



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Accesibilidad territorial para el análisis de cobertura urbana de los nodos de actividad primaria en el municipio de Villavicencio, Meta

Asley Fernando Espejo Díaz

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2023

Accesibilidad territorial para el análisis de cobertura urbana de los nodos de actividad primaria en el municipio de Villavicencio, Meta

Asley Fernando Espejo Díaz

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director (a):

Diego Alexander Escobar García. PhD.

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Civil y

Doctor en Gestión del territorio e infraestructura de transporte.

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2023

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



ASLEY FERNANDO ESPEJO DIAZ

Fecha 23/06/2023

Resumen

Accesibilidad territorial para el análisis de cobertura urbana de los nodos de actividad primaria en el municipio de Villavicencio, Meta

Los análisis de accesibilidad territorial son una herramienta importante de la planeación urbana que permite tomar decisiones respecto, entre otros, a la ubicación de nuevos equipamientos que mejoren la calidad de vida de la población. En este trabajo final de maestría se propone una metodología de 4 fases para realizar el análisis de accesibilidad territorial de una ciudad y proponer nuevos equipamientos. En la primera fase se recolecta información respecto a la población, infraestructura vial y oferta de servicios de la ciudad. La segunda fase determina los tiempos de desplazamiento y la distancia entre la población y los servicios bajo estudio. Lo anterior se realiza haciendo uso de técnicas de agrupamiento y e información disponible en herramientas tecnológicas como Google Maps. La tercera etapa estudia los tiempos y distancias de desplazamiento mediante curvas isócronas y gráficas de ojiva con el objetivo de analizar la accesibilidad territorial y determinar las zonas de las ciudades que debe ser priorizadas en el establecimiento de nuevos equipamientos. Finalmente, la etapa 4 selecciona nuevas ubicaciones para equipamientos mediante un modelo de programación matemática. La metodología es validada utilizando un caso de estudio de la ciudad de Villavicencio, en donde se analizan los servicios de educación, salud, seguridad y recreación. Los resultados del caso de estudio nos indican que la ciudad debe priorizar la construcción de equipamientos de salud y construir una nueva estación de bomberos. Además, si estos equipamientos son ubicados en las localizaciones sugeridas, la accesibilidad territorial mejorará en esos servicios.

Palabras clave: Accesibilidad territorial, Google Maps Distance Matrix, curvas isócronas, optimización.

Abstract

Territorial accessibility for the analysis of urban coverage of the primary activity nodes in the municipality of Villavicencio, Meta

Territorial accessibility analysis is an important input for urban planning that allows decision-makers to determine, among other things, the location of new urban infrastructure to improve the quality of life for inhabitants. In this master's thesis, we propose a 4-phase methodology for performing territorial accessibility analysis and identifying new locations for urban infrastructure. In the first phase, we collect information regarding the population, road infrastructure, and the services under study. The second phase involves determining the travel times and distances for the population to reach the city services, using clustering techniques and technological tools such as Google Maps. The third phase focuses on studying the travel times and distances using isochronous curves and population ogive graphs. This analysis helps assess territorial accessibility and identify the zones that should be prioritized for the establishment of new urban infrastructure. Lastly, in the fourth phase, we select the locations for the new urban infrastructure using a mathematical programming model. We validate the proposed methodology through a case study conducted in the municipality of Villavicencio, Colombia. The case study specifically analyzes the education, health, recreation, police, and firefighter services. The results of the case study indicate that the municipality should prioritize the construction of new urban infrastructure for healthcare services and establish a new station for firefighters. By locating these urban infrastructures in the suggested places, the territorial accessibility would improve for such services.

Keywords: Territorial accessibility, Google Maps Distance Matrix, isochronous curves, optimization.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	VII
Lista de figuras	X
Lista de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1 Justificación	2
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
2. Marco teórico	5
2.1 Marco conceptual	5
2.1.1 Planeación urbana	5
2.1.2 Accesibilidad territorial	6
2.1.3 Nodos de actividad primaria (NAP)	8
2.1.4 Información de la malla vial.....	9
2.1.5 Modelos de programación matemática	9
2.2 Estado del arte.....	10
3. Metodología.....	12
3.1 Recolección de información.....	13
3.2 Determinación de los tiempos y distancias de viaje de la población a los NAP. 13	13
3.3 Análisis de accesibilidad territorial	15
3.4 Propuesta de nuevos equipamientos urbanos	15
4. Desarrollo del caso de estudio	17
4.1 Recolección de información.....	20
4.2 Distancias y tiempos de viaje.....	23
5. Resultados y análisis	26
5.1 Análisis de accesibilidad territorial	26
5.2 Propuesta de nuevos equipamientos.....	34
5.2.1 Nuevos equipamientos en Salud.....	34
5.2.2 Nuevos equipamientos en seguridad - bomberos	38
6. Conclusiones y recomendaciones	41
6.1 Conclusiones	41
6.2 Recomendaciones	42

