Web</i>	42
5.2.5.1.	<i>Implementación del SIG Web:</i>	42
5.2.5.2.	<i>Interfaz de usuario:</i>	43
5.2.5.3.	<i>Pruebas de aplicación:</i>	43
6.	RESULTADOS	45
6.1.	CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DEL BRT EN LA CIUDAD DE CALI.....	45
6.2.	PROPIEDADES TOPOLÓGICAS DE LA RED DEL SISTEMA BRT CON LA APLICACIÓN DE GRAFOS.....	46
6.2.1.	<i>Accesibilidad</i>	46
6.2.1.1.	<i>Numero Asociados (Ns):</i>	46
6.2.1.2.	<i>Índice de Shimbel:</i>	46
6.2.1.3.	<i>Centralidad:</i>	48
6.2.2.	<i>Cobertura</i>	48
6.2.2.1.	<i>índice de Robustez:</i>	48
6.2.3.	<i>Conectividad</i>	48
6.2.3.1.	<i>Índice Beta:</i>	48
6.2.3.2.	<i>Índice Gamma:</i>	48
6.2.3.4.	<i>Numero Ciclomático:</i>	50
6.3.	CONSTRUCCIÓN DE UNA BASE DE DATOS GEOGRÁFICA QUE ALMACENE LA INFORMACIÓN VECTORIAL Y ALFANUMÉRICA.....	50
6.4.	DISEÑO DEL MODELO CONCEPTUAL DEL SIG WEB.....	53
6.5.	DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SIG WEB ACORDE CON LOS REQUERIMIENTOS PARA EL DESPLIEGUE Y REPRESENTACIÓN DE LA APLICACIÓN.....	54
7.	CONCLUSIONES	61
8.	RECOMENDACIONES	62
9.	BIBLIOGRAFÍA	63

10.	ANEXOS	66
10.1.	ANEXO 1. ÁRBOL DE CAUSAS Y EFECTOS.....	66
10.2.	ANEXO 2. ÁRBOL DE OBJETIVOS.....	67
10.3.	ANEXO 3. MATRIZ DE ACCESIBILIDAD TOPOLOGICA CALI	67
10.4.	ANEXO 4. MATRIZ DE ADYACENCIA DE LA RED MIO.....	67
10.5.	ANEXO 5. BASE DE DATOS (ARCHIVO: REDMIO.BACKUP).....	67
10.6.	ANEXO 6. CONSULTAS SQL (ARCHIVO: REDMIO.SQL).....	67

LISTA DE FIGURAS

figura 1. Bus articulado (a), padrón (b), alimentador (c).....	16
figura 2. Componentes del grafo y ejemplo de una red.....	18
figura 3. Representación de la Red de metro de Bruselas como un grafo	21
figura 4. Integración de la información en el software Rutas.....	22
Figura 5 Mapa red de metro Montreal	
Figura 6 Representación de la red en un grafo.....	23
figura 7. Ejemplo del grafo, su matriz de adyacencia (A), Numero de conexiones (D).....	25
figura 8. Árbol metodológico	29
Figura 9 Esquema estructural y funcional.....	31
Figura 10. PgAdmin.....	32
figura 11. Conexión de la base de datos “redmio” con QGIS	32
figura 12. Creación de la topología de la red	33
figura 13. Pgroutin en QGIS y visualización de la red.....	33
figura 14. Creación columna tiempo.	34
figura 15. Reconstrucción de la tabla Vértices.....	35
figura 16. Creación tabla rutas_vertices_pgr	35
figura 17. Columna Source (Nodo inicial) y columna Target (Nodo final).....	36
figura 18. Análisis de la topología de la red de la tabla rutas	36
figura 19. Estructura de la tabla Vértices	37
figura 20. Función Análisis de Segmentos.....	38
figura 21. Tabla del Análisis de segmentos	38
figura 22. Resultado de los posibles errores.....	39
figura 23. Columna reserve_cost.....	39
figura 24. Ruta desde el nodo 1 al nodo 168	40
figura 25. Ruta optima del nodo 1 al nodo 168	41
figura 26. Visualización en QGIS de la ruta optima del nodo 1 al nodo 168.....	41
Figura 27. ms4w - Mapserver Versión 4.0.5	43
Figura 28 Librería Leaflet	43
figura 29. Vista general del SIG WEB.....	44
figura 30. Interfaz de consulta del SIG WEB.....	44
figura 31. Caracterización espacial del sistema BRT de la ciudad de Cali.....	45
figura 32. Grafo de la red troncal del sistema de transporte masivo MIO.....	46
figura 33. Base de datos.....	50
figura 34. Creación de la Topología de la Red.....	51
figura 35. Ruta sobre la red troncal del transporte masivo MIO	51
figura 36. Obstáculo en la red.....	52
figura 37. Ruta opcional debido al obstáculo	52
figura 38. MapServer.....	53
figura 39. Modelo relacional de la Base de datos.	53
figura 40. Interfaz de Usuario	54
figura 41 Zoom de la interfaz	54
figura 42 Selección para despliegue consultas.....	54
figura 43 Selección de estación inicial y estación final para el cálculo de ruta óptima	55
figura 44 Selección de los índices de accesibilidad	55
figura 45 Selección de la estación desde el visor	55
figura 46 Selección de estación inicial desde el visor para el cálculo de ruta.....	56
figura 47 Selección del nodo final para el cálculo de ruta	56
figura 48 Cálculo de ruta óptima.....	57
figura 49 Selección de estación inicial y final desde el panel.....	58

figura 50 Cálculo de ruta	58
figura 51 Selección de índices de accesibilidad desde el panel.....	58
figura 52 Índice Ns	59
figura 53 Índice Shimbel	59
figura 54 Índice de accesibilidad Real	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad.....	19
Tabla 2. Matriz de adyacencia metro de Bruselas.....	21
Tabla 3. Matriz de accesibilidad topológica	47
Tabla 4. Matriz de conectividad.....	49

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el servicio de transporte público tradicional ha tenido bajos niveles de aceptación en las ciudades principales de Colombia, esto teniendo en cuenta que a medida que aumenta el desarrollo económico, las zonas urbanizables y la densidad poblacional, se siente la necesidad de desplazarse a muchos destinos para realizar las diferentes rutinas, lo que hace indispensable la utilización del transporte; lo que conlleva a un mayor nivel de congestión vehicular debido a la gran movilización que se presenta para dirigirse al lugar deseado.

Es posible asociar las redes de transporte a una estructura de la teoría de grafos, ya que se conoce el desarrollo de las redes a partir de un dibujo conformado por nodos (estaciones) y conectados a enlaces (vías) se puede obtener la topología, conectividad y accesibilidad de la red, la cual se observa como el grafo del sistema permitiendo evidenciar las relaciones e interacciones de las redes.

Con el desarrollo de la propuesta se pretende servir de fuente de información y consulta a los usuarios, facilitando la visualización y entendimiento de la accesibilidad del sistema de transporte masivo MIO.

Los resultados obtenidos de los diferentes indicadores de accesibilidad implementados en el SIG Web posibilita conocer el rendimiento del sistema de transporte masivo, siendo importante para los organismos de planificación de tránsito municipal de la ciudad de Cali, ya que permite entender la estructura de la red y su conexión, así como las zonas de mayor interés, adquiriendo una mejor comprensión sobre las propiedades topológicas del diseño de redes, facilitando la toma de decisiones que incentiven el desarrollo urbano.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

En años recientes en Colombia, los sistemas de transporte masivos denominados BRT (Buses de Tránsito Rápido) se han popularizado en sus ciudades capitales. Contar con un sistema de transporte público como estos implica el cumplimiento de los criterios del desarrollo sostenible urbano: criterio ambiental donde la calidad del sistema de transporte público debe permitir y promover la reducción del uso diario de vehículos particulares con el fin de incentivar el uso del sistema, criterio social donde se debe satisfacer la movilidad de los usuarios sin limitaciones ni exclusión social y a su vez debe cubrir toda la ciudad y, finalmente, criterio económico y financiero donde el sistema de transporte público debe promover el desarrollo económico de la ciudad, la elevación de la productividad, la accesibilidad a lugares de trabajo y a la educación.

El acceder con facilidad a un sistema de transporte, promueve una mayor equidad y un mejoramiento del estilo de vida de las personas, la accesibilidad puede definirse como la capacidad de interactuar o de hacer contacto con sitios en los cuales hay oportunidades económicas y sociales, la accesibilidad espacial está determinada por la ubicación geográfica en relación con las localidades elegidas por los servicios de transporte disponibles para llegar a esos destinos.

En la actualidad se evidencia que el sistema de transporte público en Colombia BRT presenta serias deficiencias en el diseño para la movilización de los pasajeros, es relativamente lento, no contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En el caso particular el Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente -MIO- en la ciudad de Cali enfrenta diferentes problemáticas: dificultades económicas, quejas por la calidad del servicio, baja frecuencia del paso de los buses conllevando a extensos tiempos de espera, retrasos en la infraestructura, insuficientes articulados para cubrir la demanda en las diferentes zonas de la ciudad, poca cobertura, y larga espera en realizar los trasbordos, entre otros. Esto genera insatisfacción en los usuarios y poca atracción hacia la utilización de este sistema para su movilización, ya que muchas zonas no son cubiertas por este transporte generando en algunos lugares exclusión de la población por las limitaciones presentadas para acceder a este servicio conllevando a que las personas se movilicen en otro tipo de transporte, particular o ilegal. Lo anterior sin duda tiene como consecuencia agravar la situación económica de los habitantes de la ciudad, ya que no se contaría con los suficientes recursos para la implementación de más vehículos y el mejoramiento de la movilización.

El estudio de los sistemas BRT puede ser abordado a través del concepto de redes. Una red es un conjunto gráfico de nodos o vértices (estaciones o paradas del sistema), unidos por enlaces o bordes (vías del sistema) siendo éstos la topología; que es la geometría de la red, y está asociado a las rutas de transporte público en realizar viajes entre su origen y destino. Mediante el estudio de la red de los sistemas de transporte es posible detectar los cambios o efectos que suceden cuando se presentan modificaciones (adición) en las topologías que puedan afectar el sistema.

Con base en lo anterior es posible entonces preguntarse ¿De qué manera se puede analizar, construir y consultar la accesibilidad al sistema de red de transporte urbano masivo de la Ciudad de Santiago de Cali?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un SIG web que permita consultar la accesibilidad a la red de transporte urbano masivo en la ciudad de Cali.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar espacialmente el sistema BRT en la ciudad de Cali
- Determinar las propiedades topológicas de la red del sistema BRT con la aplicación de los grafos.
- Construcción de una base de datos geográfica que almacene la información vectorial y los indicadores.
- Diseñar el modelo conceptual del SIG web a partir de los datos obtenidos
- Diseñar la arquitectura del SIG web acorde con los requerimientos para el despliegue y representación de la información

3. JUSTIFICACIÓN

El sistema BRT está basado en autobuses de alta calidad, de tránsito rápido, es cómodo y rentable; mediante infraestructuras segregadas que aportan prioridad de paso. Estos sistemas completos han llegado a tener niveles de demanda hasta de 45000 pphpd (pasajeros/hora/día). Dada la importancia para llegar a transportar tantos pasajeros se ha representado como una opción viable la utilización de este servicio.

El poder analizar el sistema de transporte a través del análisis de redes (grafos) permitirá ver qué relación hay entre los problemas que enfrenta el sistema de transporte público BRT actualmente, al utilizar variables e indicadores relacionados con el análisis topológico de redes se puede hacer un aporte para el estudio de este problema.

Para ello se pretende hacer un análisis del sistema de transporte BRT en la ciudad de Cali a través de la construcción de la red e implementando un SIG WEB. Se busca relacionar las variables sociodemográficas y las asociadas a la topología, ya que la perspectiva de la red ha sido un factor poco estudiado en la planificación del transporte público y generalmente no es analizada, pues se limitan a las diferentes características operativas y le dan mayor importancia a la capacidad para mover gran cantidad de personas, la geografía, los costos, entre otros; sin tener en cuenta los aspectos topológicos que es la geometría y diseño de la red de tránsito que es cada vez más importante a medida que crecen los sistemas ya que los cambios presentados pueden afectarla.

El analizar esta red dará elementos para poder tomar decisiones sobre aspectos que se deben considerar en el proceso de planificación y así mejorar los indicadores.

Con este estudio se pretende aportar al planificador la importancia de los diferentes indicadores a tratar ya que le permitirán apreciar y detallar las deficiencias encontradas en el sistema, se pueden beneficiar con el análisis de la topología de las redes, y a su vez comparar experiencias con variables socioeconómicas y territoriales. Haciendo uso de herramientas geomáticas como: información vectorial, creación de la base de datos con las diferentes variables a involucrar en el estudio y la implementación del SIG Web para realizar las consultas.

Conocer la accesibilidad del sistema de transporte es importante para las agencias de planificación de tránsito porque les permitirá conocer la estructura de la red y su conexión, podrán adquirir una mejor comprensión sobre las propiedades topológicas del diseño de las redes que no se han tenido en cuenta y puedan serles favorables ya que se les proporcionará nuevos indicadores que sean susceptibles de incorporarse en el proceso de planificación. Identificando como beneficiarios directos para llevar a cabo el proyecto a las Administraciones Municipales, a los planificadores del Sistema Integrado de Transporte Masivo -MIO-, Secretaría de movilidad y la población de la ciudad de Cali.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. REFERENTE CONCEPTUAL

A continuación, se describen los conceptos que se involucran dentro del proceso de desarrollo del proyecto.

4.1.1. Transporte

El movimiento de las personas, del comercio ha sido de gran importancia para el desarrollo de las sociedades. El crecimiento de la economía viene asociado al aumento de la movilidad de las personas los cuales conllevan a la accesibilidad a ciertas zonas para llevar a cabo diferentes rutinas.

4.1.2. Redes de transporte

La red se refiere a la estructura de las rutas en un sistema identificando las paradas o estaciones como nodos y las rutas son consideradas enlaces. Los sistemas de transporte suelen representarse de esta forma para conocer su flujo y estructura, ya que pertenecen a una categoría de redes espaciales.

4.1.3. Sistema BRT

BRT (Bus Rapid Transit o Bus de Tránsito Rápido) es un sistema basado en buses, con componentes férreos, maneja carriles de uso exclusivo el cual se encuentra separado de los demás modos de transporte para así poder cumplir con la operación de alta capacidad en el recorrido de buses articulados y padrones, se conforma también con rutas alimentadoras (Fig. 1), que se conecta por fuera de los carriles exclusivos y abarcan zonas que los otros vehículos no cubren. El sistema también se conforma por estaciones para el acceso de los usuarios, con previa recolección de tarifa, cuenta con patios dedicados para el mantenimiento de los vehículos y monitoreo del sistema por parte de los operadores, y el centro de control donde hacen un seguimiento de la operación del sistema manejando un esquema operacional sofisticado logrando un alto nivel de desempeño y calidad de la prestación del servicio.



figura 1. Bus articulado (a), padrón (b), alimentador (c)

Para la creación e implementación de este servicio de transporte público los planificadores tienen en cuenta diferentes aspectos como: el nivel de demanda que tiene la ciudad donde se quiere implementar y a su vez las características de los viajes, el presupuesto disponible para el desarrollo del sistema, el tiempo que se dispone para la planificación y evaluar el tipo de transporte adecuado, lo que hace que en la fase de diseño y planificación sea muy corta. Tienen en cuenta el contexto político, social y cultural en el que se está tomando la decisión sobre la opción del transporte público a construir, dándole también importancia al tipo de combustible que podría ser utilizado en determinada ciudad

4.1.4. Accesibilidad

Puede definirse como la capacidad de interactuar o de hacer contacto con sitios en que hay oportunidades económicas o sociales, donde todas las personas puedan hacer uso de los recursos, independientemente de las capacidades técnicas o físicas.

Permite analizar la organización espacial de la red, de forma que los nodos establecen una jerarquía en función de la facilidad de acceso a cada uno y al resto de los nodos del grafo. Permite saber cuáles son los nodos más accesibles a la red.

4.1.5. Conectividad o cohesión

Determina el grado de comunicación recíproca entre los vértices y es el grado de integración o interconexión que representa una red para su funcionamiento interno. Permite conocer la estructura de la red.

Es la capacidad de viajar libremente dentro de la red, podría estar relacionado con el grado de la movilidad o la densidad de las posibilidades de transferencia.

4.1.6. Cobertura

Se conoce como el área servida por la red de transporte. Donde se tiene en cuenta el número total de estaciones y la superficie terrestre donde se encuentra el sistema. Es una forma de medir la importancia de la accesibilidad al transporte.

4.1.7. Grafos

Un grafo no es más que un conjunto de puntos y un conjunto de relaciones entre pares de puntos". La teoría de grafos es una rama de las matemáticas y ciencias de la computación que estudia las relaciones entre los objetos de un conjunto dado. Un grafo G es un par (V, E) , donde V es un conjunto finito, no vacío cuyos elementos son llamados vértices, mientras que E es un conjunto finito de pares de elementos no ordenados llamados bordes. Los bordes representan las conexiones entre los vértices.

- Los grafos pueden ser dirigidos o no.
- El orden de un gráfico se corresponde con el número de vértices.
- El tamaño de un gráfico se corresponde con el número de aristas.
- Vértices conectados por un borde se dice que son adyacentes o vecinos.
- El orden de un vértice corresponde al número de vecinos.

- Una ruta es una lista de aristas que conectan dos vértices.
- Un ciclo es un camino que se inicia y termina en el mismo vértice.
- Un grafo sin ciclos se llama acíclico.

Los grafos están compuestos básicamente de nodos o vértices y arcos o aristas. Además de estos elementos esenciales, también de los centroides, llamados nodos que se agregan características de una región, y otros elementos derivados de la interacción entre los nodos y arcos - cadenas, ciclos, trayectorias y circuitos.

4.1.8. Topología de un grafo

- **Nodos:** Son conocidos también como vértices, se utilizan para identificar las estaciones, paraderos, ciudades, etc., los cuales sirven para determinar como punto base donde se conectarán con arcos para generar la red de un sistema de transporte. Es donde se originan los movimientos.
- **Arcos:** Son conocidos también como líneas, bordes, se utilizan para identificar las vías o recorridos, estos se conectan con los nodos para generar un gráfico de la red de transporte.
- **Grafos orientados:** Evalúa el grado de conexión entre nodos y arcos, se puede definir semigrados interior o exterior: - El semigrado interior de un vértice es el número de arcos que tienen su destino en el vértice. Un vértice con semigrado interior igual a cero (0), quiere decir que puede ser un origen del grafo. - El semigrado exterior de un vértice es el número de arcos con origen en el vértice. Un vértice con semigrado exterior igual a cero (0), quiere decir que puede ser un destino del grafo.
- **Ciclos:** Es un conjunto de arcos los cuales unen una serie de vértices, prescindiendo de su orientación.
- **Circuito:** Son caminos cuyos vértices de origen y destino coinciden. Es un camino que vuelve a su punto de partida.

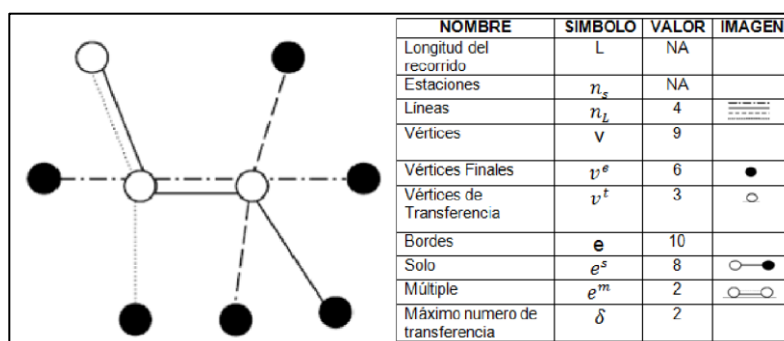


figura 2. Componentes del grafo y ejemplo de una red

Fuente: Derrible and Kennedy, 2009c

4.1.9. Sistemas de información geográfica

Es un conjunto de componentes específicos que permiten a los usuarios finales crear consultas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio. La información geográfica va a ser aquella información que tiene algún componente espacial, es decir, una ubicación, además, una información atributiva que nos detalle más sobre ese elemento en cuestión.

4.1.10. SIG web

Es un sistema de información geográfica en línea que provee la información cartográfica disponible según el tema de interés. La herramienta permite realizar consultas espaciales y puede ser consultada por usuarios con distintos roles (tomadores de decisiones, investigadores, autoridades ambientales, comunidad en general, etc.), dado su fácil uso y acceso.

4.1.11. Bases de datos geográficas

Es un conjunto de datos geográficos organizados que permiten la realización de análisis y gestión del territorio dentro de aplicaciones de sistemas de información geográfica. La espina dorsal de una GDB es el modelo de datos, que consiste en la formalización conceptual (descripción) de las entidades geográficas del mundo real con el objeto de realizar una abstracción que permita satisfacer unas necesidades de información. La implementación del modelo debe de facilitar la explotación y optimizar el almacenamiento para conseguir el mejor rendimiento en las consultas. Todo lo relativo a la descripción de los diferentes productos de una GDB queda reflejado en las denominadas especificaciones del producto. En ellas se recogen tanto el catálogo de objetos geográficos asociado como el sistema de referencia, la calidad de los datos y los metadatos, así como la captura, el mantenimiento y la distribución de estos.

4.2. REFERENTE LEGAL O NORMATIVO

Tabla 1. Normatividad

Grupos	Intereses	Recursos y Mandatos
<ul style="list-style-type: none"> • Población de la ciudad de Cali • Secretaría de Movilidad. • Sistema Masivo Integrado de Occidente MIO. • Administraciones municipales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte • Accesibilidad al sistema de transporte por parte de los usuarios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ley 336 de 1996. • Ley 105 de 1993. • POT Cali.

Fuente: propia. 2020.

Ley 336 de 1996 Por la cual se unifican los principios y los criterios que servirán de fundamento para la regulación y reglamentación del Transporte Público Aéreo, Marítimo, Fluvial, Férreo, Masivo y Terrestre y su operación en el Territorio Nacional.

Ley 105 de 1993 Por la cual se dictan disposiciones básicas sobre el transporte, se redistribuyen competencias y recursos entre la Nación y las Entidades Territoriales, se reglamenta la planeación en el sector transporte y se dictan otras disposiciones.