Bibliografía43

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Árbol de problemas del caso de estudio.	3
Figura 3-1: Metodología propuesta.	12
Figura 4-1: Localización de Villavicencio en Colombia. Fuente: Google Maps.....	18
Figura 4-2: División político-administrativa de Villavicencio. Fuente: Adaptado de (Alcaldía de Villavicencio, 2023)	19
Figura 4-3: Asentamientos ilegales a las afueras de Villavicencio.	19
Figura 4-4: Manzanas de Villavicencio.....	20
Figura 4-5: Red vial de Villavicencio.	21
Figura 4-6: Ejemplo de solicitud de tiempos y distancias de viaje utilizando Google Maps Distance Matris API	24
Figura 5-1 Mapa de curvas isócronas para los NAP de educación.	27
Figura 5-2 Mapa de curvas isócronas para los NAP de salud.	28
Figura 5-3 Mapa de curvas isócronas para los NAP de seguridad (policía).	29
Figura 5-4 Mapa de curvas isócronas para los NAP de seguridad (bomberos).....	29
Figura 5-5 Mapa de curvas isócronas para los NAP de recreación.....	30
Figura 5-6 Ojiva porcentual acumulada para los NAP bajo estudio.....	32
Figura 5-7 Mapa de curvas isócronas para los NAP de salud actuales y considerando 1 equipamiento adicional.	36
Figura 5-8 Mapa de curvas isócronas para los NAP de salud actuales y considerando 2 equipamientos adicionales.....	37
Figura 5-9 Ojiva porcentual acumulada para la situación actual y los escenarios del análisis de salud	38
Figura 5-10 Ojiva porcentual acumulada para la situación actual y escenario del análisis de Seguridad-Bomberos	39
Figura 5-11 Mapa de curvas isócronas para los NAP de seguridad – Bomberos considerando1 equipamiento adicional.	40

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Ejemplos de NAP, fuente (Escobar et al., 2017).....	8
Tabla 5-1: Localización de equipamientos de salud actuales y propuestos	34
Tabla 5-2: Localización de equipamientos de salud actuales y propuestos	38

1. Introducción

Los análisis de accesibilidad son una herramienta fundamental en la planeación urbana que se utilizan, entre otros, para establecer políticas públicas respecto a la infraestructura y equipamiento de las ciudades (Geurs & van Wee, 2004). En otras palabras, los proyectos y políticas de infraestructura urbana consideran la accesibilidad como un factor importante en su formulación y evaluación. Es de resaltar que las decisiones de infraestructura y de transporte urbano suponen grandes inversiones que tienen incidencias a corto, mediano y largo plazo (Ortúzar & Willumsen, 2011) y utilizan como insumo este tipo de análisis. Mediante los estudios de accesibilidad es posible determinar la facilidad (o dificultad) con la cual la población puede alcanzar un destino de interés (ej. centros de salud) teniendo en cuenta la infraestructura y medios de transporte disponibles (Escobar, Montoya, & Moncada, 2018; Morris et al., 1979). Adicionalmente, este concepto está relacionado con la competitividad en las ciudades siendo las ciudades con mejores indicadores de accesibilidad más competitivas (Biehl, 1991). La accesibilidad en una ciudad puede ser evaluada de distintas formas, por ejemplo, considerando exclusivamente el acceso de la población a instituciones educativas (Montoya et al., 2018), a establecimientos comerciales (Tahmasbi et al., 2019) o a distintos servicios urbanos (Shen et al., 2020).