4.3. ANTECEDENTES

Para *Network analysis of world subway systems using updated graph theory*. Derrible and Kennedy 2009c. Consideran 19 metros ferroviarios de todo el mundo que tienen derecho exclusivo de paso, la relación entre el número de usuario y el diseño de la red se ha estudiado mediante el uso de conceptos de la teoría de grafos. Calcularon el número de pasajeros como el número anual de abordajes, obtuvieron información acerca de los diseños de las redes para cada ciudad de estudio, información acerca de las características de cada ciudad como; densidad, población, área. El diseño de la red lo miden en función de tres indicadores: medida de cobertura de transporte como una forma de medir la accesibilidad al transporte, franqueza (Directness) y la conectividad. Otros indicadores como: número ciclomático, diámetro de la red se tuvieron en cuenta. Para el diseño de redes obtuvieron; mapas de tránsito para identificar el sistema BRT, número de estaciones, número de líneas, número de transferencias, longitud del recorrido. Se centran en las topologías del sistema de la red de metro, teniendo en cuenta las líneas y los nodos. El objetivo principal del trabajo fue investigar la relación entre el diseño de la red y la cantidad de pasajeros mediante el uso de indicadores de tránsito correspondiente. En el proceso, muchos datos se recogieron en la ciudad y los niveles de la red. El trabajo se basó en tres pasos:

- Recopilar nuevos y adecuados datos sobre las características de la red de metro.
- Desarrollar nuevas medidas de las redes de transporte urbano, en particular, mediante el uso de la teoría de grafos.
- Establecer una relación empírica entre las características de usuarios del transporte y de la red.

Por otro lado, en *Characterizing metro networks: state, form, and structure*. Derrible Sybil, et. al, 2010b. Se centran en el estudio de diseño de las redes como el número de líneas, estaciones, transferencia. Comparan diferentes sistemas de metros en todo el mundo que puedan complementar a la planificación ayudándolos en la toma de decisiones. Utilizan los principios de la teoría de grafos. Con el diseño del grafo de las redes de metro, obtienen la cantidad de vértices (estaciones de transferencia) y enlaces (vías). Aplicado a la red de Bruselas. Fig. 3

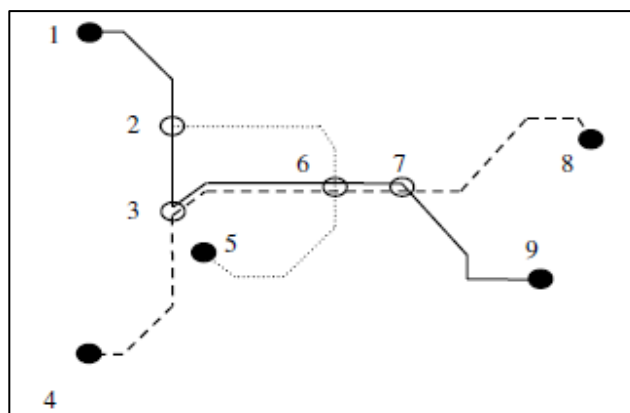


figura 3. Representación de la Red de metro de Bruselas como un grafo
Fuente: Derrible Sybil, 2010b

A partir de este diseño generan la matriz de conectividad y ver como se encuentra conectada cada una de las estaciones y la red en su totalidad. El valor de 2 en la matriz de conectividad indica que a la estación recaen dos líneas. Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de adyacencia metro de Bruselas

Vertex	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total edges e	Single edges e^s	Multiple edges e^m
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
2	1	0	1	0	0	1	0	0	0	3	3	0
3	0	1	0	1	0	2	0	0	0	4	3	1
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
6	0	1	2	0	1	0	2	0	0	6	4	2
7	0	0	0	0	0	2	0	1	1	4	3	1
8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
Total	1	3	4	1	1	6	4	1	1	22	18	4
Effective total										11	9	2

Fuente: Derrible Sybil, 2010b

Con la construcción de esta matriz y el diseño de la red, es posible definir tres características de las redes de tránsito: Estado que describe el desarrollo de las redes, la forma que es la relación espacial entre las redes del transporte y el entorno donde está construido, la estructura describe las redes a través de dos indicadores: la conectividad que es la vinculación entre nodos y líneas, y la franqueza (Directness) que es la facilidad de viajar dentro de una red sin necesidad de hacer transferencias. Las estaciones las definen como vértices o nodos y las líneas de carretera como bordes.

En *Integración de un SIG con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas*. Rodríguez A., 2007. La red de carretera se visualiza como un grafo, ya que los enlaces son las vías y los vértices son los nodos o las intersecciones de los enlaces. Estos grafos, tienen asociados la distancia de cada arco, la longitud de la red, tiempos de

recorridos, también pueden o no ser dirigidos dependiendo si cada línea va en uno o dos sentidos. La implementación del SIG, el sistema de información empresarial y los modelos de cálculos lo utilizaron con el fin de optimizar el recorrido de los vehículos de la empresa, ya que le permitió hacer cálculos de rutas y su gestión para satisfacer las necesidades de los clientes en el transporte de sus mercancías.

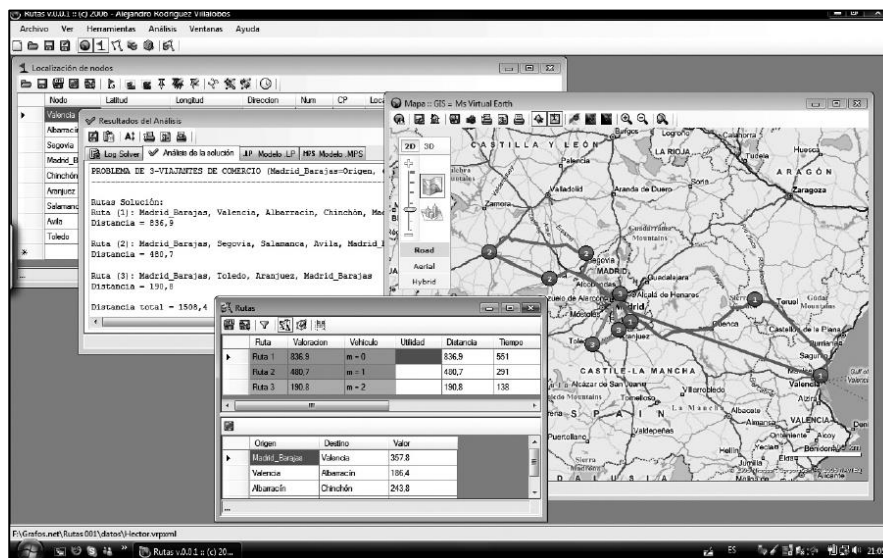


figura 4. Integración de la información en el software Rutas
Fuente: Rodríguez A., 2007

La utilización del SIG fue importante para la ubicación espacial de cada uno de los sitios de los clientes, además de los despachos de mercancías. Conocer el sentido de las vías, generar el análisis de las redes de transporte, caminos mínimos, tiempo de recorrido mínimo, recorrido y seguimiento de las rutas óptimas que generen menor costo. Con la información geográfica obtenida de los recorridos, se hizo la construcción del grafo, el cual contiene la información más importante de la flota de los vehículos capacitados.

Para la resolución del problema de la flota, se integró la información en el software "Rutas" Fig. 4, ya que a partir de esto se podía hacer un modelamiento y optimización de la situación permitiendo así obtener posibles soluciones para la toma de decisiones de este tipo de planificación. Los autores buscaron que, a partir de la aplicación del software, los modelos de cálculos, y el SIG puedan determinar los recorridos de ciertos vehículos, que se encargue de transportar determinada carga, recorra los clientes necesarios en el menor tiempo, menor recorrido con el menor gasto posible.

The complexity and robustness of metro networks. Derrible Sybil, et al, 2010c. Realizaron un estudio donde utilizaron 33 redes de metros en el mundo. El objetivo de su trabajo fue "analizar con eficacia la complejidad de los sistemas de metro mediante la adopción de un enfoque de ciencia de las redes.". Aunque estas ciencias se pueden dividir en dos categorías, su investigación se enfoca en las redes de transporte público y las propiedades topológicas. En los sistemas de transporte se identifican las estaciones o paradas el cual se conoce como nodos o vértices, y las líneas de las vías como enlaces o aristas. Estas redes se forman para generar un gráfico sencillo de cómo está relacionado el sistema. Se hace con base a la teoría de grafos. Los autores hacen la representación gráfica de la estación de Montreal Fig. 5. Las estaciones o nodos son llamadas diatónicas, el cual pueden ser estaciones de transferencia

(círculos negros), estaciones finales (círculos blancos) Fig. 6. Contar con el número total de vértices del sistema les fue importante para conocer el tamaño de la red.

Para el análisis de la red analizan diferentes indicadores; El comportamiento de libre escala de la red, el cual consta de tomar las estaciones o vértices que se encuentran en un sistema e identificar la cantidad de enlaces que contiene. Además de esto verifican si la frecuencia del gráfico que están manejando decae siguiendo una ley de potencia. También los llamados pequeños mundos el cual va relacionado con la conexión de la red y al mismo tiempo que tan cerca se encuentra una de la otra, a partir de lo anterior incorporan otros indicadores como el de conectividad el cual muestra como está conectado una red, la transferencia, la robustez siendo los caminos alternativos que ofrecen a los usuarios de transporte. Partiendo de la robustez, su principal interés fue conocer las rutas alternativas para llegar a cualquier destino dentro de la red, para ello utilizaron el número ciclomático, pues con este indicador se calcula el número de ciclos en un gráfico. Además, se vuelve necesario tenerlo en cuenta a medida que crecen las redes, puesto que generan más ciclos el cual son de importancia en los elementos positivos del cálculo de la robustez.



Figura 5 Mapa red de metro Montreal

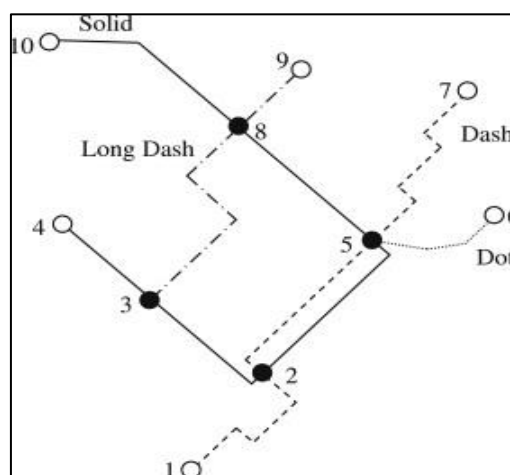


Figura 6 Representación de la red en un grafo

Fuente: Derrible Sybil, 2010c

En el estudio se esperaba que entre más grande fuera la red del sistema mayor sería el número de transferencias, por el contrario, son pocas las estaciones que las ofrecen, pero así mismo hay mucha variedad. “Sin embargo, a medida que crecen los sistemas de metro, también crean nuevas estaciones que pueden impedir robustez. Por tanto, es importante crear nuevas estaciones de transferencia fuera o en la periferia de la base de la ciudad, lo que disminuye el factor de escala ϵ y contribuye a la solidez de los sistemas más grandes”.

4.4. REFERENTE TEORICO

Se presentan los modelos matemáticos y estadísticos principales para la aplicación de la teoría de los grafos.

4.4.1 Número ciclomático μ (Berge 1962)

El número ciclomático, sirve para determinar la cantidad de circuitos que se encuentran en un grafo llamado ciclos, cada una de las múltiples maneras que existen para ir desde un nodo hasta

él mismo, sin tener que pasar dos veces por el mismo arco. Se calcula restando el número total de arcos (a) al número de nodos necesario para formar un árbol ($n - 1$). Entre mayor sea este valor la red estará más desarrollada.

$$\mu = e - (v - p) = e - v + p \quad (1)$$

Donde;

e Es el número de bordes (enlaces), v es el número de vértices (nodos), y p es el número de subgráficos. Las redes de transporte rara vez son disjuntas, por lo tanto p normalmente es igual a 1. Esencialmente, $(v - 1)$ es el número de bordes en un gráfico de árbol con V vértices. Por lo tanto, restando $(v - 1)$ a e simplemente cuenta el número de "bordes extra" en el gráfico, y son estas "bordes extra" que crean ciclos. La presencia de ciclos es importante en las redes de transporte, en particular para ofrecer vías alternativas, es decir, para la robustez.

4.4.2 Medidas de conexión

4.4.2.1 Estado

Para evaluar el estado de las redes, se cuentan con indicadores de conectividad, los cuales determinan el grado de conexión y complejidad de la red. Teniendo como base los indicadores Beta y gamma, ya que a partir de ellos es posible identificar la relación entre enlaces - vértices, y el grado de comunicación entre ellos dentro de la red.

4.4.2.1.1 Índice Beta (Kansky 1963)

Es la relación de bordes a vértices; en forma matemática:

$$\beta = \frac{e}{v} \quad (2)$$

Por tanto, este índice es el número medio de conexiones por vértice. También se ha referido como un indicador de la complejidad (es decir, más conexiones por vértice la más compleja). Mide la conectividad en relación a los enlaces y los vértices. Los valores de este índice varían entre 0 y 3. Valores menores a 1 indica que es una red desconectada (inconexa) valores de 1 quiere decir que la red al menos cuenta con 1 circuito. Mayor que 1 a 3 representa redes complejas.

4.4.2.1.2 Índice alfa o Grado de "ciclicidad" (Kansky 1963)

Como las redes de transporte son en su mayoría plana, quizás con la excepción de las redes de líneas aéreas, este índice está relacionado con el número ciclomático y se define como:

$$\alpha = \frac{e-v+1}{3(v-2)-(v-1)} = \frac{e-v+a}{2v-5} \quad (3)$$

Relaciona el número de circuitos con su número máximo y se utiliza para conocer la cantidad posibles.

4.4.2.1.3 Índice Gamma (Kansky 1963)

La teoría de grafos medida de la conectividad de red para gráficos planos, conocidos como el índice gamma, se expresa como:

$$\gamma = \frac{e}{3*(v-2)} \quad (4)$$

Donde;

v Es el número de vértices (o nodos) presente en la red y e es el número de aristas (o enlaces)

que conectan los vértices. Un nodo se forma debido a una intersección de dos o más enlaces en la red. El numerador es el número de bordes, mientras que el denominador es el número máximo de posibles bordes E_{max} ; por lo tanto, γ es la relación real al número potencial de bordes. Se encarga de medir la conectividad de la red. Este índice varía entre 0 (no hay conexiones entre nodos) y 1 (es el número máximo de conexiones directas entre nodos). Relaciona la cantidad de enlaces que existen en la red con el mayor número de enlaces que puedan existir.

4.4.2.2 Forma

4.4.2.2.1 Separación entre estaciones (S)

Se puede identificar como se está comportando la red dentro del entorno construido. Se calcula la separación entre estaciones dentro de la red.

$$S = \frac{L}{n_s} \quad (5)$$

Donde;

L Es la longitud total de la red, n_s Es el número de estaciones de la red

4.4.3 Matriz de adyacencia

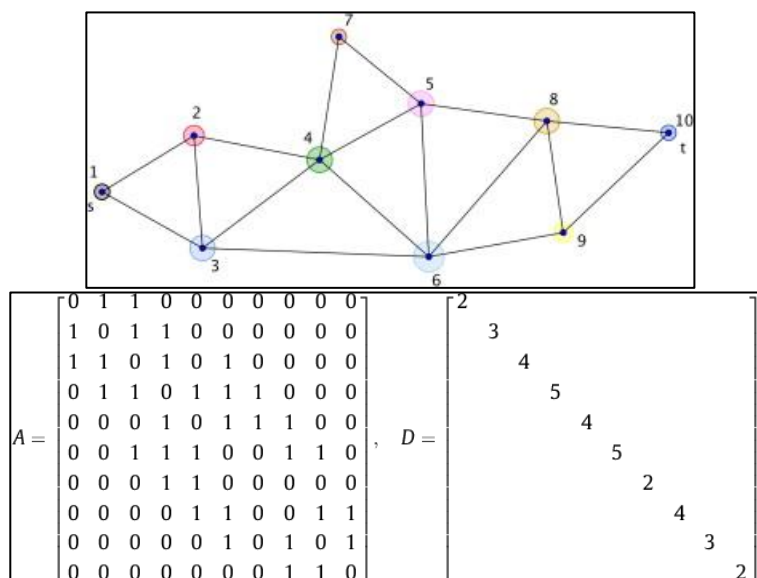


figura 7. Ejemplo del grafo, su matriz de adyacencia (A), Numero de conexiones (D)

Fuente: Taras Agyzkov, et al.2014

Se utiliza para conocer las relaciones topológicas dentro de la red, es una matriz cuadrada binaria donde se relacionan los nodos y sus conexiones, teniéndose valores 0 cuando no hay conexión entre los nodos y 1 cuando hay conexión. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de un grafo que está contenido por 10 vértices, su matriz de adyacencia o conectividad y las conexiones por cada nodo.

4.4.4 Matriz de accesibilidad topológica

Los valores de 0 de la matriz de adyacencia se reemplazan por la cantidad de enlaces que se necesitan para llegar de un nodo i al nodo j , siguiendo el camino más corto. Los valores de 1 que

estaban en la matriz de adyacencia es porque hay conexión directa de la estación i a la estación j . A partir de esta matriz es posible conocer el diámetro topológico del grafo, este dato se obtiene del mayor valor que se da en el nodo i origen al nodo j destino. Para crear la matriz de accesibilidad topológica se utiliza el algoritmo de Floyd-Warshall.

4.4.5 Número Asociado o de Köning Ns

Representa la accesibilidad del nodo i al más lejano de la red, entre 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. Representa la mayor distancia topológica de un nodo a otro.

4.4.6 Índice de Shimbel

Es la suma de cada uno de los valores de las filas de la matriz de accesibilidad topológica. Cantidad de enlaces por la que se debe pasar para ir desde un nodo i (origen) hasta cada uno de los nodos de la red (destino). Se presenta que el nodo más accesible de la red es el que menor valor tiene:

$$Shimbel = \sum d_{xy} \quad (6)$$

Donde;

d_{xy} Es la distancia que hay del nodo x al nodo y

4.4.7 Medidas de accesibilidad global

4.4.7.1 Índice G de dispersión

Se encarga de medir el nivel de accesibilidad de toda la red. Se utiliza para calcular el índice de accesibilidad media y así poder comparar diferentes redes de transporte.

$$Indice\ G = \sum Shimbel \quad (7)$$

4.4.7.2 Índice de Accesibilidad Media (IAM)

Es el valor promedio de la accesibilidad en la red. Permite comparar diferentes redes de transporte a partir de la construcción del grafo.

$$IAM = \frac{Indice\ G}{n} \quad (8)$$

Donde;

Índice G es el índice de dispersión, n es la cantidad de nodos o estaciones presentes dentro de la red

El valor obtenido en el cálculo de la accesibilidad media, es el valor medio que se tiene en cuenta para identificar los nodos menos y más accesibles de la red. Este valor medio se utiliza con base al índice de shimbel. Los valores que se encuentren por debajo del IAM son los nodos más accesibles. Los valores mayores son los nodos menos accesibles.

4.4.8 Robustez (Newman, 2003)

El concepto de robustez es de fundamental importancia en el estudio de las redes. Por ejemplo, la solidez de los sistemas de metro, impactos de su capacidad para ofrecer rutas alternativas durante la ocurrencia de fallas, accidentes o ataques, incluso dirigidos.

$$r = \frac{\sum_i f_{ii} - \sum_i a_i b_i}{1 - \sum_i a_i b_i} \quad (9)$$

El valor de r oscila entre -1 (completamente deselectivo) a 1 (completamente selectivo). En una red selectiva, los nodos están vinculados a otros nodos que tienen un índice de conexión similar [35].

Para este indicador se tenía inicialmente la formulación de Newman 2003, pero al revisar en la literatura se encuentra en el trabajo de Derrible S. donde recomienda no trabajar con la propuesta de Newman para el cálculo de este indicador ya que el modelo no se ajusta a las redes de transporte.

En la investigación de Derrible se tiene la siguiente formulación:

$$r = \frac{\mu - E^m}{N_s} \quad (10)$$

Donde;

μ es el número ciclotómico de la red

E^m Son los enlaces múltiples en la red (se ajusta para las redes de metro)

N_s Número de estaciones presentes en la red

Al revisar la nueva formulación propuesta por Derrible, se aprecia que utiliza una nueva variable denominada enlaces múltiples o E^m , ésta se ajusta cuando se trabaja con las redes de metro, ya que a una estación pueden llegar más de dos líneas o enlaces (vías) en ambos sentidos, haciendo que la red sea más robusta y en la estación se presenten múltiples vías u opciones para que el usuario realice su recorrido dentro del sistema.

Pero al tener una red de transporte masivo como lo es el BRT, se logra apreciar que las estaciones de cada red solo cuentan con dos conexiones lo que se refiere que a cada estación solo llegan dos vías que son en ambos sentidos, ninguna red de las que se trabajan en el estudio cuenta con enlaces múltiples, ya que estos sistemas se han adecuado sobre las vías de tráfico normal, y sobre ellas aún continúan diferentes tipos de transporte (particular, taxi).

La robustez como si bien se ha mencionado en la literatura al tratar de la solidez del sistema y parte del cálculo del número ciclotómico que son los ciclos presentados en la red teniendo en cuenta la cantidad de estaciones y vías presentes. Se ha ajustado el modelo, obviando la variable E^m ya que no se está trabajando con redes de metro. Para este nuevo ajuste se tiene:

$$r = \frac{\mu}{N_s} \quad (11)$$

Donde;

μ es el número ciclotómico de la red

N_s Número de estaciones presentes en la red

Esta formulación se aplica para todas las ciudades de estudio.

4.4.9 Centralidad (*Betweenness*) Freeman (1977, 1979)

Es una medición de importancia estructural sobre la base de la información mundial de las rutas más cortas que conectan todos los pares de nodos. *Betweenness* centralidad se refiere a la proporción del número de rutas más cortas entre los nodos que contienen un nodo en particular para el número total de rutas más cortas en la red.

Es utilizada para conocer la estructura de la red, tiene en cuenta la cantidad de nodos y su importancia para todo el sistema. Este indicador es utilizado para medir el grado de influencia de cada nodo a las diferentes zonas dentro de la ciudad.

Puede ser hallado para toda la red en general, y también para cada nodo. En el estudio se parte de aplicarlo para cada nodo (estación) ya que con estos valores es posible representar e identificar cartográficamente los nodos más centrales e importantes dentro de la ciudad.

Para el cálculo del indicador se cuenta con los datos obtenidos de la matriz de accesibilidad topológica (índice de shimbel), ya que a través de este indicador se pretende conocer la centralidad espacial de las estaciones dentro de la red.

Para calcular la centralidad se tiene que:

$$c = \frac{\text{Shimbel}}{n-1} \quad (12)$$

Donde;

n Número de nodos (estaciones) de la red en estudio

4.4.10 Cobertura

Permite medir la cobertura de cada una de las redes de transporte [7].

$$\sigma = \frac{n_s * \pi * 0,5^2}{A} \quad (13)$$

Donde;

n_s Es el número de estaciones, $\pi * 0,5^2$ es una constante, A se toma como el umbral de radio de las estaciones, en diferentes estudios es tomado como 500 m, pero este valor se puede ajustar según el comportamiento de cada red.

4.4.11 Algoritmo de Floyd Warshall (Bernard Roy y Stephen Warshall, 1959) (Robert Floyd, 1962)

Utiliza la formulación de programación dinámica para resolver el problema de caminos, todos los pares más cortos en un grafo dirigido y ponderado $G = (V, E)$. En el cual los enlaces tengan un valor de costo ya sea distancia, duración entre nodos, entre otros.