En este trabajo proponemos una metodología para realizar el análisis de accesibilidad y la propuesta de ubicaciones para nuevos equipamientos en las ciudades. Para esta investigación, se utilizará la accesibilidad integral y accesibilidad global como métodos de análisis. Estas medidas son basadas en infraestructura debido a que utilizan la red vial, velocidades de operación y para representar la oferta de infraestructura del transporte que posee una ciudad. Por otro lado, la accesibilidad integral posee una perspectiva adicional, la cual es basada en equipamientos, debido a que se concentra en medir el acceso a

puntos específicos de la ciudad. Adicionalmente, en este trabajo se mide la accesibilidad considerando los nodos de actividad primaria (NAP) contemplados en (Escobar et al., 2017) los cuales se clasifican en salud, educación, seguridad y recreación los cuales suplen las principales necesidades de las comunidades. Para validar la practicabilidad de nuestra propuesta, utilizamos un caso de estudio inspirado en la ciudad de Villavicencio, capital del departamento del Meta en Colombia.

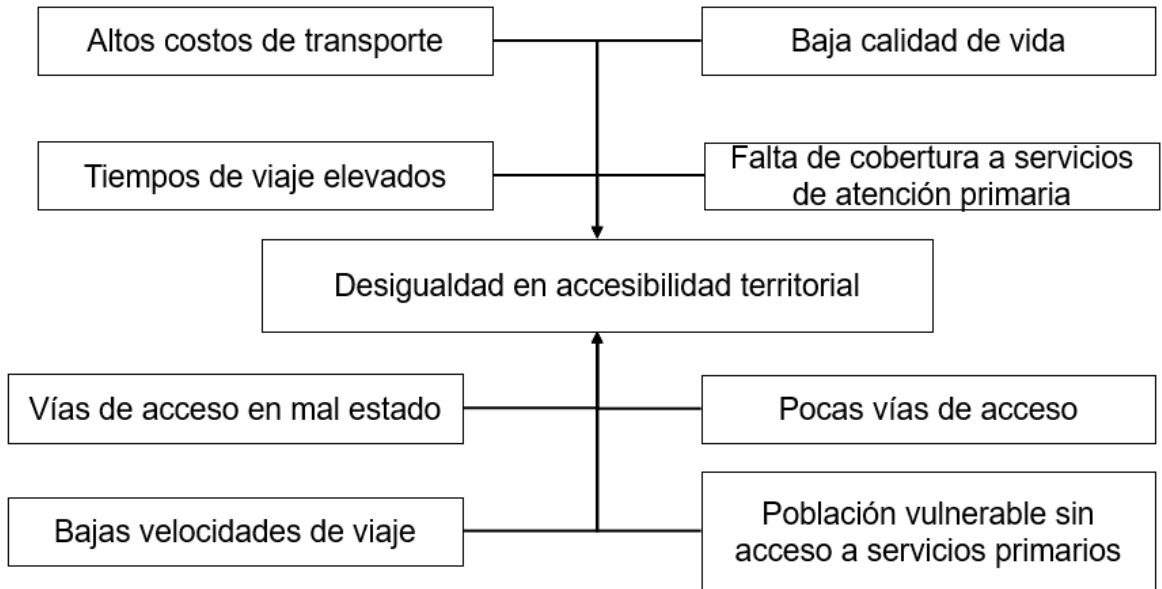
1.1 Justificación

Villavicencio está situada en el Piedemonte de la Cordillera Oriental, al noroccidente del departamento del Meta, a 82 km de la capital del país, Bogotá (Alcaldía de Villavicencio, 2023). Es de resaltar que gran parte de su población vive en el casco urbano y un gran porcentaje de ella viene de otras ciudades del departamento, posiblemente huyendo del conflicto armado colombiano. Esta población vulnerable frecuentemente se asienta en la periferia de la ciudad, invadiendo propiedades y originando un crecimiento desordenado y aleatorio de la ciudad, sin estar acorde con los planes de ordenamiento territorial.

Adicionalmente, el crecimiento desordenado de la ciudad se ve acentuado en las comunas que quedan en la periferia del municipio. Un análisis preliminar de la ubicación de los servicios primarios de la ciudad arroja que estos se ubican en el casco antiguo del municipio, específicamente en las comunas 2, 3 y 6. Esta centralización de los NAP dificulta el acceso a estos servicios para la población más alejada, la cual se encuentra a las afueras de la ciudad. En estas zonas los NAP disminuyen su cobertura, lo que a su vez ocasiona disminución de calidad de vida de los habitantes de estas zonas. Por esta razón, se hace necesario hacer una evaluación de la cobertura de los distintos nodos de actividad primaria (salud, seguridad, educación y recreación) en el municipio de Villavicencio, mediante un análisis de accesibilidad media integral determinando las áreas de la ciudad que poseen la mejor cobertura, así como la población realmente impactada por los mismos. Además, esto permite determinar en qué lugares de la ciudad se pueden ubicar nuevos equipamientos de distinta índole, impactando un mayor número de habitantes. Por otro lado, se realizará un análisis de accesibilidad media global que permitirá evaluar las condiciones de oferta de la red vial del municipio de Villavicencio, encontrando las zonas

de la ciudad con mejor accesibilidad. Lo anterior es resumido en forma de árbol de problemas en la Figura 1-1.

Figura 1-1: Árbol de problemas del caso de estudio.



Este documento se organiza de la siguiente manera. A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo. La sección 2 presenta el marco teórico en donde se introducen las definiciones pertinentes al estudio (marco conceptual) y adicionalmente se realiza una revisión del estado del arte en el tema. La sección 3 presenta la metodología para realizar el análisis de accesibilidad y la propuesta de nuevos equipamientos. La sección 4 introduce el caso de estudio y la recolección de información. La sección 5 presenta los resultados y el análisis de estos y finalmente la sección 6 concluye el trabajo y presenta las sugerencias derivadas del estudio.

Los códigos de programación, las matrices de resultados, mapas de curvas isócronas, el modelo de optimización y los archivos utilizados para los análisis están disponibles en el repositorio de GitHub <https://github.com/asleyfer/tesisMSc>

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Medir la cobertura de los nodos de actividad primaria (salud, educación, recreación y seguridad) en el municipio de Villavicencio, Meta mediante el método de accesibilidad media integral y proponer ubicaciones para nuevos equipamientos dentro del municipio.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Actualizar la red de infraestructura vial y de equipamientos urbanos (NAP) del municipio.
2. Calcular la accesibilidad media global para la zona de estudio.
3. Obtener un análisis de la cobertura ofrecida por los NAP dada por las curvas isócronas de accesibilidad media integral.
4. Realizar una propuesta para la ubicación y construcción de nuevos equipamientos urbanos para mejorar el acceso en las zonas del municipio con baja cobertura.

2. Marco teórico

Esta sección presenta el marco conceptual en donde se definen los principales conceptos desarrollados en este trabajo y posteriormente, una revisión del estado del arte en accesibilidad territorial que analiza los trabajos recientes y relevantes en el tema.

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Planeación urbana

La planeación urbana es un concepto que recoge todos los procesos, actividades y estrategias utilizadas para diseñar y controlar los espacios urbanos con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los habitantes mediante entornos, entre otros, accesibles (Batty, 2008; Hall, 1998; Ortúzar & Willumsen, 2011). Los orígenes de la planeación urbana se remontan a mediados del siglo XIX con Eugène Haussmann en Francia donde sus propuestas dan un antes y después en la construcción de las ciudades (Freemark et al., 2022). Posteriormente, en 1874 la Sociedad de Arquitectos e Ingenieros Unidos de Alemania presentó una serie lineamientos básicos para la planificación. De igual forma en Inglaterra a principios del siglo XX, Ebenezer Howard desarrollo el concepto de ciudad jardín (Clark, 2003). En 1914 el alemán Frank Koester publicó en Nueva York “*Modern city planning and maintenance*” uno de los primeros trabajos escritos sobre planeación urbana (Koester, 1914). Finalmente, otra contribución relevante que sigue vigente es la Carta de Atenas propuesta por el francés Le Corbusier, que en sus 95 puntos planifica una ciudad segregada, separa la residencia, el comercio, la industria entre otros (Gold, 1998). Esta metodología sigue vigente hasta hoy, como se puede evidenciar en la distribución de las ciudades, donde existe un uso del suelo específico para cada área geográfica de la ciudad, separado uno del otro. Un insumo importante para la planeación urbana son los modelos de transporte los cuales son encargados de realizar una representación sistemática de la movilidad en las ciudades. Es de resaltar que estas representaciones simplifican las

condiciones de movilidad debido a la complejidad de los sistemas de transporte en las ciudades actuales. Los modelos de transporte pueden ser clasificados en modelos de demanda y de oferta (Ortúzar & Willumsen, 2011). La accesibilidad territorial el cual es foco de este trabajo es un modelo de transporte de tipo oferta el cual es detallado en la siguiente subsección.