Este algoritmo se encarga de comparar todos los posibles caminos a través del grafo en cada par de nodos o vértices.

4.4.12 Algoritmo Dijkstra (Edsger Dijkstra, 1959)

Es utilizado para encontrar la ruta más corta entre dos puntos en un grafo, donde cada nodo contiene un valor de peso ya sea en distancia, duración, tiempo entre nodos, etc.

El algoritmo se encarga de explorar la red y recorrer todos los caminos más cortos partiendo desde un nodo origen hacia los nodos destino comparando la mejor ruta. Funciona dentro de una matriz de costo (cuando se utiliza en software). No funciona en grafos donde sus nodos contienen valores negativos.

4.4.13 Índice de Rodeo

4.4.13.1 Índice de accesibilidad Real (Ar)

Es la suma de los valores horizontales de la matriz de distancia real entre nodos. Se obtiene la distancia real que separa cada nodo de los demás.

4.4.13.2 Índice de accesibilidad ideal (A_i)

Es la suma de los valores horizontales de la matriz de distancia ideal o en línea recta entre nodos. Se obtiene la distancia ideal que podría separar cada nodo de los demás.

4.4.13.3 Índice de Rodeo por Municipio (R_m)

Se calcula relacionando los índices de accesibilidad real e ideal. En el estudio se trata como el índice de rodeo por cada red estudiada.

$$R_m = \frac{A_r}{A_i} \quad (14)$$

Donde;

A_r es la accesibilidad Real

A_i es la accesibilidad Ideal

Entre más grande sea el valor de R_m , es porque la accesibilidad real dentro de la red supera a la ideal, haciendo que la ciudad sea la menos comunicada. En cambio, cuando este valor se acerca a 1, es porque la diferencia entre la accesibilidad real e ideal es mínima, entonces mejor es la comunicación dentro de la red puesto que se aproximan a lo ideal.

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE TRABAJO

De acuerdo con los objetivos del proyecto, se realiza un trabajo aplicado cuya innovación es desarrollo tecnológico, esto ya que se desarrolla un SIG web que contiene una base de datos de la información de la red troncal MIO, permitiendo la visualización y consulta de accesibilidad a la red de transporte urbano masivo MIO en la ciudad de Cali.

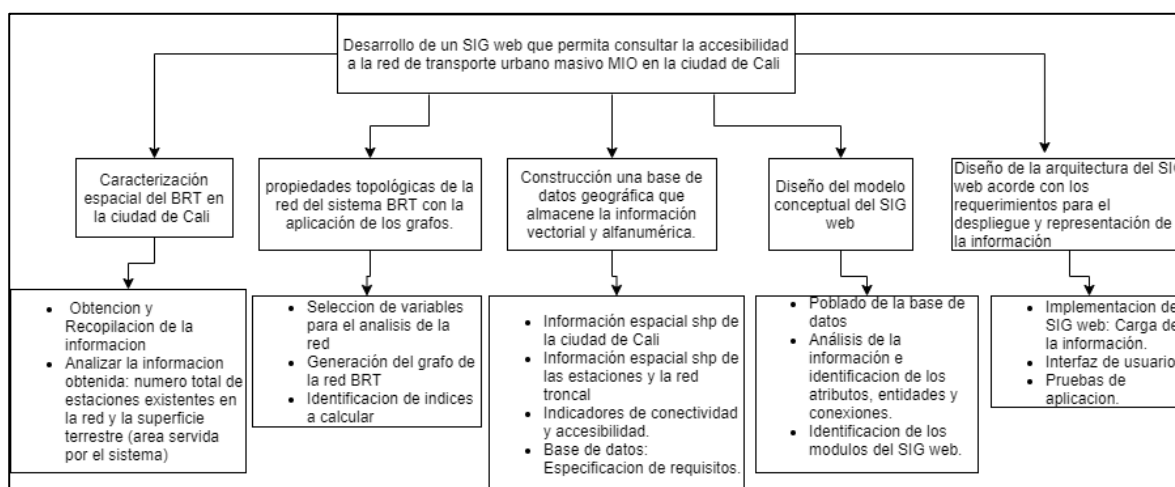


figura 8. Árbol metodológico
Fuente: Propia.2020

5.1.1. FASE 1. Caracterización espacial del transporte público BRT en la ciudad de Cali

- Recopilación de la Información

- Análisis de información

5.1.2. FASE 2. Propiedades topológicas con la aplicación de los grafos.

- Selección de variables para el análisis de la red.
- Generación del grafo de la red BRT.
- Identificación de índices a calcular.

5.1.3. FASE 3. Construcción de la base de datos

- Información espacial de la ciudad de Cali
- información espacial de las estaciones y la red troncal de transporte de la ciudad de Cali.
- Diseño de la base de datos: especificación

5.1.4. FASE 4. Diseño del modelo conceptual SIG Web

- Análisis de la información e identificación de los atributos, entidades y conexiones.
- Consultas especiales (códigos)
- Identificación de los módulos del SIG Web

5.1.5. FASE 5. Diseño de la arquitectura del SIG Web

- Implementación del SIG Web: Carga de la información
- Interfaz de usuario.
- Pruebas de aplicación.

5.2. PROCEDIMIENTO

5.2.1. FASE 1. Caracterización espacial del transporte público BRT en la ciudad de Cali

5.2.1.1. Recopilación de la información:

La parte más importante del proyecto es la adquisición de la información de fuentes confiables; la información se obtuvo de mapas esquemáticos del sistema BRT de la ciudad de Cali. A partir de la información obtenida de la página de la Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali -IDESC, se tiene que la esquematización del sistema dentro de la ciudad ha sido dividida por zonas; La zona 0 conocida como Centro, zona 1 como Universidades, zona 2 como Menga, zona 3 Chiminangos, zona 4 Andrés Sanín, zona 5 Aguablanca, zona 7 Cañaveralejo.

5.2.1.2. Análisis de la información:

Teniendo en cuenta que la recopilación de la información es la materia prima del proyecto, se realizan dos (2) actividades fundamentales: Estructuración de los datos, migración de la información a los formatos requeridos; con el objetivo de filtrar y organizar los datos del proyecto.

5.2.2. FASE 2. Propiedades topológicas con la aplicación de los grafos

5.2.2.1. Selección de variables para el análisis de la red:

Se realizó la identificación de las variables a trabajar en el análisis de redes:

- Nodos: las estaciones de la red troncal MIO
- Enlaces: Vías de uso exclusivo del sistema BRT de la red troncal MIO

5.2.2.2. Generación del grafo de la red BRT:

Para la construcción del grafo de la red troncal de transporte de la ciudad de Cali, se utilizó el Software Grafos v 1.3.5 de Alejandro Villalobos Figura 9; el cual permitió construir la red del sistema de transporte a parte de los nodos y enlaces.

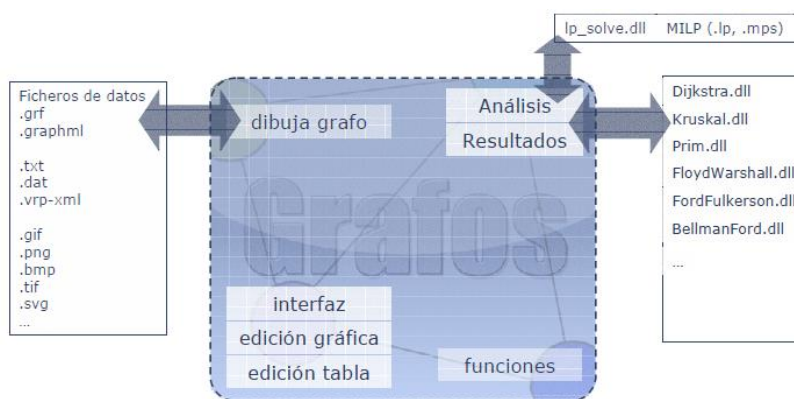


Figura 9 Esquema estructural y funcional
Fuente: Villalobos A, 2006

5.2.3.3. Identificación de índices a calcular:

Teniendo en cuenta el grafo generado y la información demográfica se calculan los diferentes índices:

- Accesibilidad: Numero Asociado (Ns), índice de Shimbel, Centralidad.
- Cobertura: Robustez de la red
- Conectividad: índice Beta, Índice Alfa. índice Gamma, Numero Ciclomático.

5.2.3. FASE 3. Construcción de la base de datos

5.2.3.1. Información espacial de la ciudad de Cali:

Para la construcción de la base de datos, se obtuvo los shp de la ciudad de Cali y el shp de los barrios de la ciudad de Cali.

5.2.3.2. Diseño de la base de datos: especificación:

La construcción del modelo se hizo con base a la metodología E-R (Entidad-Relación) el cual es el modelo conceptual más utilizado para el diseño conceptual de bases de datos, este considera la existencia de entidades y relaciones entre las entidades. Es una herramienta para el modelado de datos de un sistema de información. Estos modelos expresan entidades relevantes para un sistema de información, así como sus interrelaciones y propiedades. Dentro de las especificaciones se tienen el de la creación de una base de datos geoespaciales la cual es uno

de los principales objetivos, esta base de datos espacial se creó en el administrador de base de datos PGAdmin III y BD PostgreSQL con su extensión para datos espaciales Postgis y Routing. La creación de la base de datos espacial, alimentada con información espacial básica de la red troncal de la Ciudad de Cali, así como las estaciones, y la información básica de la ciudad de Cali.

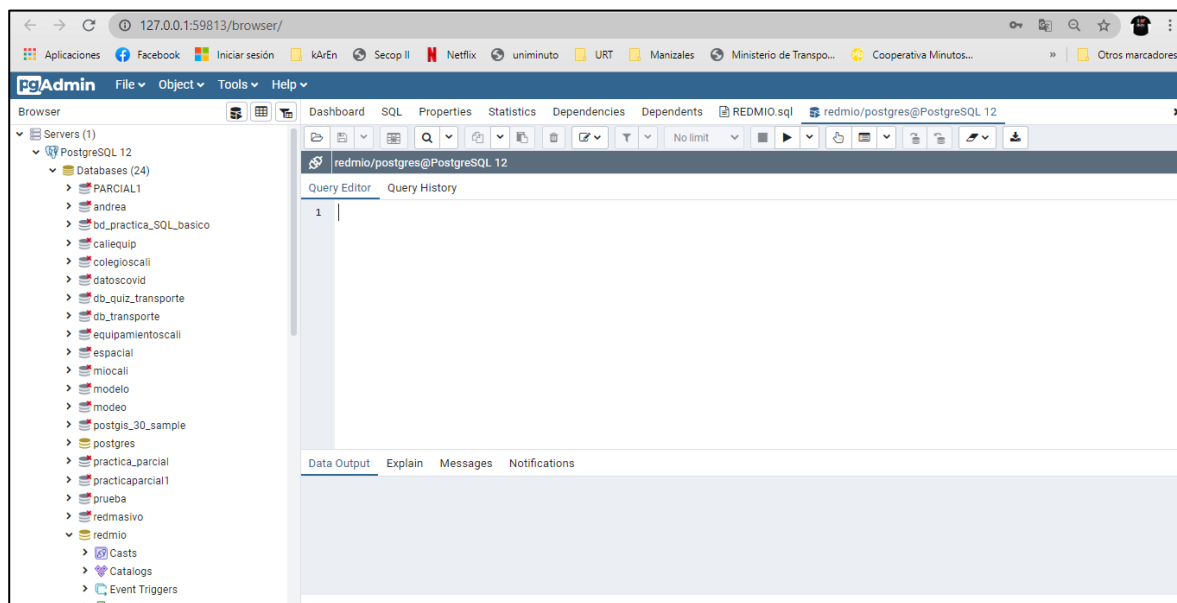


Figura 10. PgAdmin
Fuente: Elaboración propia

Se crea la conexión de QGIS con la base de datos “redmio” con el objetivo de visualizar y comprobar la información contenida y que se ingresó en la base de datos

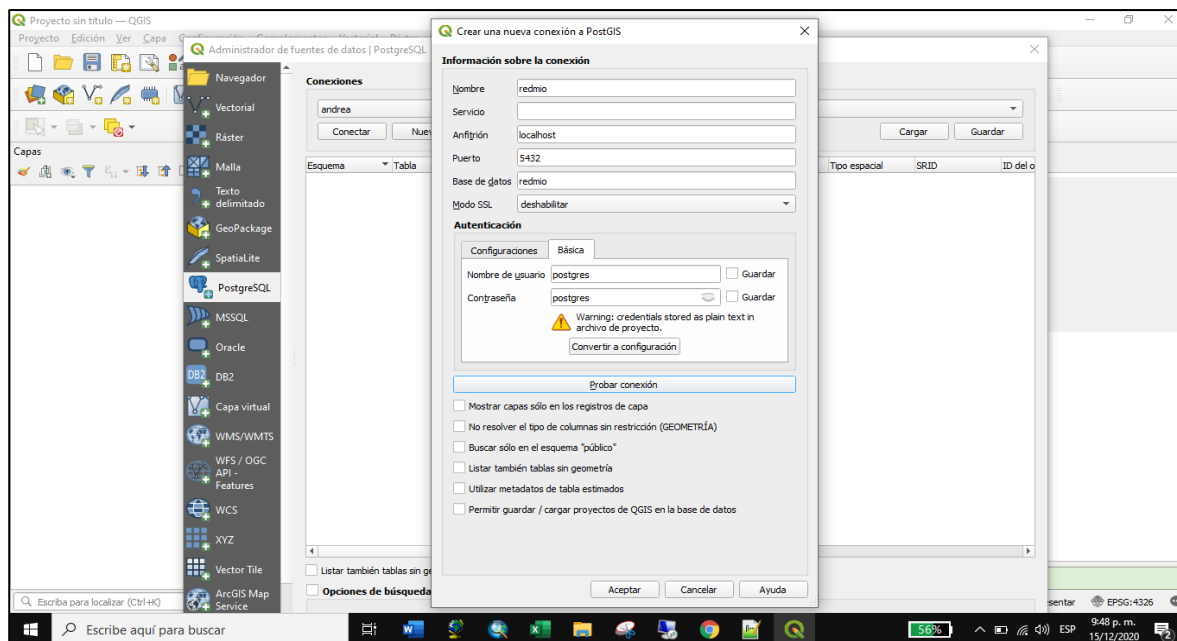


figura 11. Conexión de la base de datos “redmio” con QGIS
Fuente: Elaboración propia

Se inicio a enriquecer la base de datos con la creación de la topología de la red, usando el código:

```
SELECT pgr_createTopology('rutas', 0.001,'geom','id')
```

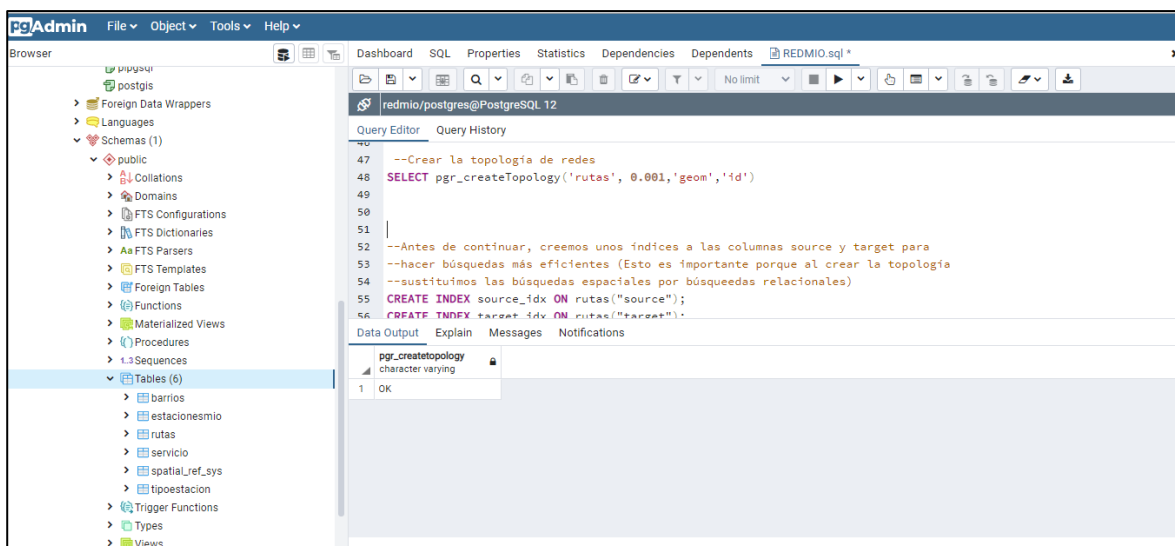


figura 12. Creación de la topología de la red
Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la conexión ya realizada de QGIS con la base de datos "redmio" se instaló la versión versión de Pgroutin en QGIS.

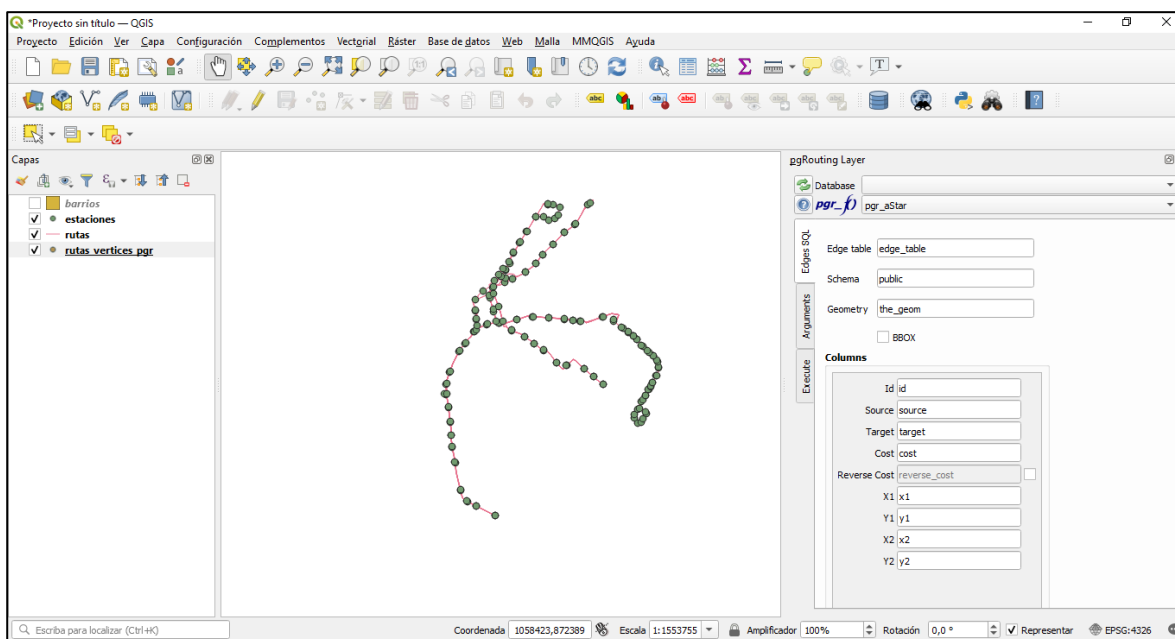
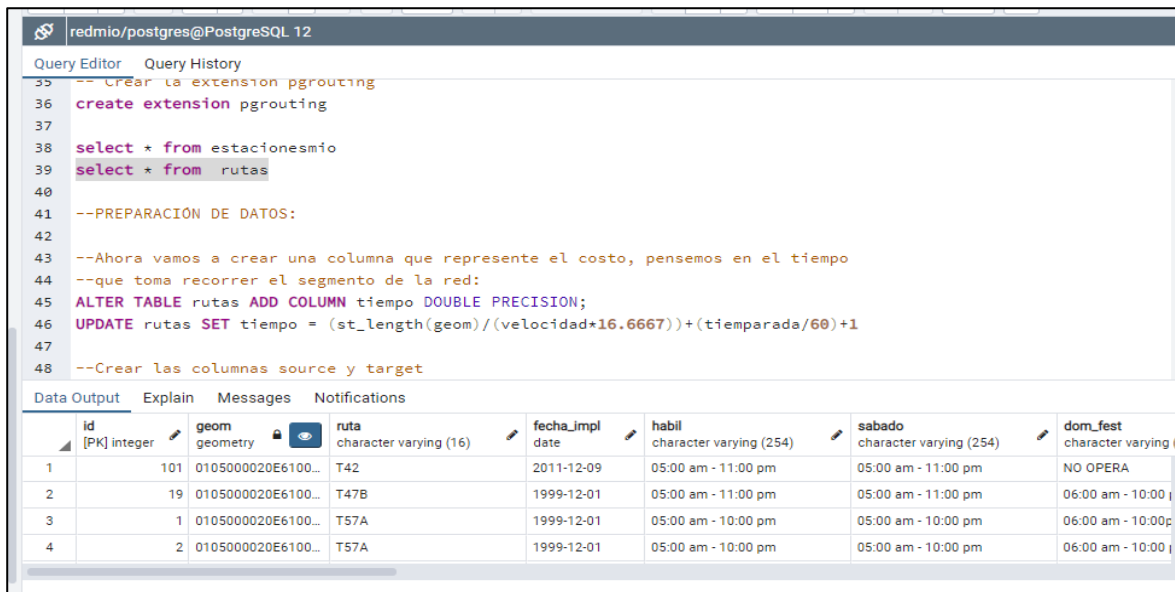


figura 13. Pgroutin en QGIS y visualización de la red
Fuente: Elaboración propia

Se crea una columna que represente el costo del viaje, pensado en el tiempo que toma recorrer el segmento de la red, usando el siguiente código:

```
ALTER TABLE rutas ADD COLUMN tiempo DOUBLE PRECISION;
UPDATE rutas SET tiempo = (st_lenght(geom) / (velocidad*16.6667))+(tiemparada/60)+1
```



The screenshot shows a PostgreSQL Query Editor window with the following SQL code:

```

35 -- Crear la extension pgrouting
36 create extension pgrouting
37
38 select * from estacionesmio
39 select * from rutas
40
41 --PREPARACION DE DATOS:
42
43 --Ahora vamos a crear una columna que represente el costo, pensemos en el tiempo
44 --que toma recorrer el segmento de la red:
45 ALTER TABLE rutas ADD COLUMN tiempo DOUBLE PRECISION;
46 UPDATE rutas SET tiempo = (st_length(geom)/(velocidad*16.6667))+(tiemparada/60)+1
47
48 --Crear las columnas source y target

```

Below the code, the 'Data Output' tab shows a table with the following columns and data:

id [PK] integer	geom geometry	ruta character varying (16)	fecha_impl date	habil character varying (254)	sabado character varying (254)	dom_fest character varying (254)
1	0105000020E6100...	T42	2011-12-09	05:00 am - 11:00 pm	05:00 am - 11:00 pm	NO OPERA
2	0105000020E6100...	T47B	1999-12-01	05:00 am - 11:00 pm	05:00 am - 11:00 pm	06:00 am - 10:00 pm
3	0105000020E6100...	T57A	1999-12-01	05:00 am - 10:00 pm	05:00 am - 10:00 pm	06:00 am - 10:00 pm
4	0105000020E6100...	T57A	1999-12-01	05:00 am - 10:00 pm	05:00 am - 10:00 pm	06:00 am - 10:00 pm

figura 14. Creación columna tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Basándose en la información de origen (Source) y de destino (Target) se reconstruyó la tabla de vértices, para lo cual se utilizó el siguiente código:

```
SELECT pgr_createVerticesTable('rutas', 'geom',
                               'source',text 'target',text 'true')
```

La función devuelve:

- OK después de que se ha construido la tabla de vértices.
- FAIL cuando la tabla de vértices no se construyó debido a un error

Para la reconstrucción de la tabla vértices la función acepta los siguientes parámetros:

edge_table: *text* La tabla de la red. (puede contener el nombre del esquema)

the_geom: *text* nombre de la columna de la geometría en la tabla de la red. El valor por defecto es the_geom

source: *id* Nombre de columna de origen de la tabla de red. El valor predeterminado es source.

target: *text* El nombre de la columna del nodo de llegada del segmento. El valor por defecto es target.

rows_where: *text* condición para seleccionar un subconjunto o filas. Valor predeterminado es true para indicar todas las filas.