2.1.2 Accesibilidad territorial

La accesibilidad territorial puede ser vista como un modelo de transporte de oferta que contempla la facilidad de los habitantes por dirigirse a un destino con la infraestructura y medios de transporte disponibles (Escobar, Montoya, & Moncada, 2018; Morris et al., 1979). Los modelos de transporte, entre los que se cuentan la accesibilidad, son una herramienta poderosa utilizada por los planificadores de ciudad para justificar inversiones en proyectos de distinta índole, entre los que se cuentan: nuevas obras de infraestructura del transporte, optimización y planificación de nuevos sistemas de transporte público, planificación y ubicación de equipamientos urbanos de distinta índole (residencial, emergencias, comercial, industrial, recreativo, etc.) (Escobar, Montoya, & Moncada, 2018; Ortúzar S, 2012).

La accesibilidad es una metodología que se presenta desde la segunda década del siglo pasado utilizada como método de planificación de nuevos sistemas de transporte en Norte América (Batty, 2009). Por otro lado, fue (Hansen, 1959) el primer autor en definir este término como el potencial de oportunidades de interacción que posee un individuo, determinando que las variables para su medición son el nivel de atracción que poseen las oportunidades (empleos, instituciones educativas, hospitales, centros de comercio, etc.), la impedancia que poseen los individuos (medidos en tiempo y/o distancia) y el deseo de las personas de eliminar dichas impedancias con el fin de acceder a las oportunidades. A esta metodología se le conoce tradicionalmente como la accesibilidad basada en gravedad de Hansen. Más adelante, (Ingram, 1971) definió dos distintos tipos de medida. En primer lugar, la accesibilidad relativa la cual se mide entre dos puntos de la ciudad o el territorio. En segundo lugar, la accesibilidad integral es la medida entre distintos puntos de una ciudad hacia uno o varios puntos en particular. En este caso se realizan medidas de la accesibilidad que poseen diferentes zonas de la ciudad a equipamientos en particular

(Montoya et al., 2018), obteniendo la cobertura de estos en un espacio geográfico, estas medidas son también denominadas medidas de contorno. La accesibilidad global, es un tercer tipo de medida, la cual se definió más adelante y que incluye un cálculo entre todos los nodos de la red vial de una ciudad, refiriéndose a todos ellos como oportunidades (Batty, 2009; Talen & Anselin, 1998) y cuantificando la calidad operativa y oferta de la red vial (Cardona et al., 2018).

En 1979 Pirie realizó una revisión de literatura del término, exponiendo los diferentes tipos de medida para la accesibilidad desarrollados hasta la fecha (Pirie, 1979). Entre las conclusiones más importantes del estudio se cuentan la presunción de origen y destino, lo que indica que algunos equipamientos urbanos poseen concepción como destino de viajes debido a que las personas deben acudir a estos para acceder a las oportunidades ofrecidas. Entre estos se cuentan los establecimientos educativos, de comercio, recreativos, laborales, entre otros, mientras que los equipamientos que poseen concepción de origen son aquellos como los de seguridad (estaciones de policía), estaciones de bomberos y algunos servicios domiciliarios.

La concepción de origen se relaciona con que estos deben acudir a responder los requerimientos desde su ubicación hasta los lugares solicitados. Por otro lado, existen equipamientos que en algunos casos pueden poseer ambas concepciones, como los hospitales, dadas las circunstancias de recibir pacientes para citas médicas o controles (concepción de destino) o el momento de alguna emergencia en el que las ambulancias deben acudir a los sitios del siniestro (concepción de origen).

En las últimas décadas diversos investigadores han utilizado las distintas medidas de accesibilidad, convirtiéndose en uno de los modelos de transportes para medir la oferta más estudiado (Geurs et al., 2009). Asimismo, en el siglo XXI han continuado los distintos avances en términos de precisión y definición conceptual y metodológica, donde la accesibilidad se ha definido como la relación entre los usos del suelo de una ciudad y sus habitantes a través de un sistema de transporte en particular, teniendo en cuenta las condiciones particulares que posee la ciudad en cuanto a la movilidad y su temporalidad, distribución de oportunidades, dinámicas de sus habitantes y distintos modos de transportes. Además, se han definido distintos tipos de medida: basada en infraestructura, basada en equipamientos, basada en personas y basada en utilidades (Geurs et al., 2009; Karst & van Eck, 2003)

2.1.3 Nodos de actividad primaria (NAP)

Los nodos de actividad primaria, corresponden a los elementos o equipamiento necesarios en una ciudad, que suplen las principales necesidades de una población (Escobar et al., 2017). Estos nodos están ubicados dentro de la ciudad y están conectados a la red de transporte urbana. Algunos ejemplos de NAP del contexto colombiano se presentan en la

Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Tabla 2-1: Ejemplos de NAP, fuente (Escobar et al., 2017).