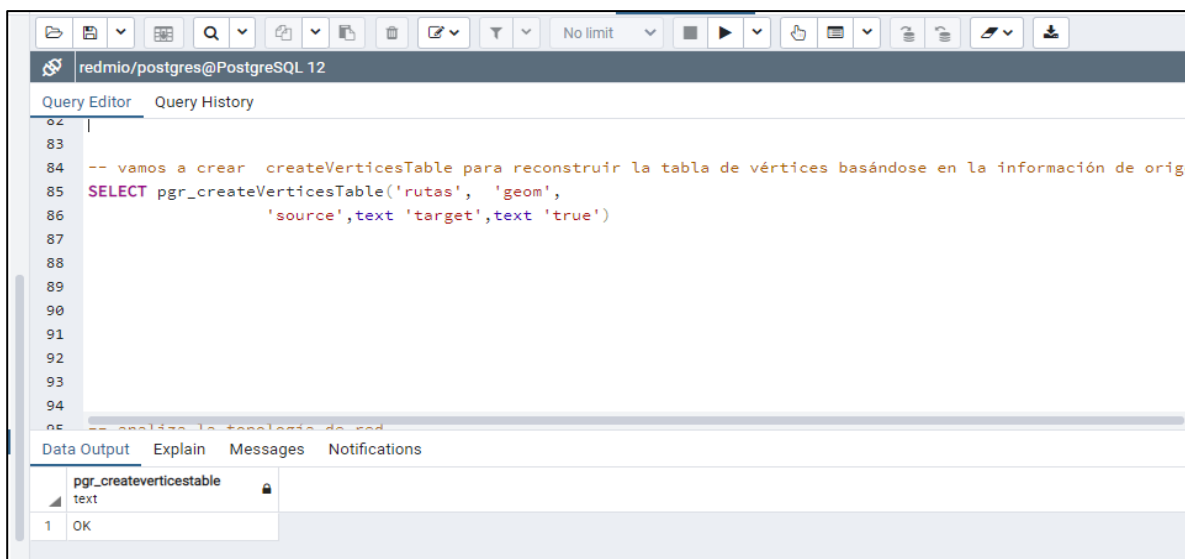


figura 15. Reconstrucción de la tabla Vértices.
Fuente: Elaboración propia

Para crear los nodos de cada línea, se creó la tabla `rutas_vertices_pgr`

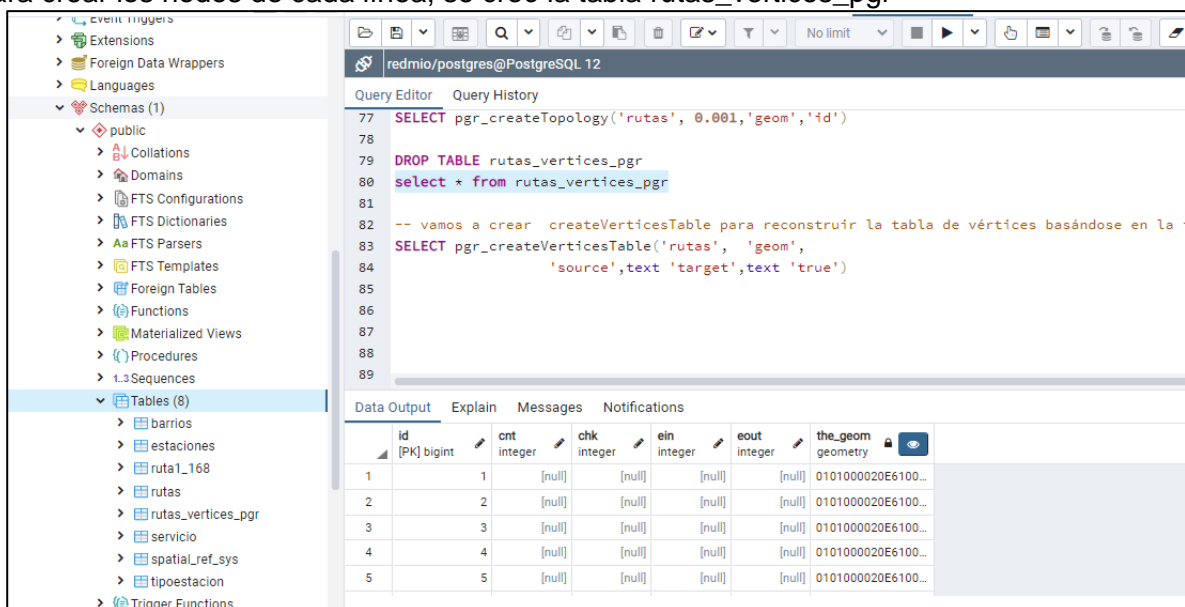


figura 16. Creación tabla `rutas_vertices_pgr`
Fuente: Elaboración propia

En la figura.14 se puede visualizar que la tabla de rutas se ha llenado la columna Source y target. Lo cual indica: Source es el nodo inicial, target es el nodo final de la línea

```

112
113 select * from rutas
114 select * from rutas_vertices_pgr
115
116 -- Esta sirvio... calcula la ruta desde el nodo 1 hasta el nodo 168, calcula el tiempo total y el numero de ruta

```

elocidad bigint	longitud double precision	tiemparada double precision	shape_leng double precision	origen_des character varying (50)	servicio bigint	tiempo double precision	source integer	target integer	
50	0.440541734097		40	440.541633726	ESTACION NUEVO LATIR - E...	2	2.19531556984061	9	10
50	0.413314925043		40	413.315001682	ESTACION UNIDAD DEPORT...	2	2.162643676730885	11	12
50	0.49778648406		40	497.786449998	ESTACION NUEVO LATIR - C...	2	2.2640092119797246	5	6
50	0.438116912294		40	438.116986662	ESTACION NUEVO LATIR - C...	2	2.192405999182995	13	14
50	0.377277758919		40	377.277845169	C&PPI - TERMINAL ANDRES	2	2.119399175403908	15	16

figura 17. Columna Source (Nodo inicial) y columna Target (Nodo final)
Fuente: Elaboración propia

La tabla rutas debe ser analizada verificando que contenga una columna de origen y una columna de destino llena con los identificadores de los vértices de los segmentos y los vértices correspondientes de la tabla rutas_vertices_pgr que almacena esta información de los vértices. Para lo cual se utiliza la función pgr_analyzeGraph que analiza la topología de red.

```

83 DROP TABLE rutas_vertices_pgr
84 select * from rutas_vertices_pgr
85
86 -- analiza la topología de red.
87 SELECT pgr_analyzeGraph('rutas', 0.0001,
88     'geom', text 'id',
89     text 'source', text 'target', text 'true')
90
91
92
93
94
95 -- vamos a crear despues de la topología de la red, pgr_analyzeOneWay

```

pgr_analyzegraph character varying
1 OK

figura 18. Análisis de la topología de la red de la tabla rutas
Fuente: Elaboración propia

La estructura de la tabla de los vértices es:

id: *bigint* identificador del vértice.

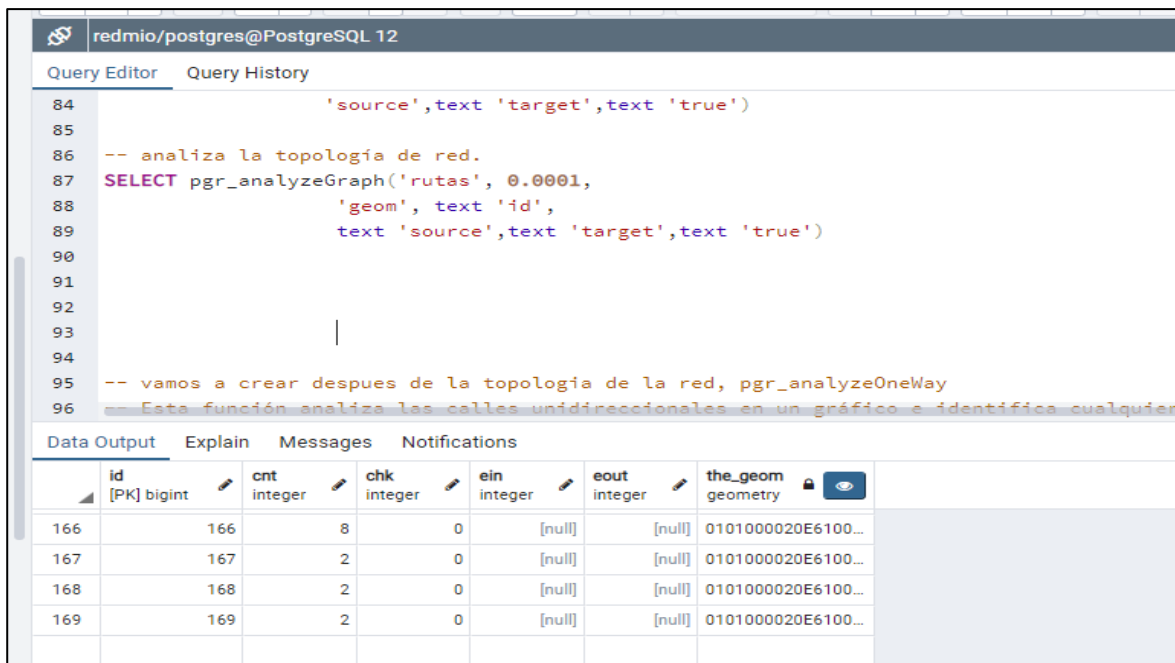
cnt: *integer* Número de vértices en edge_table que hacen referencia a este vértice.

chk: *integer* indicador que el vértice podría tener un problema.

ein: *integer* Número de vértices en edge_table que hacen referencia a este vértice como entrante.

eout: *integer* Número de vértices en edge_table que hacen referencia a este vértice como saliente.

the_geom: *geometry* Valor de la geometría POINT del vértice.



The screenshot shows a PostgreSQL Query Editor window with the following SQL code:

```

84         'source',text 'target',text 'true')
85
86 -- analiza la topología de red.
87 SELECT pgr_analyzeGraph('rutas', 0.0001,
88         'geom', text 'id',
89         text 'source',text 'target',text 'true')
90
91
92
93
94
95 -- vamos a crear despues de la topologia de la red, pgr_analyzeOneWay
96 Esta función analiza las calles unidireccionales en un gráfico e identifica cualquier

```

Below the query editor, the 'Data Output' tab is active, displaying a table with the following structure and data:

	id [PK] bigint	cnt integer	chk integer	ein integer	eout integer	the_geom geometry
166	166	8	0	[null]	[null]	0101000020E6100...
167	167	2	0	[null]	[null]	0101000020E6100...
168	168	2	0	[null]	[null]	0101000020E6100...
169	169	2	0	[null]	[null]	0101000020E6100...

figura 19. Estructura de la tabla Vértices
Fuente: Elaboración propia

Se utilizó la función `pgr_analyzeOneWay` para analizar las calles unidireccionales en un gráfico e identificar cualquier segmento invertido. El análisis de segmentos es bastante simple, pero a la vez debe ser una herramienta poderosa para identificar algunos problemas potenciales que son creados al establecer la dirección de un segmento de la manera equivocada. Un nodo es un *source* si tiene bordes que salen de ese nodo y no hay bordes que entren a ese nodo. Por el contrario, un nodo es un *sink* si todos los bordes entran al nodo, pero ninguno sale de ese nodo. Un nodo *source* es lógicamente imposible que exista porque ningún vehículo puede entrar al nodo. Asimismo, si tuvieras un nodo *sink* tienes un número infinito de vehículos que se van acumulando en este nodo porque no pueden salir de él.

Si la dirección de un borde se revirtió por error podríamos generar exactamente estas condiciones. Por ejemplo, pensar en una carretera dividida (doble vía) y en el carril que va al norte un segmento o varios segmentos fueron introducidos al revés, o tal vez esto sucedió en una glorieta. El resultado sería potencialmente un nodo *source* y/o a *sink* node.

Por lo tanto, contando el número de aristas entrantes y salientes de cada nodo podemos identificar los nodos *source* y *sink*, es posible verificar estas situaciones de la red para hacer los ajustes necesarios.

```

96 -- Esta función analiza las calles unidireccionales en un gráfico e identifica cualquier segmentos invertido.
97
98 SELECT pgr_analyzeoneway('rutas',
99 ARRAY['', 'B', 'TF'],
100 ARRAY['', 'B', 'FT'],
101 ARRAY['', 'B', 'FT'],
102 ARRAY['', 'B', 'TF'],|
103 oneway:='oneway');
104
105
106
107
108 -- verificar la version de pgrouting
109 select * from pg_available_extensions

```

Data Output Explain Messages Notifications

pgr_analyzeoneway	
text	
1	OK

figura 20. Función Análisis de Segmentos.

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros del análisis de segmento son los siguientes:

s_in_rules: *text* reglas de entrada del nodo inicial

s_out_rules: *text* reglas de salida del nodo inicial

t_in_rules: *text* reglas de entrada del nodo final

t_out_rules: *text* reglas de salida del nodo final

oneway: *text* El nombre de la columna del sentido. El valor por defecto es oneway.

source: *id* Nombre de columna de origen de la tabla de red. El valor predeterminado es source.

target: *text* El nombre de la columna del nodo de llegada del segmento. El valor por defecto es target.

```

86
87 DROP TABLE rutas_vertices_pgr
88 select * from rutas_vertices_pgr
89
90 -- analiza la topología de red.
91 SELECT pgr_analyzeGraph('rutas', 0.0001,
92 'geom', text 'id',
93 text 'source',text 'target',text 'true')
94
95 -- vamos a crear despues de la topología de la red, pgr_analyzeOneWay
96 -- Esta función analiza las calles unidireccionales en un gráfico e
97
98 SELECT pgr_analyzeoneway('rutas',
99 ARRAY['', 'B', 'TF'],

```

Data Output Explain Messages Notifications

	id [PK] bigint	cnt integer	chk integer	ein integer	eout integer	the_geom geometry
1		67	2	0	1	0101000020E6100...
2		68	2	0	1	0101000020E6100...
3		69	2	0	1	0101000020E6100...
4		70	2	0	1	0101000020E6100...
5		71	2	0	1	0101000020E6100...

figura 21. Tabla del Análisis de segmentos

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el procedimiento del análisis de segmentos, se procedió a chequear y eliminar los posibles errores ver (figura 22).

```

102 ARRAY[('', 'B', 'IF')],
103 oneway:='oneway');
104
105 select * from rutas_vertices_pgr where ein=0 or eout=0
106
107
108 -- verificar la version de pgrouting
109 select * from pg_available_extensions
110
111 -- borrar una columna de una tabla
112 alter table rutas drop column tiempo
113
114

```

	id [PK] bigint	cnt integer	chk integer	ein integer	eout integer	the_geom geometry
1	118	1	0	1	0	0101000020E6100...
2	117	1	0	0	1	0101000020E6100...
3	103	6	0	0	6	0101000020E6100...

figura 22. Resultado de los posibles errores
Fuente: Elaboración propia

Por último, se procedió a crear la columna *reverse_cost* en la tabla rutas

```

52 ALTER TABLE rutas ADD COLUMN target integer;
53
54 --Ahora vamos a agregar una columna con la longitud de cada segmento:
55 ALTER TABLE rutas ADD COLUMN length numeric;
56 UPDATE rutas SET length = st_length(geom)
57
58 ALTER TABLE rutas ADD COLUMN reverse_cost integer;
59
60 --Antes de continuar, creemos unos índices a las columnas source y target para
61 --hacer búsquedas más eficientes (Esto es importante porque al crear la topología
62 --sustituimos las búsquedas espaciales por búsquedas relacionales)
63 CREATE INDEX source_idx ON rutas("source");
64 CREATE INDEX target_idx ON rutas("target");
65

```

ALTER TABLE

Query returned successfully in 76 msec.

figura 23. Columna *reverse_cost*
Fuente: Elaboración propia

5.2.4. FASE 4. Diseño del modelo conceptual SIG Web

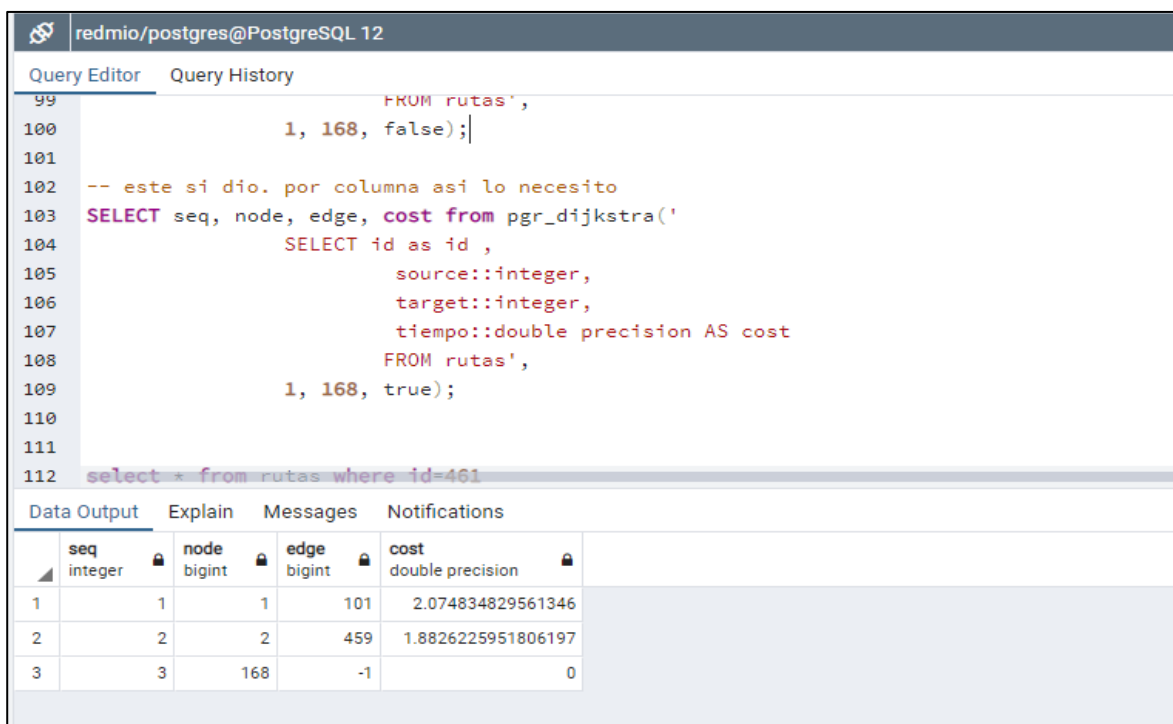
5.2.4.1. Análisis de la información e identificación de los atributos, entidades y conexiones:

Se analizó la información obtenida en el momento con el objetivo de identificar las entidades y sus atributos, generando las posibles conexiones a desarrollar; así mismo para evitar inconvenientes a la hora de hacer consultas y llamados SQL, se realizó la normalización a la BD espacial encaminados a eliminar redundancias e inconsistencias de dependencia en el diseño de las tablas.

5.2.4.2. Consultas especiales (códigos):

Se realizaron diferentes consultas en la base de datos generada, hasta obtener las consultas necesarias y requeridas para el desarrollo del proyecto; así mismo se realizó la prueba de los distintos códigos en el Software ArcGis, garantizando que estos están correctos y que con ellos se obtiene lo requerido.