Sector	Tipo
Educación	Jardines
	Escuelas
	Colegios
	Institutos
	Universidades
Salud	Puesto de Salud
	E.S.E. Municipal
	E.S.E. Departamental
	Clínica
	Hospital Nivel 3
	Hospital Nivel 4
	Cruz Roja
	Farmacias
Seguridad	Estación de Policía
	Comandos de Atención Inmediata (CAI)
	Batallón
	Cárcel
	Bomberos
	Defensa Civil
Estatal	Gobernación
	Alcaldía
	Transito
	DIAN
	IGAC
	IDEAM
	Notarias
Recreación	Parques
	Centros Comerciales
	Centros Recreacionales

2.1.4 Información de la malla vial

Para tener un modelo de transporte que se ajuste a la realidad, es necesario contar con la información de la malla vial que contenga, arcos (Tramo de vía) y nodos (Intersecciones viales) (Bunge, 1979). Los arcos poseen características como longitud y velocidad, donde esta última se obtiene a través de mediciones de campo, o por operadores tecnológicos que obtienen esta información a través de los usuarios al utilizar sus plataformas, estos datos son indispensables para calcular el tiempo de recorrido de cada tramo.

2.1.5 Modelos de programación matemática

La programación matemática, también conocida como optimización matemática es una rama de la investigación de operaciones que estudia la teoría y los métodos para encontrar los extremos de funciones en conjuntos definidos por restricciones lineales y no lineales en un espacio vectorial de dimensión finita (Encyclopedia of Mathematics, 2023). En otras palabras, la programación matemática tiene como objetivo encontrar soluciones óptimas o casi óptimas dada una información de entrada y una o múltiples restricciones de problemas y se aplica a una amplia gama de campos. Esta rama específica tiene sus propias divisiones que dependen de la naturaleza del problema a resolver y las características de los datos de entrada. Las principales categorías de programación matemática son las siguientes:

- Programación lineal: La función objetivo y las restricciones son expresiones lineales.
- Programación entera: Una o múltiples variables toman valores enteros y la solución, se puede dividir en programación entera pura cuando todas las variables de decisión son enteras o programación entera mixta cuando las variables enteras están presentes con otro tipo de variables.
- Programación estocástica: Los datos contienen elementos de indeterminación y pueden verse como una función de probabilidad.
- Programación no lineal: algunas de las restricciones de la función objetivo son no lineales.

Para la programación matemática del problema en cuestión (problema de localización de instalaciones) se utiliza la técnica de programación entera mixta (MIP) porque hay variables que toman valores enteros.

2.2 Estado del arte

Durante los últimos años ha existido interés desde la academia en realizar estudios de accesibilidad urbana en distintos contextos. Un ejemplo de ello es el trabajo de Gibbons & Vignoles, (2012) que estudiaron la accesibilidad territorial de una comunidad en Inglaterra hacia equipamiento educativo. En el estudio los autores consideraron el transporte público como forma de transporte de la juventud que desea acceder a la oferta educativa de la ciudad. Los autores referenciaron geográficamente los habitantes y encontraron mediante el estudio de accesibilidad que la distancia hacia las instituciones educativas tiene gran influencia en la selección de esta. Otro ejemplo de aplicabilidad de estudios de accesibilidad territorial es el (Mao & Nekorchuk, 2013). En este trabajo los autores estudiaron la accesibilidad territorial contemplando múltiples modos de transporte de la población hacia servicios de salud. Ellos propusieron una variante del método área de captación flotante de 2 pasos (2SFCAM por sus siglas en inglés) y validaron su propuesta utilizando un caso de estudio inspirado en la ciudad de Florida en Estados Unidos. Los autores encontraron que considerar la multimodalidad de transporte da como resultado estudio de accesibilidad más realistas. Wan et al., (2012) de igual forma estudiaron la accesibilidad territorial medida desde la facilidad de la población por alcanzar servicios de salud. Ellos propusieron una variante del método de área de captación flotante con el objetivo de planificar los recursos de las redes de salud en las ciudades. Como caso de estudio utilizaron el corredor Austin-San Antonio en el centro de Texas mostrando que su metodología minimiza la sobreestimación de la demanda de atención médica equilibrando el acceso espacial de la población a servicios de salud. Más recientemente, Escobar et al., (2017) estudiaron la accesibilidad territorial de la población de la ciudad de Quibdó en Colombia respecto con servicios primarios como salud, educación y seguridad. En este trabajo utilizaron la accesibilidad media integral como metodología para analizar la oferta de equipamientos de la ciudad. Los autores concluyeron que para esa ciudad es prioritario invertir en equipamientos urbanos de seguridad. Por otra parte en (Escobar, Montoya, & Galindo, 2018) se realizó un estudio para analizar la accesibilidad territorial a equipamientos de seguridad. Los autores como metodología utilizaron modelos geoestadísticos para construir grafos e imágenes que permitan interpretar la accesibilidad en las ciudades. Como caso de estudio utilizaron el municipio de Pitalito en Colombia, el cual, para la época tenía problemas de seguridad. Otro trabajo reciente sobre accesibilidad