En la figura 24 se tiene la ruta desde el nodo 1 al 168, la primera columna *seq* es la secuencia; es el conteo de nodos que debe pasar para llegar al final. Columna dos *node* es el nodo por el que está pasando, Columna tres *Edge* es la línea por donde pasa, en este caso es el id de la ruta, la cuarta Columna *cost* es el costo de recorrido, en este caso es el tiempo en minutos. El cual ya fue definido previamente para cada línea



```

99          FROM rutas',
100          1, 168, false);|
101
102 -- este si dio. por columna asi lo necesito
103 SELECT seq, node, edge, cost from pgr_dijkstra('
104     SELECT id as id ,
105           source::integer,
106           target::integer,
107           tiempo::double precision AS cost
108     FROM rutas',
109     1, 168, true);
110
111
112 select * from rutas where id=461
  
```

seq	node	edge	cost
integer	bigint	bigint	double precision
1	1	101	2.074834829561346
2	2	459	1.8826225951806197
3	168	-1	0

figura 24. Ruta desde el nodo 1 al nodo 168
Fuente: Elaboración propia

Se visualiza en la figura 25 y figura 26 con más atributos para identificar la ruta de transporte MIO que se debe tomar, que para ir del nodo 1 al nodo 168 se debe tomar la ruta T42, figura el horario y la ruta de origen destino.

redmio/postgres@PostgreSQL 12

Query Editor Query History

```

139 |
140 | -- este si dio. por columna asi lo necesito. vamos a ver si salen las rutas del mio y otros atributos de la tabla de rutas
141 | SELECT seq, node, edge, cost as tiempo_recorrido_minutos, r.ruta, r.habil as horario, r.origen_des as origen_destino
142 | from rutas as r, pgr_dijkstra('
143 |     SELECT id as id ,
144 |           source::integer,
145 |           target::integer,
146 |           tiempo::double precision AS cost
147 |     FROM rutas',
148 |           1, 168, true) as recorrido
149 | where r.id=recorrido.edge
150 | ;
151 |

```

Data Output Explain Messages Notifications

seq	node	edge	tiempo_recorrido_minutos	ruta	horario	origen_destino
integer	bigint	bigint	double precision	character varying (16)	character varying (254)	character varying (50)
1	1	101	2.074834829561346	T42	05:00 am - 11:00 pm	PIZAMOS - CENTRO - TERMI...
2	2	459	1.8826225951806197	T42	05:00 am - 11:00 pm	PIZAMOS - CENTRO - TERMI...

figura 25. Ruta optima del nodo 1 al nodo 168
Fuente: Elaboración propia

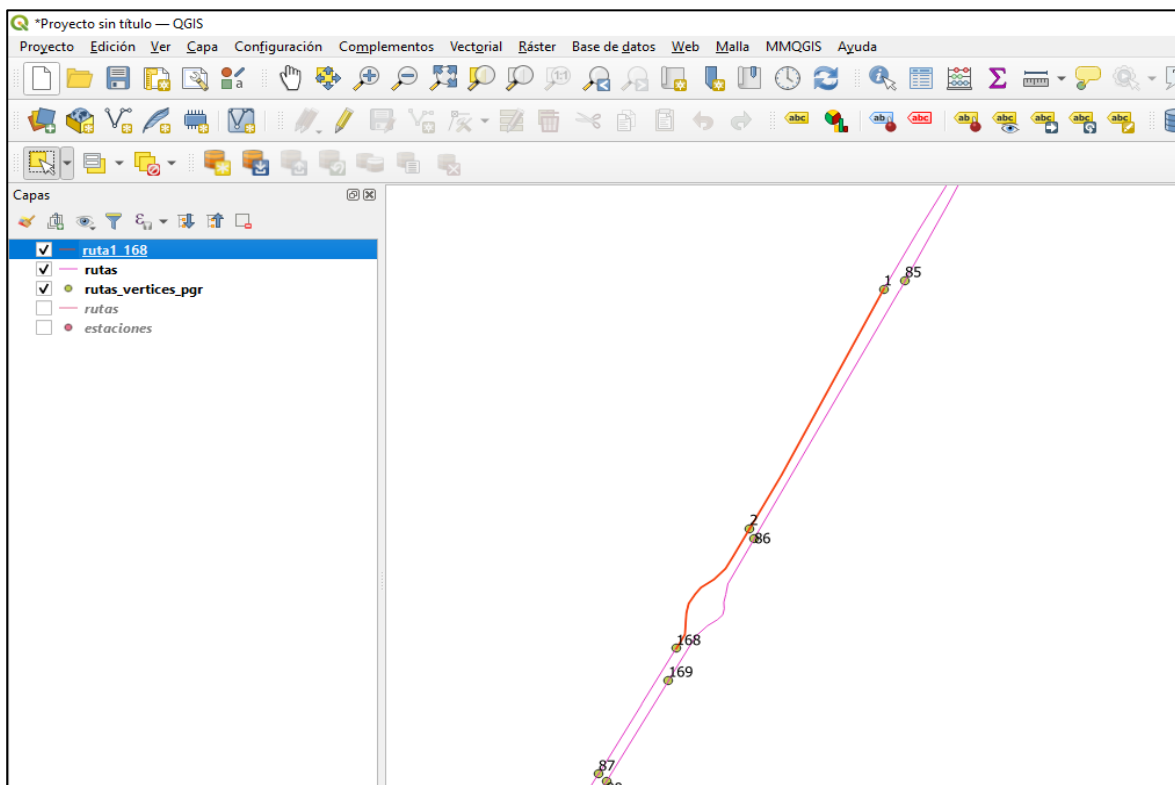


figura 26. Visualización en QGIS de la ruta optima del nodo 1 al nodo 168
Fuente: Elaboración propia

5.2.4.3. Identificación de los módulos del SIG Web:

Se identificaron los siguientes cuatro (4) módulos del sistema:

Módulo de acceso (Interfaz): Es en este módulo donde el usuario entra en contacto por primera vez con la aplicación. La interfaz está compuesta por la plataforma entendible y accesible al cliente, es aquí donde se definen las consultas del usuario, en este caso la solitud de la información y las soluciones o respuestas que el aplicativo arrojará de forma espacial y/o alfanumérica dentro de los límites establecidos por el sistema.

Módulo de solitud de la información: En este módulo el usuario define la(s) consultas a realizar en el aplicativo y desplegar la información en la interfaz, a través de un procesamiento de petición al sistema para posteriormente generar el resultado.

Módulo de Validación de la información: Es este módulo uno de los más importantes del sistema, pues es aquí donde el aplicativo analiza la consulta para su procesamiento, el sistema verificará internamente si la información querida por el usuario tiene las características adecuadas que requiere el sistema.

Módulo de procesamiento de la información: en este módulo el sistema mediante algoritmos, programación y modelos transformará y convertirá la información en el producto final, una salida gráfica del mapa de interés del usuario.

5.2.5. FASE 5. Diseño de la arquitectura del SIG Web

5.2.5.1. Implementación del SIG Web:

En esta etapa se presenta el proceso de desarrollo en las siguientes etapas para materializar la aplicación:

- Instalación y configuración del servidor web y del servidor de mapas.
- Implementación de la aplicación: Consultas
- Diseño de la interfaz gráfica de usuario en PHP y HTML
- Diseño de la estética de la aplicación

Carga de la información: Como servidor de mapas para la aplicación se ha seleccionado el Software MapServer, para servir los datos espaciales y construir aplicaciones Web Mapping (MS4W), es un software desarrollo Open Source Initiative, para la creación de aplicaciones SIG en Internet/Intranet con el fin de visualizar, consultar y analizar información geográfica a través de la red mediante la tecnología Internet MapServer (IMS)

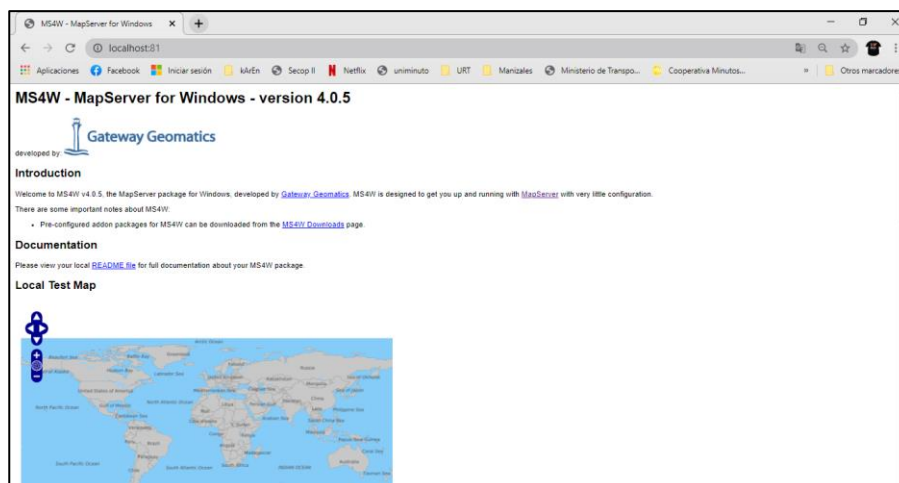


Figura 27. ms4w - Mapserver Versión 4.0.5

5.2.5.2. Interfaz de usuario:

Como entorno sobre el que desarrollar los clientes web de acceso a la información espacial, se ha escogido leaflet, basado en PHP y JavaScript, al disponer de bastantes utilidades ya desarrolladas y un rendimiento más que aceptable para el propósito del proyecto.

Leaflet es una librería JavaScript open-source para crear mapas interactivos en un entorno móvil.



Figura 28 Librería Leaflet

5.2.5.3. Pruebas de aplicación:

En esta etapa se realizaron pruebas a cada uno de los módulos del sistema, sus funciones y limitaciones, se evaluó también el sistema en varios servidores web como Mozilla Firefox, Internet Explorer y Google chrome para definir incompatibilidades y errores de código de fuente, así como la accesibilidad de los usuarios a la aplicación. Dentro de las pruebas a la aplicación están las de verificación de la interacción de las herramientas con el mapa, es decir el dinamismo del usuario con la información vectorial.

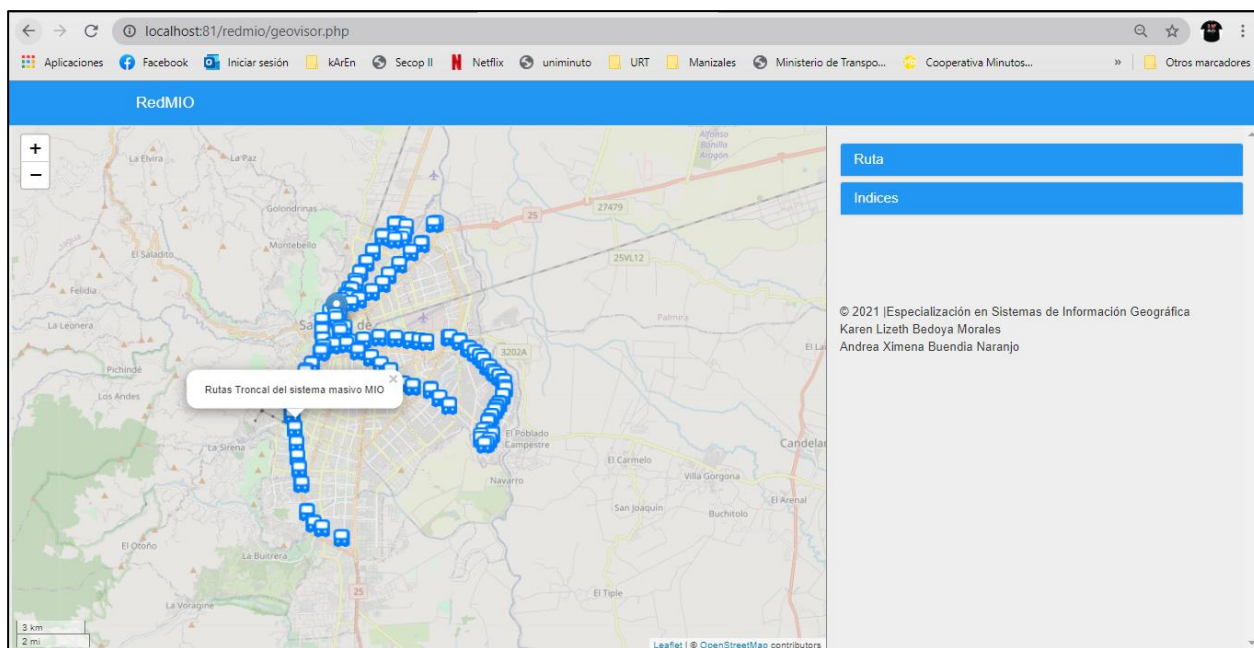


figura 29. Vista general del SIG WEB
Fuente: Elaboración propia

Se realizó prueba de verificación de la interacción de las herramientas, es decir el dinamismo del usuario con la información a consultar

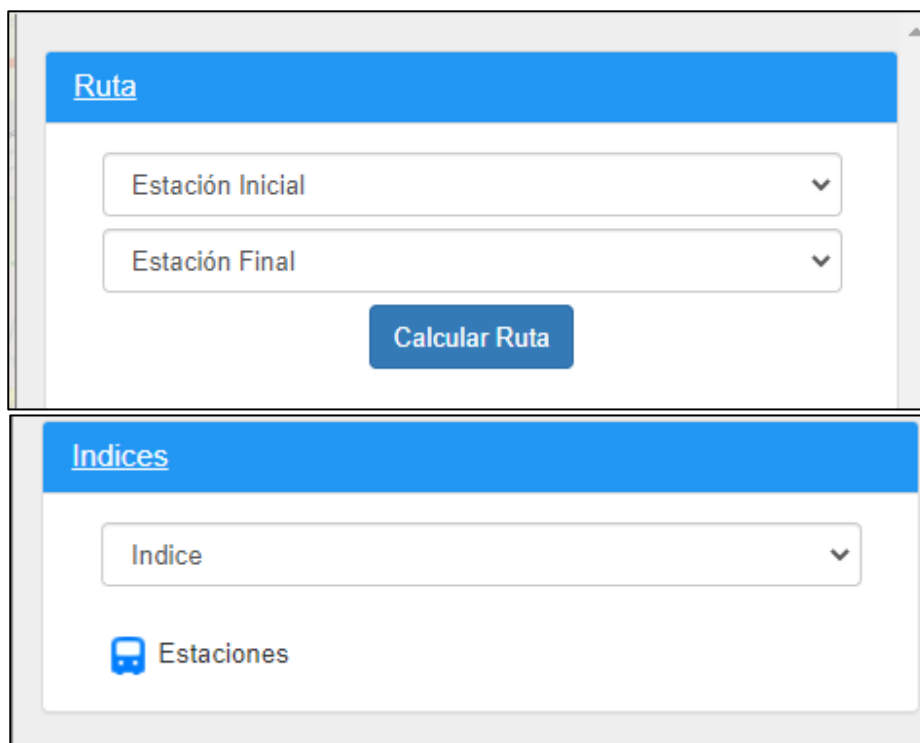


figura 30. Interfaz de consulta del SIG WEB
Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS

Como resultado del desarrollo del SIG web, se obtuvo una herramienta de cartografía vía web que permite al usuario final hacer visualización de información geográfica relacionada a la accesibilidad de la red de transporte urbano masivo MIO en la ciudad de Cali.

Para la presentación final de la información, se generó un archivo código HTML bajo la estética de las librerías leaflet en el servidor de Mapas MapServer y el repositorio en PostgreSQL con extensión espacial Postgis, con lo que se logró un buen despliegue y funcionamiento de la información.

6.1. Caracterización espacial del BRT en la ciudad de Cali

Se obtuvo el reconocimiento de las estaciones existentes en la red, para lo cual se tomó lo construido y en funcionamiento de la red troncal hasta el año 2019; generando la información de las vías de uso exclusivo de la red troncal del Masivo MIO y las estaciones de la zona urbana del municipio de Cali en formato vectorial.

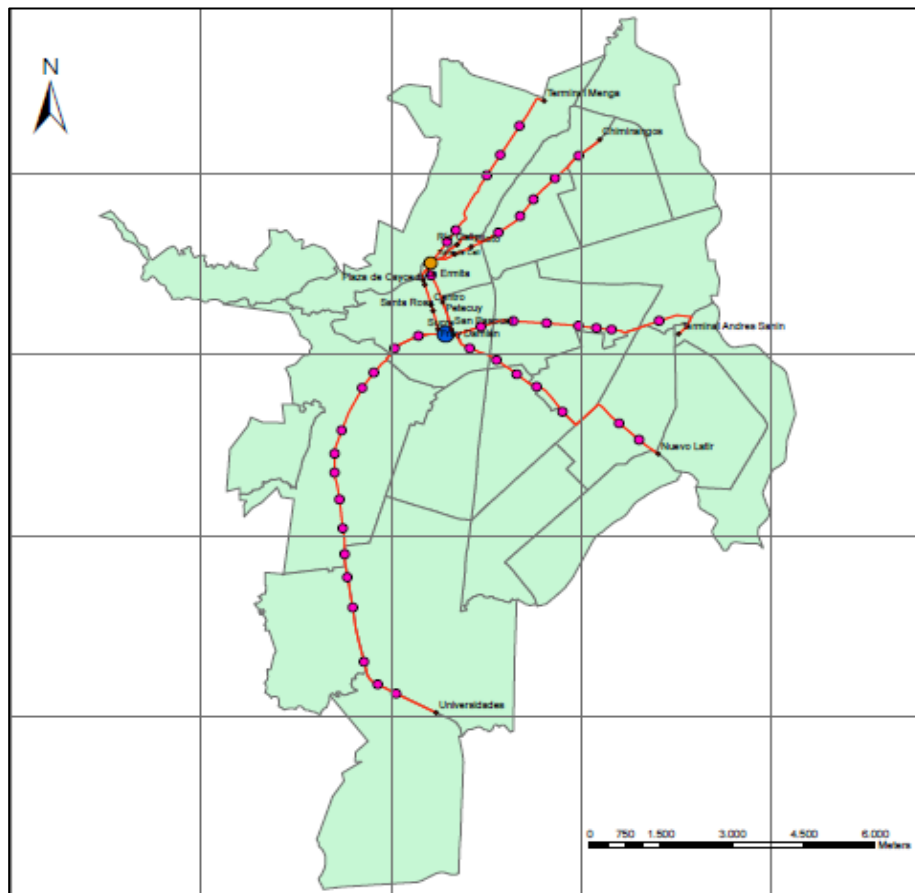


figura 31. Caracterización espacial del sistema BRT de la ciudad de Cali
Fuente: Propia

6.2. Propiedades topológicas de la red del sistema BRT con la aplicación de grafos

De acuerdo con la identificación de las variables trabajadas, se generó el grafo de la red troncal de la ciudad de Cali con sus 57 estaciones con el software Grafos. *Figura. 30*

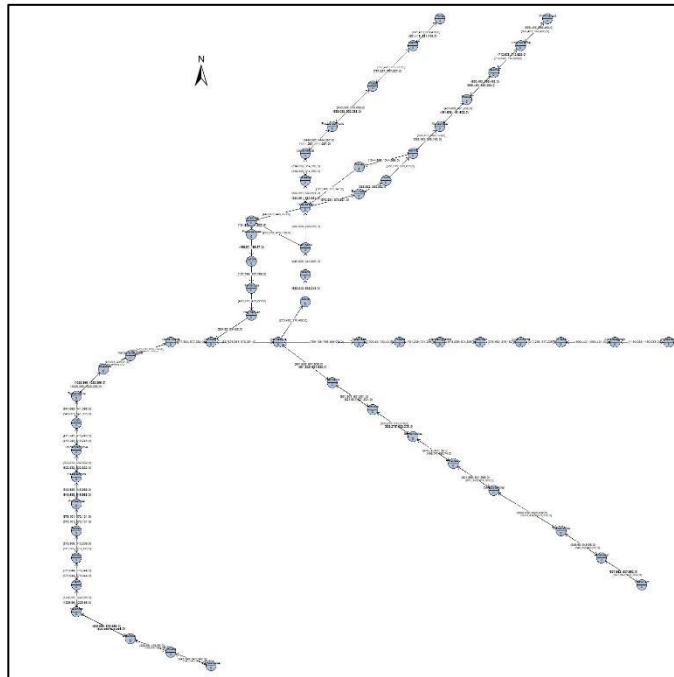


figura 32. Grafo de la red troncal del sistema de transporte masivo MIO.
Fuente: Propia

Se obtienen los resultados de los diferentes índices:

6.2.1. Accesibilidad

6.2.1.1. Numero Asociados (Ns):

Las estaciones de Universidades y Chiminangos tiene el $N_s=28$ es el mayor de toda la red, ya que dichas estaciones se encuentran en el extremo más lejano de la ciudad, son dos de las 5 estaciones terminales. La estación de Universidades se encuentra hacia el sur, y Chiminangos hacia el norte de la ciudad. Implica que desde dichas estaciones se hace el máximo recorrido dentro de la red a la estación más lejana. Siguiendo con un $N_s= 27$ las estaciones de Menga (terminal), Univalle y Flora Industrial se encuentran seguidas de las estaciones terminales. *Tabla 3. Matriz de accesibilidad topológica* El N_s mínimo es 14 corresponde a la estación de Santa Librada. Lo que implica que desde esta estación se presenta el mínimo recorrido sobre las vías a la estación más lejana teniendo en cuenta la menor distancia. Santa Librada es una de las estaciones que se encuentra en la parte central de toda la red del sistema. Siguiéndole las estaciones San Bosco y Manzana del saber con un $N_s=15$ y las estaciones Fray Damián, San Pascual y Estadio con un $N_s=16$.

6.2.1.2. Índice de Shimbel:

Partiendo desde La estación de Universidades el índice de shimbel tiene un valor de 1009 *Tabla 3. Matriz de accesibilidad topológica* representando el nodo menos accesible de toda la red ya

que necesita recorrer el máximo número de enlaces para llegar a la estación más lejana. Lo que se pudo notar con el valor del Ns donde la estación presenta un valor de 28 siendo el máximo de toda la red. A pesar de que la estación Universidades es una de las de menor accesibilidad, es de las más importantes, no solo por ser la única estación terminal en el sur de la ciudad, sino también porque se presenta una gran demanda por parte de los usuarios para desplazarse a otras zonas y además hacia ese sector se encuentran la mayoría de las universidades de la ciudad.

Tabla 3. Matriz de accesibilidad topológica

ACCESIBILIDAD TOPOLOGICA ESTACIONES DEL MIO (CALI)	INDICADORES		
	NS	Shimbel	Centralidad
Origen\Destino			
Menga	27	810	14.464
Alamos	26	755	13.482
Vipasa	25	702	12.536
Prados del Norte	24	651	11.625
Las americas	23	602	10.750
Versalles	22	555	9.911
Torre de cali	21	510	9.107
San pedro	21	516	9.214
Petecuy	22	563	10.054
Sucre	23	610	10.893
La ermita	20	629	11.232
Plaza cayzedo	19	582	10.393
Centro	17	534	9.536
Santa rosa	17	488	8.714
Fray damian	16	441	7.875
San pascual	16	369	6.589
San bosco	15	394	7.036
Santa librada	14	421	7.518
Manzana del saber	15	450	8.036
Estadio	16	481	8.589
Tequendama	17	514	9.179
Lido	18	549	9.804
Unidad deportiva	19	576	10.286
Plaza de toros	20	625	11.161
Pampalinda	21	666	11.893
Refugio	22	709	12.661
Caldas	23	754	13.464
Capri	24	801	14.304
Melendez	25	850	15.179
Buitrera	26	901	16.089
Univalle	27	954	17.036
Universidades	28	1009	18.018
San nicolas	25	693	12.375
Rio cali	22	562	10.036
Piloto	24	641	11.446
Fatima	23	589	10.518
Manzanares	24	636	11.357
Popular	25	685	12.232
Salomia	26	736	13.143
Flora industrial	27	789	14.089
Chiminangos	28	844	15.071
Belalcazar	17	410	7.321
Floresta	18	453	8.089
Atanasio girardot	19	498	8.893
Chapinero	20	545	9.732
Villa colombia	21	594	10.607
El trebol	22	645	11.518
Siete de agosto	23	698	12.464
Andres sanin	24	753	13.446
Cien palos	17	410	7.321
Primitivo	18	453	8.089
Santa monica	19	498	8.893
Villanueva	20	545	9.732
Conquistadores	21	594	10.607
Troncal unida	22	645	11.518
Amanecer	23	698	12.464
Nuevo latir	24	753	13.446

Fuente: Elaboración propia

6.2.1.3. Centralidad:

Se obtiene que la estación Universidades tiene el valor más grande de centralidad 18,01 siguiéndole la estación Univalle con 17,035; estas dos estaciones son las más alejadas de la red. *Tabla 3. Matriz de accesibilidad topológica*, las dos estaciones se encuentran en el lado sur de la ciudad.

El mínimo valor correspondió a la estación San Pascual con 6,589 lo que es equivalente a decir que ésta es la estación espacialmente más central de toda la red. Las demás estaciones que se encuentran a su alrededor como: San Bosco, Santa librada, Manzana del Saber, Belalcázar, Floresta, Fray Damián, Cien Palos, Primitivo las cuales también se encuentran en la parte más central lo cual corresponde con los resultados de los demás índices demostrando que estas estaciones son las de mayor accesibilidad y distribución de viajes dentro de la red.

Anexo 4. matriz de cálculo de la accesibilidad topológica

6.2.2. Cobertura

6.2.2.1. Índice de Robustez:

Para este indicador se tuvo:

$$r = \frac{3}{57} = 0.0526$$

La robustez de la red es muy pequeña pues este valor tiende a ser nulo, ya que para la cantidad de estaciones que maneja se presentan pocos ciclos, haciendo que en el momento que se presente alguna falla en uno de sus nodos la red quede desconectada

6.2.3. Conectividad

6.2.3.1. Índice Beta:

$$\beta = \frac{59}{57} = 1.035$$

La red tiene un total de 59 vías y 57 estaciones. Obteniéndose un $\beta = 1,035$ lo que indica que es una red mínimamente conectada pero los enlaces forman al menos un ciclo. Este valor recae dentro del umbral de ser una red mínimamente compleja, lo que quiere decir que existen nodos conectados.

6.2.3.2. Índice Gamma:

$$\gamma = \frac{59}{3 * (57 - 2)} = 0.35757$$

El índice dio como resultado 0,35757 siendo un 35.76%. El valor indicado es el porcentaje de enlaces (vías) que se encuentran funcionando actualmente dentro de la red.

Al evaluar el porcentaje activo en la actualidad, se tiene que el cálculo del índice gamma el denominador es el valor que define la presencia y ausencia de vías funcionando. Teniéndose en este cálculo:

$$3n - 2 = 3 * (57 - 2) = 165$$

Para que la red funcione en su totalidad se necesita 165 enlaces o vías funcionando dentro de ella. Actualmente contiene solo 59 necesitándose integrar aproximadamente 106 vías que corresponde a un 64.24% en la red para obtener una mejor comunicación entre las estaciones.

Tabla 4. Matriz de conectividad

MATRIZ DE CONECTIVIDAD		MATRIZ DE CONECTIVIDAD	
ESTACIONES	Número de conexiones	ESTACIONES	Número de conexiones
San pascual	4	Belalcazar	2
Torre de Cali	3	Floresta	2
Alamos	2	Atanasio girardot	2
Vipasa	2	Chapinero	2
Prados del Norte	2	Villa colombia	2
Las americas	2	El trebol	2
Versalles	2	Siete de agosto	2
San pedro	2	Cien palos	2
San bosco	2	Primitivo	2
Santa librada	2	Santa monica	2
Manzana del saber	2	Villanueva	2
Estadio	2	Conquistadores	2
Tequendama	2	Troncal unida	2
Lido	2	Amanecer	2
Unidad deportiva	2	Menga	1
Plaza de toros	2	Petecuy	1
Pampalinda	2	Sucre	1
Refugio	2	La ermita	1
Caldas	2	Plaza cayzedo	1
Capri	2	Centro	1
Melendez	2	Santa rosa	1
Buitrera	2	Fray damian	1
Univalle	2	Universidades	1
Fatima	2	San nicolas	1
Manzanares	2	Rio cali	1
Popular	2	Piloto	1
Salomia	2	Chiminangos	1
Flora industrial	2	Andres sanin	1
		Nuevo latir	1

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Cálculo de la Matriz de conectividad de la red troncal

6.2.3.4. Numero Ciclomático:

$$59 - (57 - 1) = 3$$

A partir de este indicador se tiene que la red presenta 3 circuitos. Cálculo utilizado para el indicador de la robustez.

6.3. Construcción de una base de datos geográfica que almacene la información vectorial y alfanumérica

De acuerdo con la información vectorial obtenida de la ciudad de Cali, y a los resultados de los indicadores de accesibilidad, conectividad y cobertura se creó la base de datos denominada *redmio* con información inicial de las Rutas, Barrios, Estaciones. Se realizó la normalización con el objetivo de organizar y depurar la base de datos; así mismo se incluye dentro de la base de datos los índices calculados.

La generación de la base fue una fase exitosa dada que se contó con la información depurada, estructurada y sólida que se almacena en un buen gestor de bases de datos como lo es PostgreSQL con su extensión geográfica Postgis.

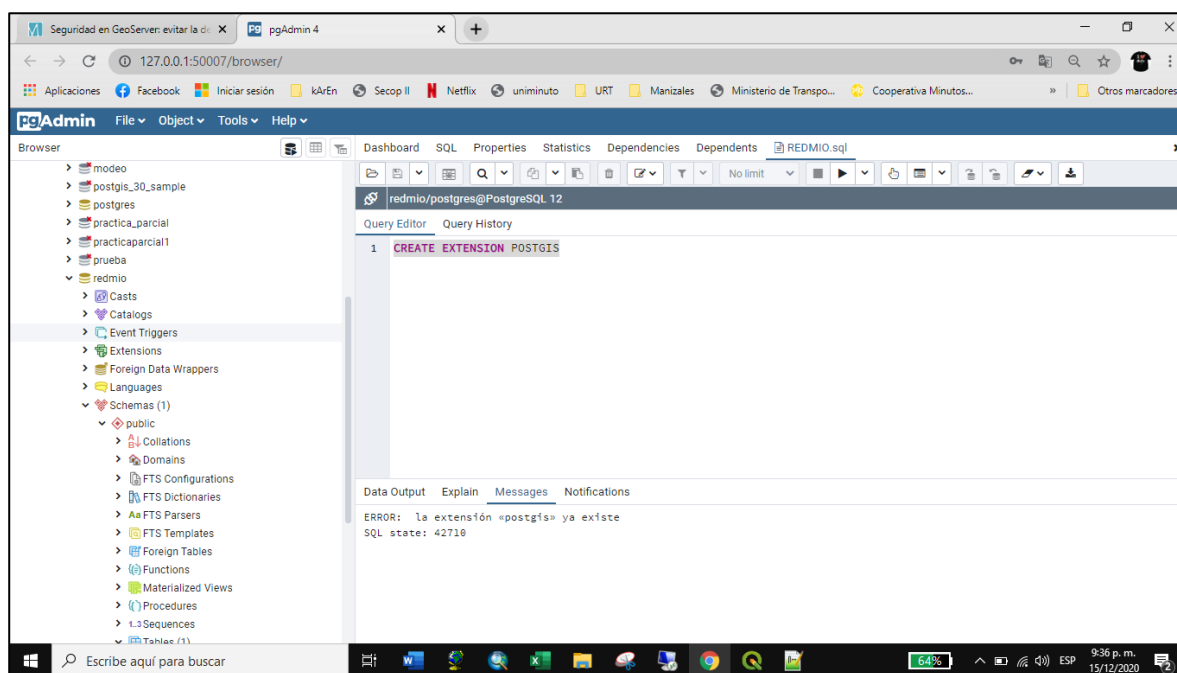


figura 33. Base de datos
Fuente: Propia.2020

Se crea la topología de la red mediante el código `SELECT pgr_createTopology('rutas', 0.001, 'geom', 'id')` y adicional se construyen las diferentes consultas en lenguaje SQL a utilizar (*Anexo No. 6 Consultas SQL*), tanto en las diferentes pruebas realizadas a la base de datos, como las consultas para el desarrollo del SIG Web.

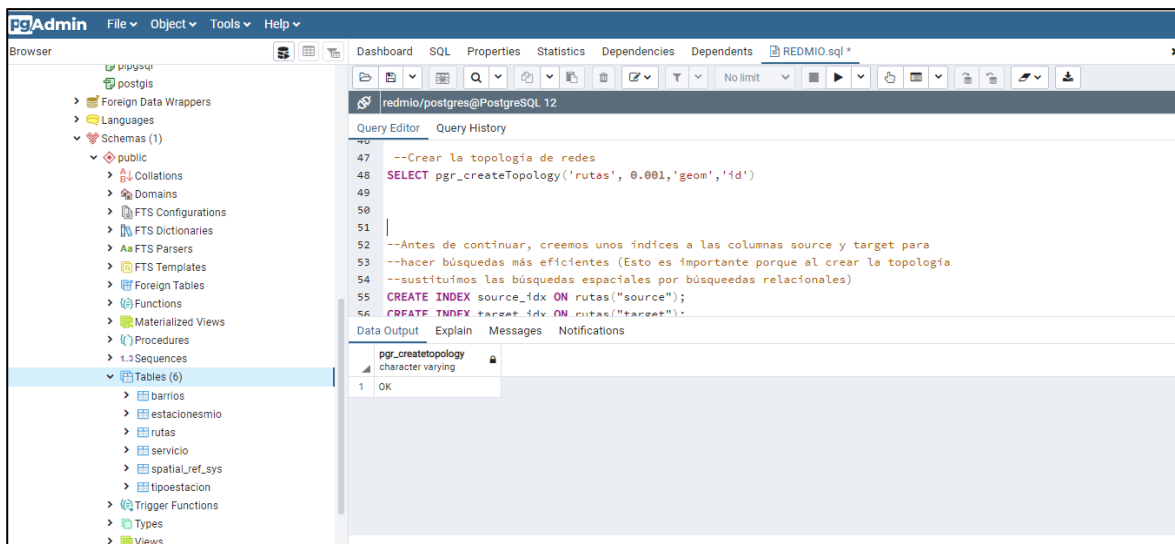


figura 34. Creación de la Topología de la Red
Fuente: Propia.2020

Adicional se efectuó la verificación de las consultas en el Software ArcGis, demostrando que los códigos corren correctamente.

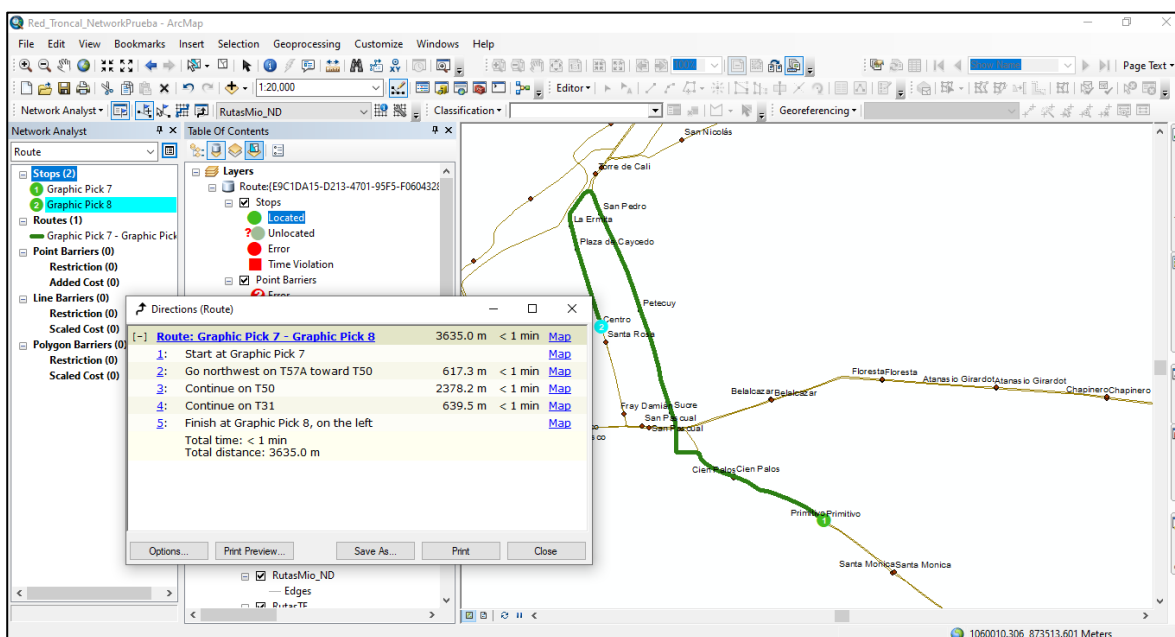


figura 35. Ruta sobre la red troncal del transporte masivo MIO
Fuente: Propia.2020

Se puede apreciar en la *Figura 35* que, seleccionando un origen y un destino dentro de la red, es posible obtener la ruta que realice el recorrido óptimo.

Se realizaron ensayos colocando obstáculos en la red, para que pueda darle otro recorrido al usuario *Figura 36*

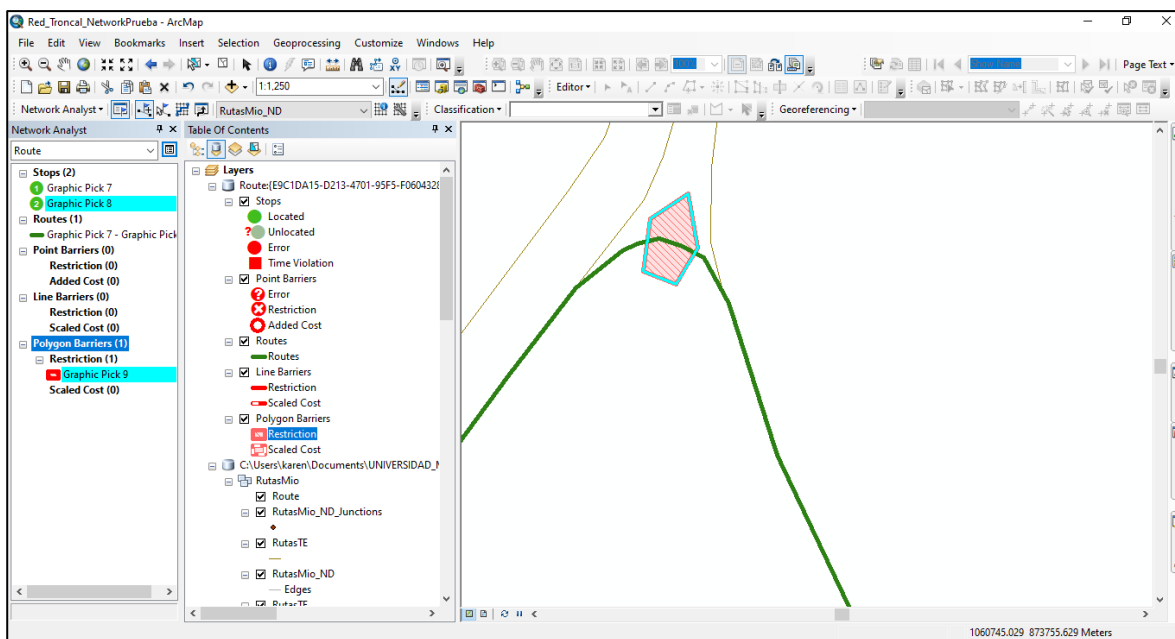


figura 36. Obstáculo en la red
Fuente: Propia.2020

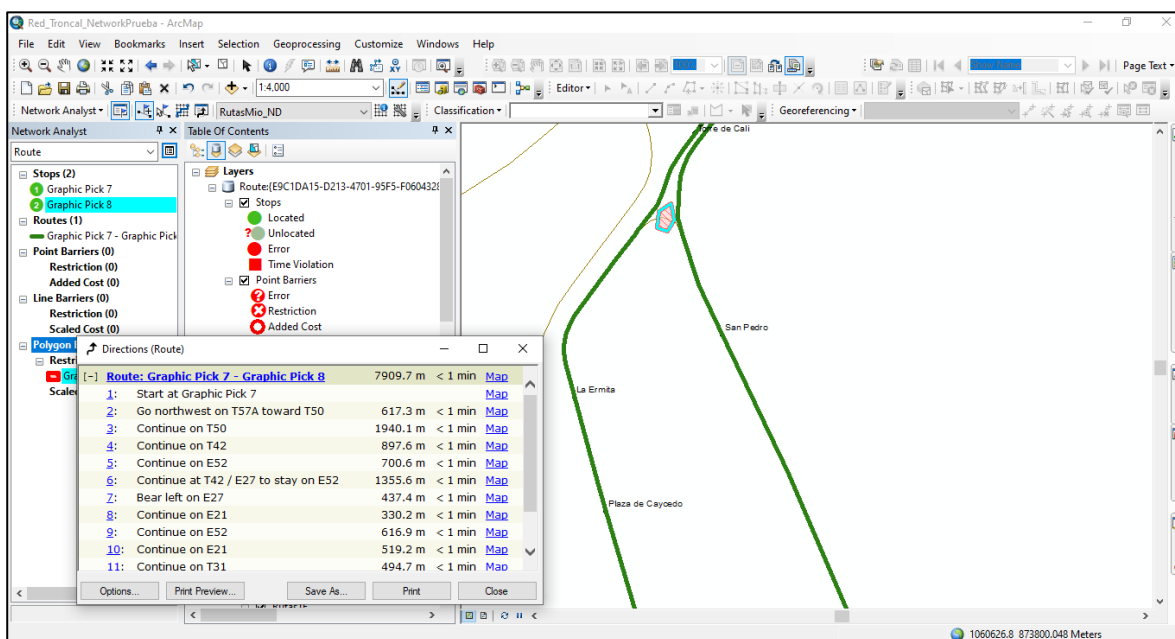


figura 37. Ruta opcional debido al obstáculo
Fuente: Propia.2020

Es posible apreciar que se genera un recorrido alternativo en caso de presentarse un evento que obstruya el recorrido dentro de la red, teniendo como condición que esta cuenta con caminos alternos. Por eso se utiliza el número ciclomatico, para evidenciar las diferentes opciones de recorridos para una red de transporte.

6.4. Diseño del modelo conceptual del SIG web

Se creo el modelo de entidad relación con la información tipo shp y tablas resultantes de los análisis y cálculos de los diferentes indicadores.

Se realizo la instalación del Software de mapas MapServer así como de la librería leaflet

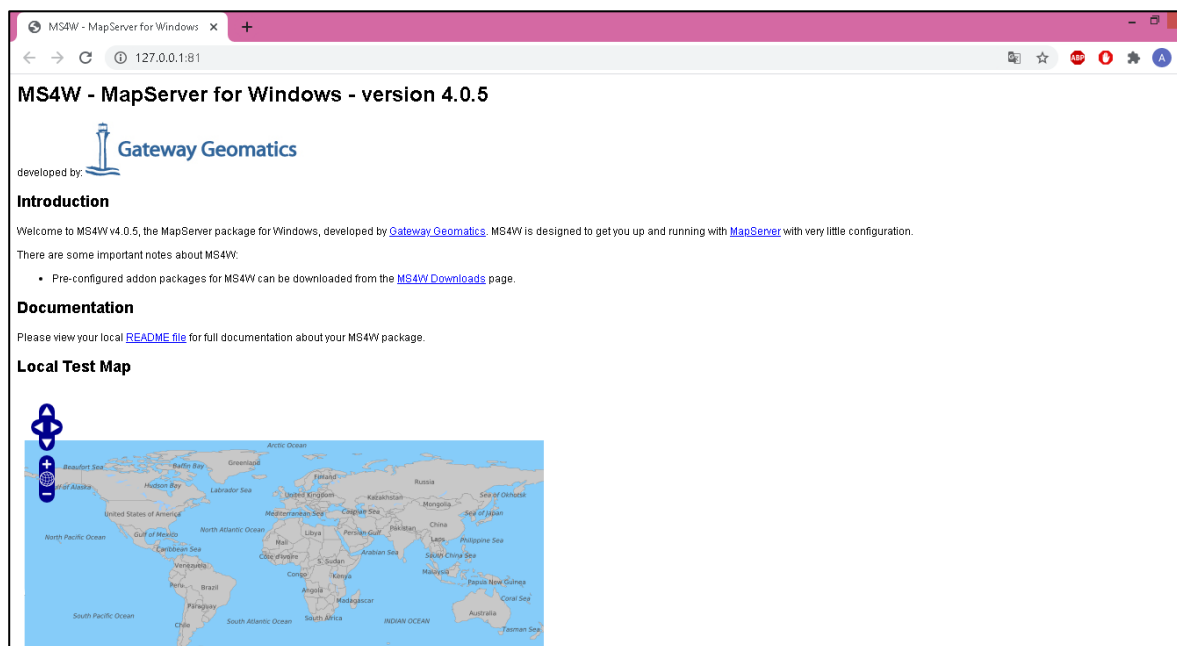


figura 38. MapServer
Fuente: Propia. 2020

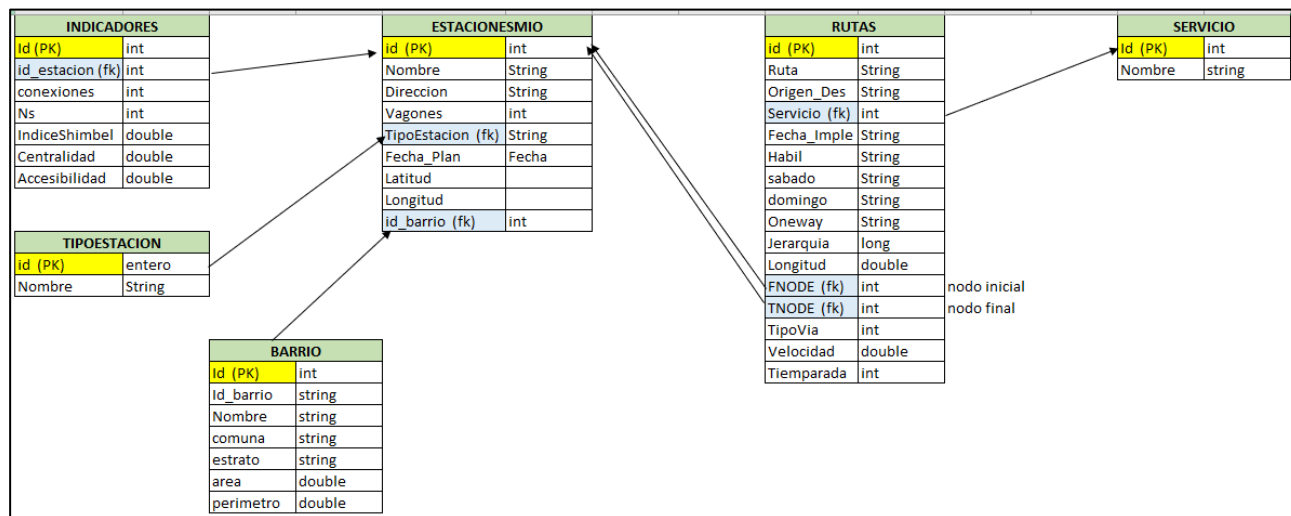


figura 39. Modelo relacional de la Base de datos.
Fuente: Propia.2020

6.5. Diseño de la arquitectura del SIG web acorde con los requerimientos para el despliegue y representación de la aplicación

Implementación del SIG web con la interfaz del usuario, adicional se realizan pruebas a la aplicación a través de consultas espaciales y alfanuméricas; y se evaluó también el sistema en varios servidores web como Mozilla Firefox, Internet Explorer y Google chrome para definir incompatibilidades y errores de código de fuente, así como la accesibilidad de los usuarios a la aplicación.