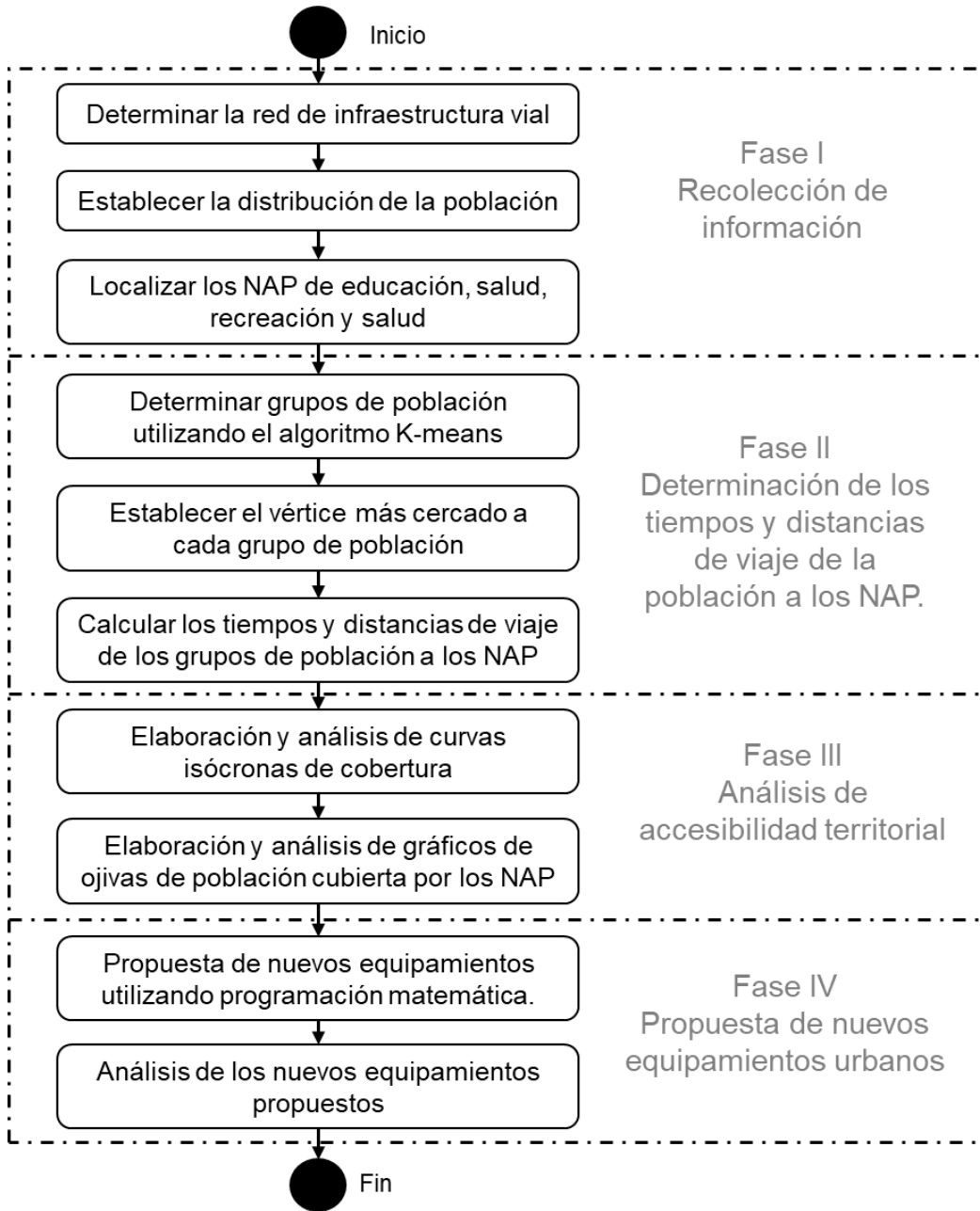
territorial es (Montoya et al., 2018). En este trabajo los autores se centraron en analizar la accesibilidad territorial de la población a centros educativos. Para ello utilizaron modelos geoestadísticos apoyados por información suministrada por herramientas digitales. Recientemente en (Adams et al., 2020) los autores buscaron mejorar el acceso a los sistemas de salud utilizando un estudio de accesibilidad territorial. Para ello generaron matrices de distancia entre la población y los equipamientos de oferta de salud (servicios de maternidad y de emergencia) utilizando el software ArcGIS. Adicionalmente en (Tahmasbi et al., 2019) se propone una metodología para medir la accesibilidad a los equipamientos públicos teniendo en cuenta la equidad respecto a los ingresos económicos. Para ello utilizan conceptos como el coeficiente Gini e índices estadísticos. Los autores prueban su propuesta utilizando un caso de estudio de Isfahán en Irán en donde los resultados demuestran que los grupos poblacionales de bajo ingreso están menos beneficiados de equipamiento urbano de comercio. Finalmente en (Shen et al., 2020) realizan un análisis de accesibilidad mediante el uso de un modelo de programación matemática que utiliza sistemas de información geográfica.