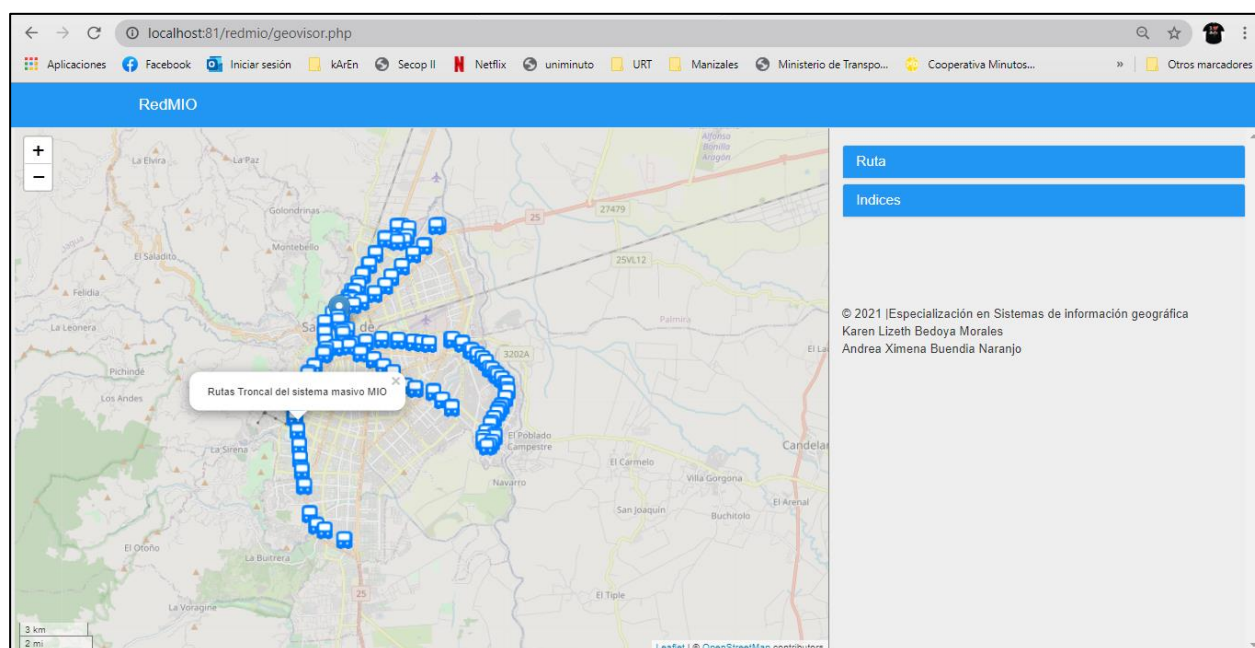


figura 40. Interfaz de Usuario
Fuente: Propia. 2020



figura 41 Zoom de la interfaz
Fuente: Propia. 2020

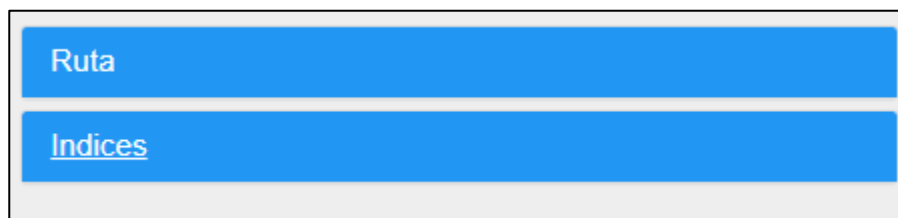


figura 42 Selección para despliegue consultas
Fuente: Propia. 2020

figura 43 Selección de estación inicial y estación final para el cálculo de ruta óptima
Fuente: Propia. 2020

figura 44 Selección de los índices de accesibilidad
Fuente: Propia. 2020

Para el cálculo de la ruta óptima de estación a estación, se tienen dos opciones de selección. Directamente en la estación o seleccionando en el panel derecho. Figura 45 y 46

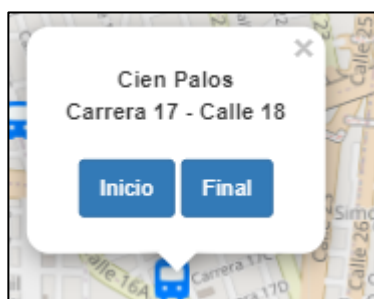


figura 45 Selección de la estación desde el visor
Fuente: Propia. 2020

Es posible apreciar, que cuando se selecciona directamente desde el visor, automáticamente en el panel se visualizan las estaciones. Figura 46 y 47

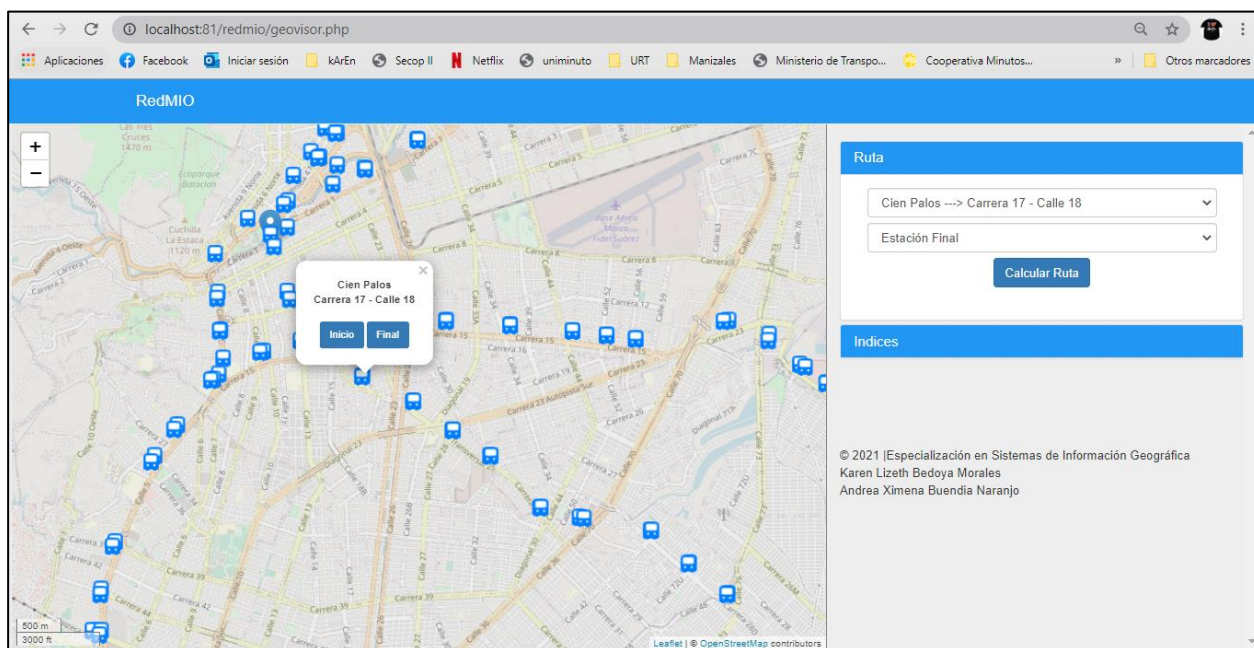


figura 46 Selección de estación inicial desde el visor para el cálculo de ruta
Fuente: Propia. 2020

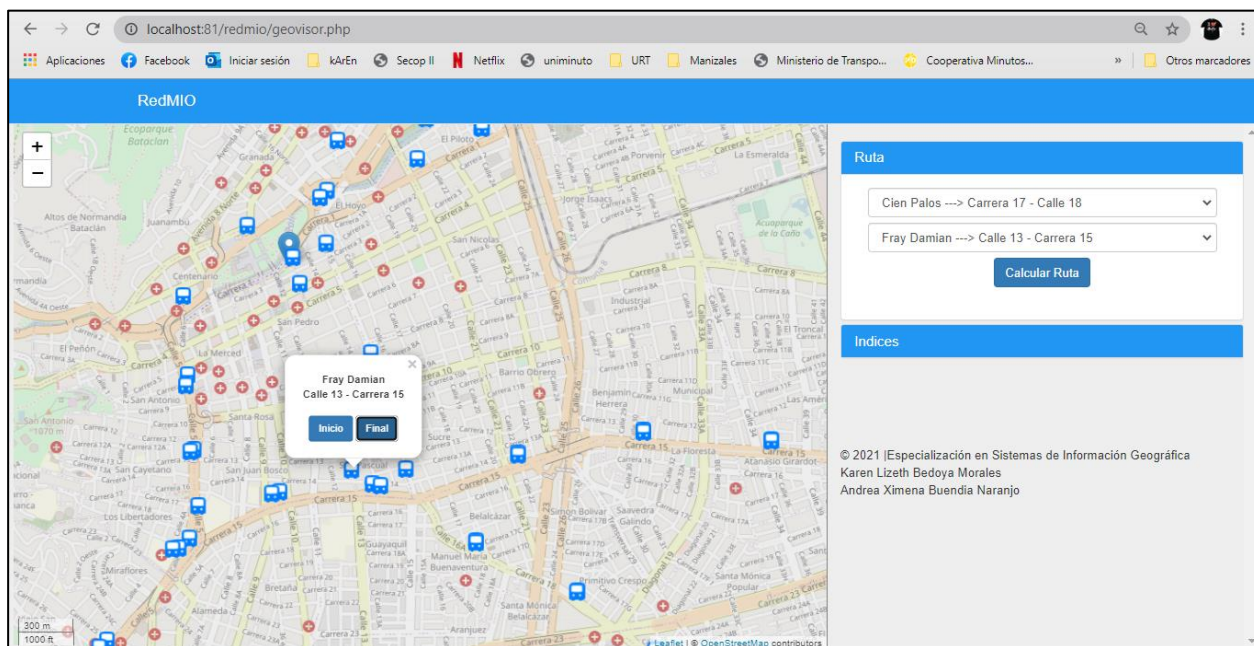


figura 47 Selección del nodo final para el cálculo de ruta
Fuente: Propia. 2020

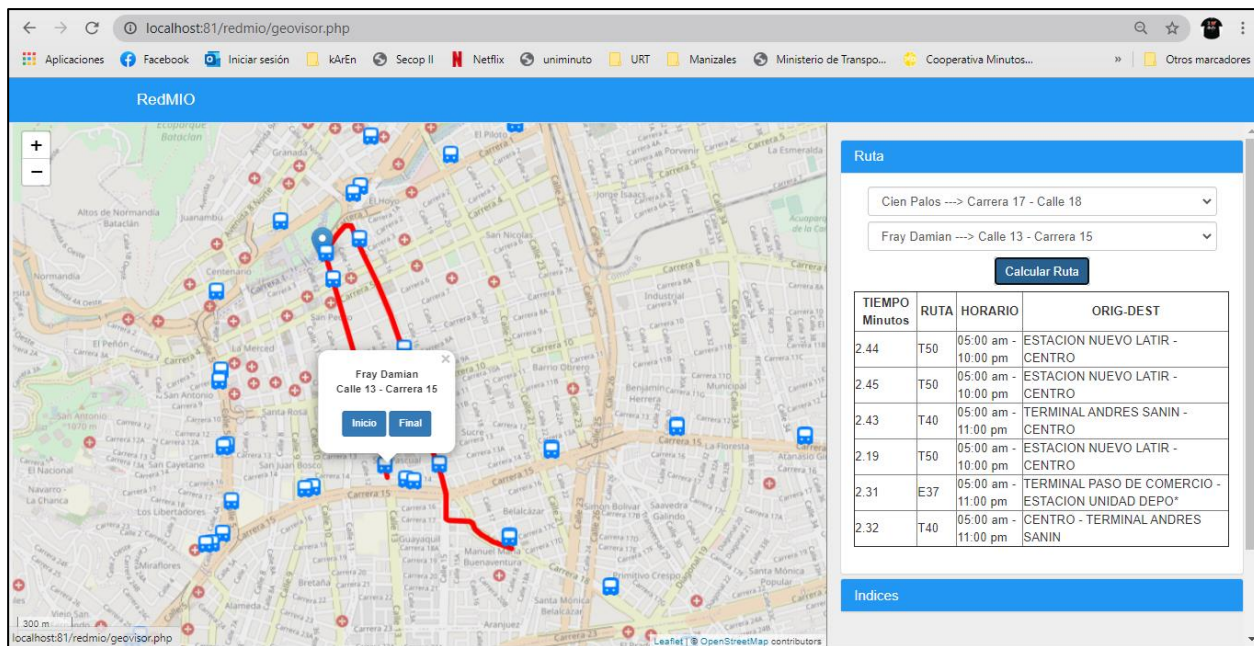


figura 48 Cálculo de ruta óptima
Fuente: Propia. 2020

En la figura 48, es posible apreciar el cálculo de la ruta optima de una estación a otra. La línea roja demarca el camino que debe tomar el bus del sistema masivo MIO para llegar hacia la estación destino. Se tomó como nodo inicial la estación de cien palos y nodo final la estación de Fray Damián. La ruta es tomada sobre toda la calle 15, para luego tomar la calle 13 y llegar a la estación. Se detalla la vuelta que debe dar la ruta ya que es el sentido que se le ha definido previamente a la red. Además, se están tomando las rutas de servicio que actualmente están en funcionamiento. En el panel derecho, se visualizan las posibles rutas a tomar, justo con el tiempo recorrido en minutos, el horario disponible que trabaja la ruta y el origen destino que trabaja el servicio de la ruta.

La otra opción que tiene el usuario es definir las estaciones de inicio y final directamente desde el panel de consulta que se encuentra ubicado hacia la derecha figura 49.

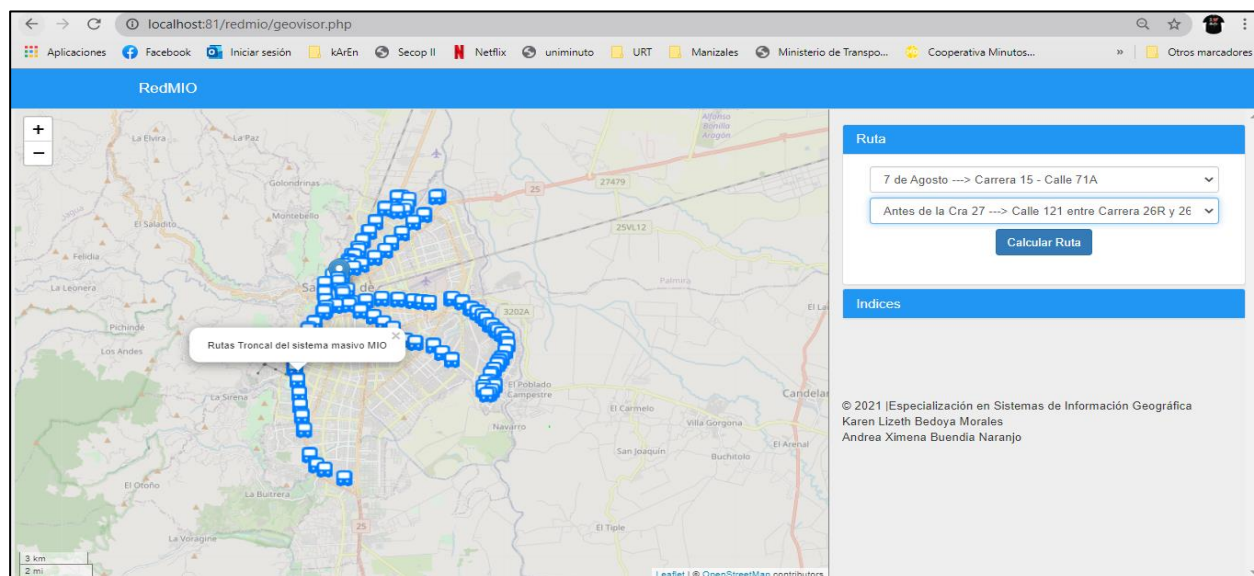


figura 49 Selección de estación inicial y final desde el panel
Fuente: Propia. 2020

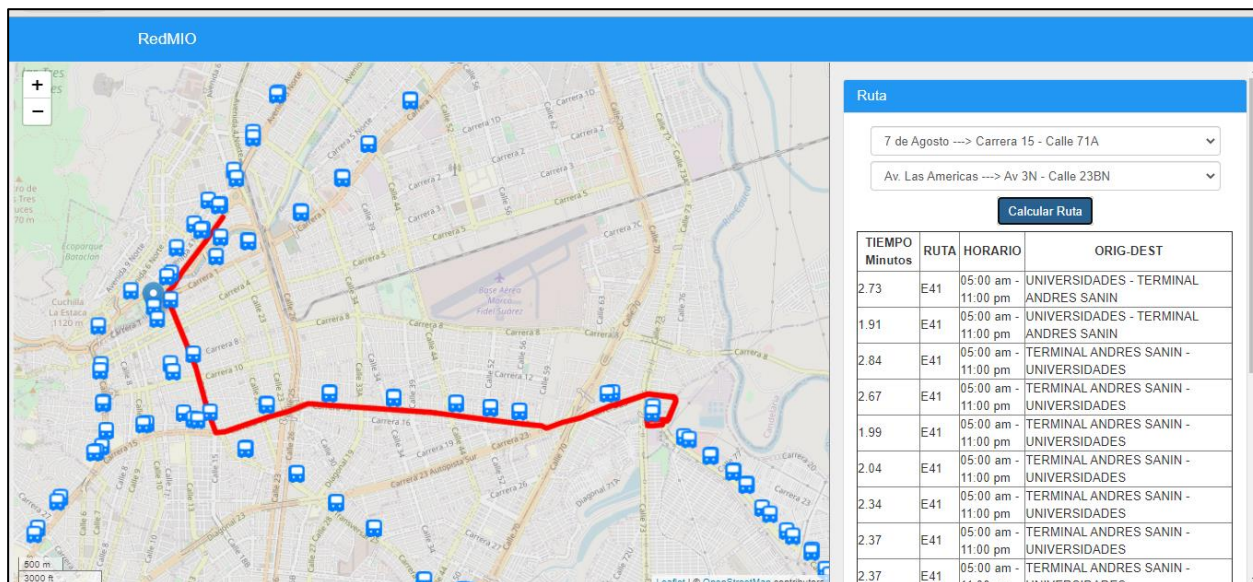


figura 50 Cálculo de ruta
Fuente: Propia. 2020

En el panel derecho, también es posible visualizar los diferentes índices de accesibilidad calculados previamente a partir de la información de cada una de las estaciones de la red

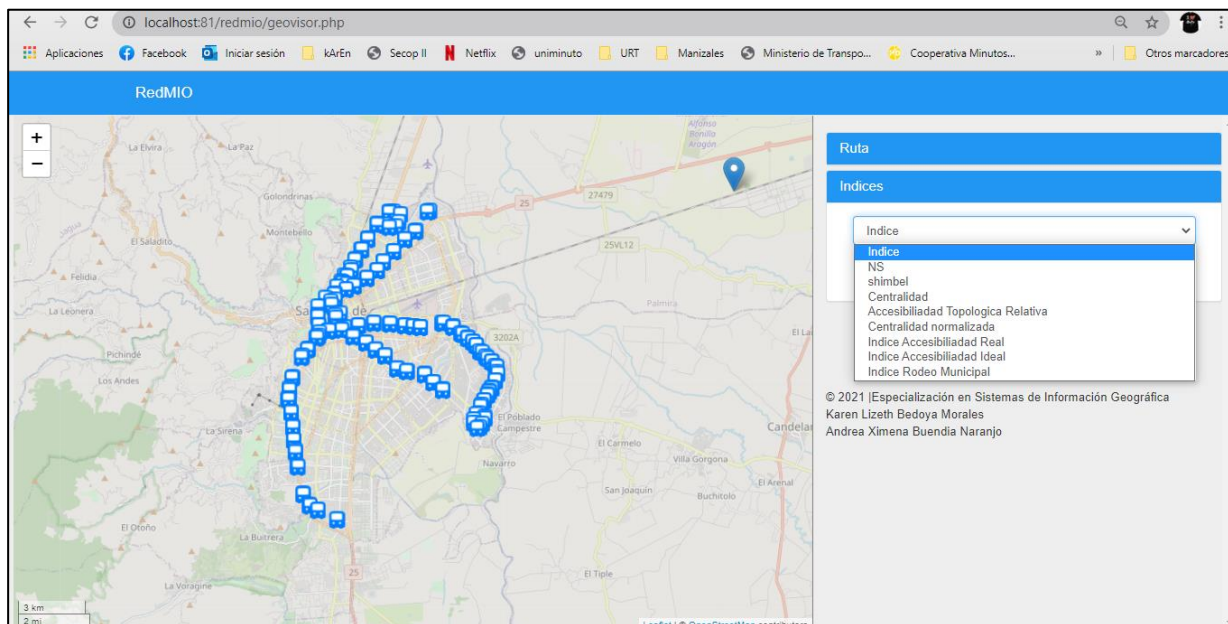


figura 51 Selección de índices de accesibilidad desde el panel
Fuente: Propia. 2020

Es posible visualizar cada uno de los índices.

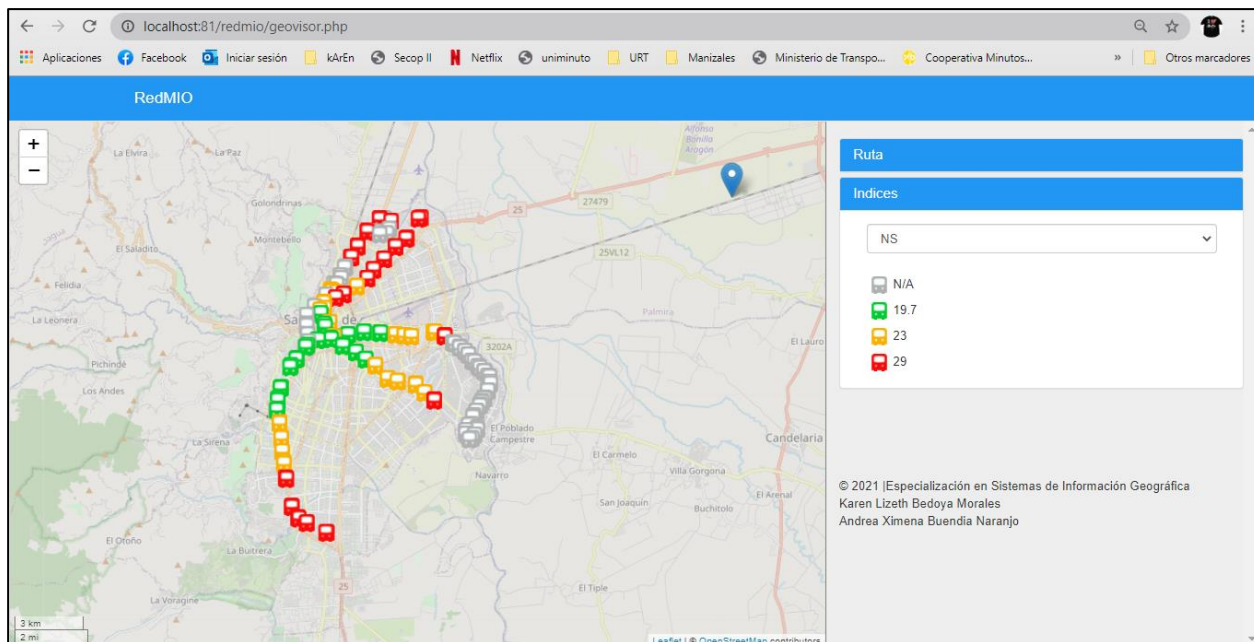


figura 52 Índice Ns
Fuente: Propia. 2020

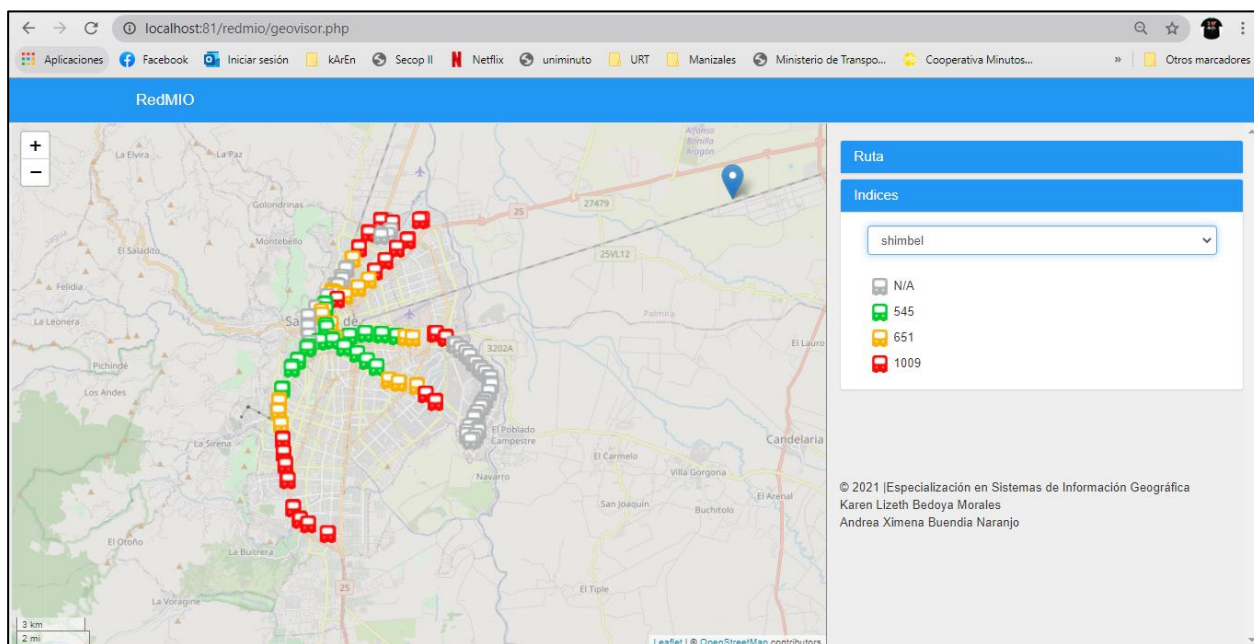


figura 53 Índice Shimbél
Fuente: Propia. 2020

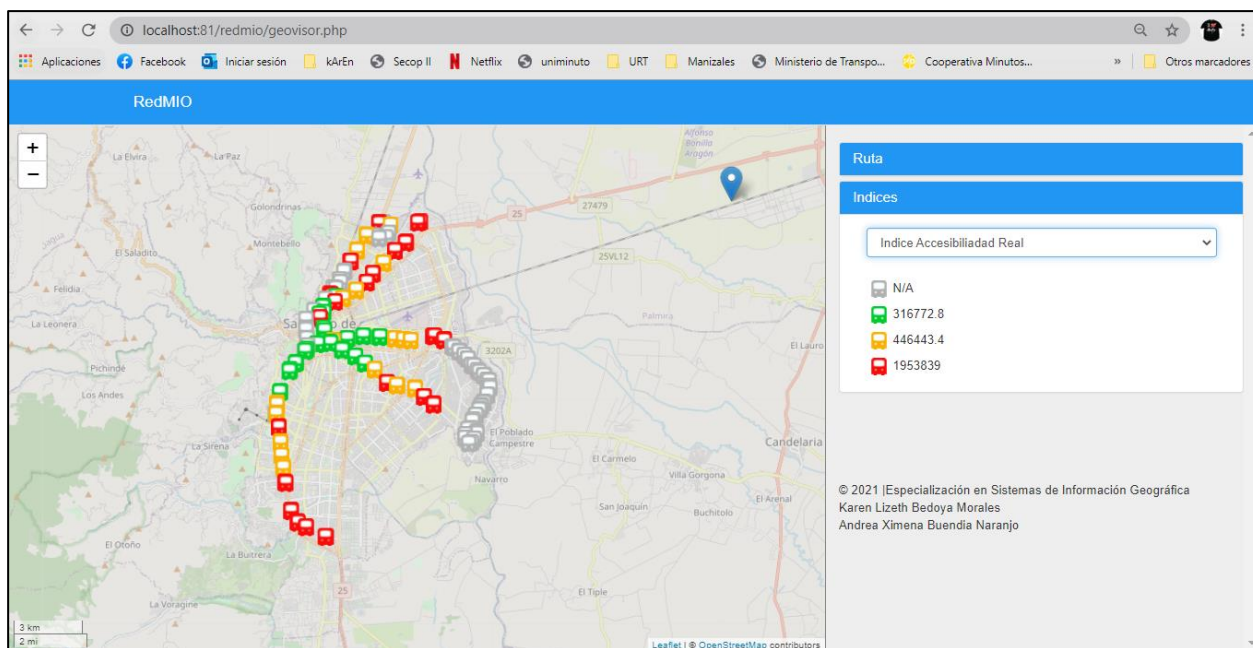


figura 54 Índice de accesibilidad Real
Fuente: Propia. 2020

Funcionalidad Básica del SIG WEB:

- Despliegue de las estaciones del MIO en la ciudad de Cali
- Ruta optima de acuerdo con los criterios establecidos por el usuario
- Despliegue de los Índices cálculos de acuerdo con la consulta del usuario, por colores (azul, verde, naranja, rojo, gris).
- Muestra información de la estación seleccionada.

CONCLUSIONES

- Abarcar las redes de transporte a través de la estructura topológica (nodos y enlaces), permitió identificar las conexiones de los sistemas, la cantidad de estaciones y vías existentes dentro de ella. Se puede reconocer qué estaciones presentan mejor conexión dentro del sistema de la red troncal de la ciudad de Cali. Además, conocer la accesibilidad topológica donde se pretende conocer la cantidad de vías o enlaces que debe pasar desde una estación i origen a todas las estaciones de la red.
- El uso de los grafos para representar la estructura topológica del sistema permitió modelar la red acercándola a la realidad de la ciudad de Cali.
- El diseño del SIG Web es amigable, simple y atractivo cumpliendo con los objetivos y misión, consultar la información geoespacial para la consulta de la accesibilidad de la red troncal del sistema de transporte masivo MIO en la ciudad de Cali.
- La metodología planteada en este proyecto es viable puesto que requiere de pocos recursos de equipamiento, humanos y económicos y es una forma ordenada de desarrollar el sistema.
- La generación de la base fue una fase exitosa dada que se contó con la información depurada, estructura y sólida que se almaceno en un buen gestor de bases de datos como lo es PostgreSQL con su extensión geográfica Postgis.
- La aplicación es funcional y depende de la gestión y actualización de la información espacial y alfanumérica.
- En el sistema de transporte de la ciudad de Cali se necesitan más vías, y ciclos de rutas que permitan optimar el acceso de transporte, y así disminuir los tiempos y distancias de los usuarios.
- El SIG Web desarrollado permite tener una visión global de la problemática relacionada con la accesibilidad a la red de transporte que presentan los usuarios de la ciudad de Cali; y a su vez, generan también el entendimiento hacia las posibles soluciones, permitiendo el análisis y la mitigación por parte de la entidad de planeación correspondientes.

7. RECOMENDACIONES

El propósito del estudio fue trabajar con la red troncal del sistema de transporte MIO de la ciudad de Cali, no se tuvo en cuenta recorridos pretroncales, alimentadores ni los otros modos de transporte, por lo tanto para estudios posteriores, es recomendable trabajar con toda la red de transporte que se encuentra en la ciudad, logrando integrarse el sistema masivo la red pretroncal y alimentadora que opera en conjunto con la red troncal del sistema BRT, ya que con la integración de estas alternativas de viajes es posible identificar como está distribuido todo el sistema y a su vez detallar que zonas (barrios o comunas) se encuentran incomunicadas y así mismo ver como se conecta dentro de la ciudad, analizando la cobertura espacial, centralidad y accesibilidad.

8. BIBLIOGRAFÍA

Unep Riso Centre. Planificación e implementación de un sistema de Bus Rápido en América Latina: Resumen orientado a tomadores de decisiones. 2009, p 1-31.

Wright Lloyd. Transporte masivo rápido de autobuses TMRB. Transport policy advice. P 1-48. Module 3B. 2002

Hagget P. Análisis locacional en geografía humana. Ed. Gustavo Gil. Col. Ciencia Urbanística núm. 17. Barcelona, 1976

Rodrigue, JP . et al. La Geografía de Sistemas de Transporte de la Universidad de Hofstra, Departamento de Estudios Globales y geografía. 2013. <http://people.hofstra.edu/geotrans>.

Deichmann U. Accessibility and spatial equity in the analysis of service provision. Geographical Targeting for Poverty Reduction and Rural Development. Banco Mundial, Washington D.C., Noviembre 1997

Palacios, José G. La organización espacial de la red de carreteras en Aragón. Aplicación metodológica de la teoría de grafos. Geographicalia, 1995, vol. 32, p. 83-101.

Derrible Sybil, Kennedy Christopher, Network Analysis of World Subway Systems Using Updated Graph Theory. Chapter 6, 2009c

Derrible Sybil, Kennedy Christopher. The complexity and robustness of metro networks. Physica A . No. 389, p 3678-3691. 2010c

Berge, C. The theory of graphs and its applications. Methuen, London. Bulletin of Mathematical Biology 24.4 1962. 441-443.

https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=h5BjnaoKyOwC&oi=fnd&pg=PR7&dq=berge++1962&ots=PYSL9bGjO7&sig=0G0uf7x5S_ey5ngXVNXeYYjROnA#v=onepage&q=berge%20%201962&f=false

Carrera, C.; Del Canto, C.; Gutiérrez, J.; Méndez, R., y Pérez, M. Trabajos prácticos de Geografía Humana. Ed. Síntesis, Madrid. 1993. p. 440

Pacheco, J., Vallejo M. Tesis: Evolucion de indicadores asociados a la medicion de la conectividad y utilidad de las redes de transporte. Universitat Politècnica de Catalunya. 2003. <http://hdl.handle.net/2099.1/6345>

Paranhos, G. C. Avaliação da Configuração de Redes de Transporte Público Urbano por Meio de Indicadores. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação T.DM-009A/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2011, 95p.

Derrible Sybil, Kennedy Christopher. Characterizing metro networks: state, form and structure. Transportation, 2010b, vol. 37, n ° 2, p.275-297.

Levinson, David. Network structure and city size. PLoS ONE , 2012, vol. 7, N ° 1, p. e29721. doi:10.1371/journal.pone.0029721

Escribano Jaime, Accesibilidad y conectividad en la comarca de la Hoya de Buñol-Chiva: un análisis de redes. Universidad de Valencia, 2005

Chandra Shailesh, Quadrioglio Luca, A new street connectivity indicator to predict performance for feeder transit services. *Transportation Research Part C*, vol 30, p 67–80. 2013

Snelder M., van Zuylen H.J., Immers L.H. A framework for robustness analysis of road networks for short term variations in supply. *Transportation Research Part A*, 2012, vol 46, p 828–842

Mishra Sabyasachee, Welch Timothy F., Jha Manoj K. Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part A*, 2012, vol 46, p 1066–1085

Cardozo Osvaldo, Gómez Erica, Parras Miguel. Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al Transporte Público de Pasajeros en Resistencia (Argentina). *Revista Transporte y Territorio* N° 1, Universidad de Buenos Aires, 2009. ISSN: 1852-7175. pp. 89-111. www.rtt.filo.uba.ar/RTT00105089.pdf

Patarasuk Risa. Road network connectivity and land-cover dynamics in Lop Buri province, Thailand. *Journal of Transport Geograph*, 2013, vol 28, p 111–123

Duan Yingying, Lu Feng. Structural robustness of city road networks based on community, *Computers, Environment and Urban Systems*. 2013, vol 41, p 75–87

Rodriguez A. Integración de un SIG con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas. XI Congreso de Ingeniería de Organización. International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Madrid. September 5th-7th. 2007. p 1-8

Kansky, K.J. Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics, The University of Chicago Press, Chicago. 1963

Taras Agryzkov, Oliver J, Tortosa L, Vicent J. A new betweenness centrality measure based on an algorithm for ranking the nodes of a network. *Applied Mathematics and Computation* 244. 2014. p 467–478

Derrible S. Network Centrality of Metro Systems. *PLoS ONE* 7(7): e40575. 2012 doi:10.1371/journal.pone.0040575

Newman, Mark EJ. The structure and function of complex networks. *SIAM review*, 2003, vol. 45, no 2, p. 167-256.

Iyer S, Killingback T, Sundaram B, Wang Z. Attack Robustness and Centrality of Complex Networks. *PLoS ONE* 8(4): e59613. 2013 doi:10.1371/journal.pone.0059613

Latora V., Marchiori M. A measure of centrality based on network efficiency. *New Journal of Physics* 9. 2007. P 2-12. <http://www.njp.org/> doi:10.1088/1367-2630/9/6/188

Freeman L. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*. Vol 40. No.1, 1977, P 35-41.

Duan Yingying, Lu Feng. Robustness of city road networks at different granularities. *Physica A* 411, 2014. P 21–34

Gómez J., Luján F. Estudio de la Red de carreteras en la región de Murcia a través de sus dimensiones básicas. Departamento de geografía, Universidad de Murcia. *Papeles de Geografía*, No. 16. 1990. P 125-14

Buhl J., Gautrais J, Reeves N., Sol Rv., Valverde S., Kuntz P., Theraulaz G. Topological patterns in street networks. *The European Physical Journal B*. 2006. P 513-522. DOI: 10.1140/epjb/e2006-00085-1

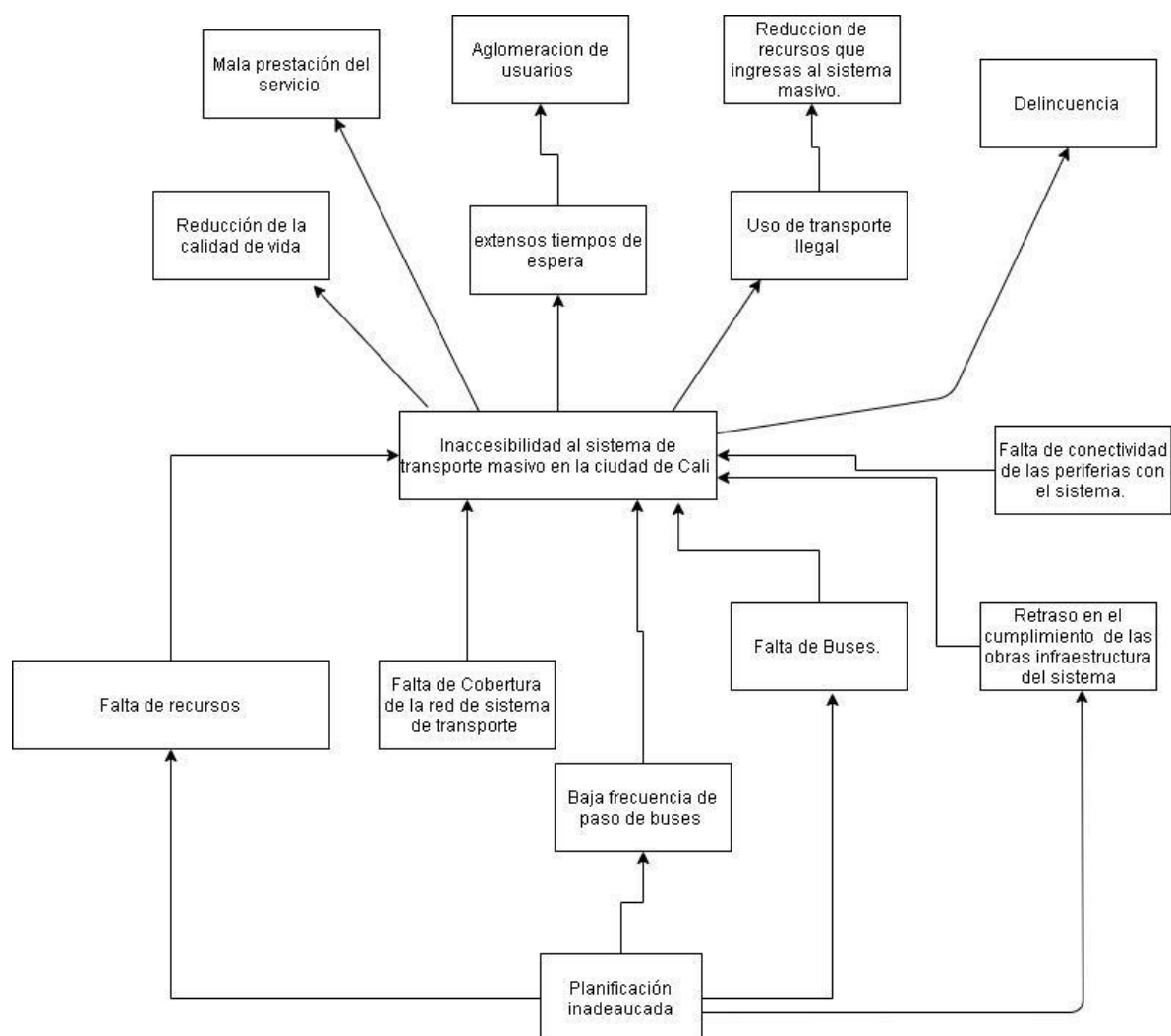
Shan He, Sheng Li, Hongru Ma. Betweenness centrality in finite components of complex networks. *Physica A* 388. 2009. p 4277_4285

Newman M.E.J. Mixing patterns in networks. Department of Physics, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109–1120 and Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, NM 87501. 4 Feb 2013. p 1-14

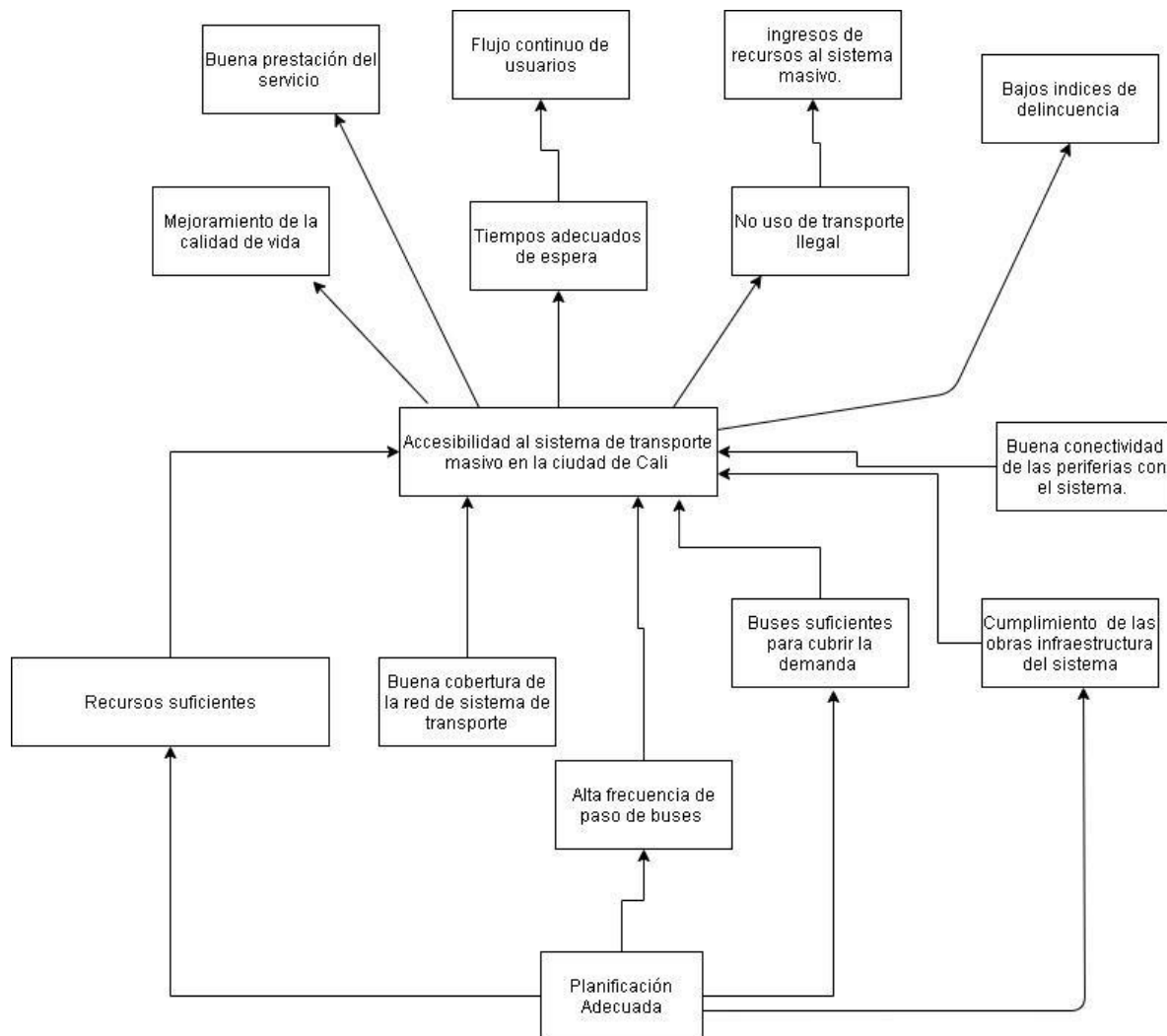
Freeman L, Borgatti S, White D. Centrality in valued graphs: A measure of betwwwnness based on network flow. *Social Networks* vol 13, p 141-154. North-Holland. 1991

9. ANEXOS

10.1. ANEXO 1. ÁRBOL DE CAUSAS Y EFECTOS



10.2. ANEXO 2. ÁRBOL DE OBJETIVOS



10.3. ANEXO 3. MATRIZ DE ACCESIBILIDAD TOPOLOGICA CALI

10.4. ANEXO 4. MATRIZ DE ADYACENCIA DE LA RED MIO

10.5 ANEXO 5. BASE DE DATOS (Archivo: redmio.backup)

10.6 ANEXO 6. Consultas SQL (Archivo: REDMIO.sql)

10.7 ANEXO 7. Consultas SQL (Carpeta: redmio)