Este trabajo contribuye al estado del arte en accesibilidad territorial mediante la integración de herramientas como cálculo de curvas isócronas con modelos de optimización. Además, incluimos datos tomados con dispositivos digitales y disponibles en aplicaciones tecnológicas como lo es Google Maps. Finalmente se valida la propuesta utilizando un caso de estudio que aborda las problemáticas de accesibilidad de la ciudad de Villavicencio.

3. Metodología

Con el fin de cumplir el objetivo general de este trabajo se propone una metodología de 4 fases como se observa en la Figura 3-1. Cada fase es detallada en las siguientes subsecciones.

Figura 3-1: Metodología propuesta.



3.1 Recolección de información

La primera fase de la metodología consiste en recolectar la información respecto a la oferta de servicios, demanda (población) e infraestructura vial de la siguiente forma:

- **Demanda:** Se debe georreferenciar la población de la ciudad teniendo en cuenta la concentración de la población en las manzanas, barrios y sectores de la ciudad. Para algunos municipios de Colombia esta georreferenciación está disponible en portales oficiales municipales, departamentales o el portal nacional datos abiertos. Esta información puede venir en forma de mapas cartográficos con capas vectoriales que representan las manzanas o sectores de la ciudad y tienen asociados atributos que indican la distribución de la población. Se debe extraer el centroide de cada capa para asociar cada hogar u manzana con una coordenada geográfica.
- **Infraestructura vial:** Se debe recolectar información sobre la ubicación de las vías dentro del perímetro urbano y también en las zonas rurales de la ciudad. Esta información debe contemplar las vías, las intersecciones, las direcciones de las vías y demás componentes de la movilidad urbana.
- **Oferta de servicios:** Se debe realizar una georreferenciación de los equipamientos urbanos sobre los cuales el estudio de accesibilidad será realizado. En nuestro caso de estudio estos corresponden a los NAP de educación, salud, seguridad y recreación.

3.2 Determinación de los tiempos y distancias de viaje de la población a los NAP.

La siguiente fase en la metodología es la determinación de los tiempos y distancias de viaje de la población hasta los NAP. Para ello primero determinamos grupos o clústeres de población con base en su localización. Lo anterior es debido a que el número de ubicaciones de los hogares o de manzanas en una ciudad puede ser muy larga llegando a miles de ellas. Por lo tanto, para reducir la dimensionalidad se generan determinados números de clústeres que representan grupos de hogares o de manzanas. Múltiples trabajos como (Kim & Ham, 2019) o (Wang et al., 2020) han utilizado algoritmos de agrupación para agregar coordenadas geográficas. En este trabajo implementamos el

algoritmo de agrupación *k-means* descrito en el trabajo de (Manning et al., 2009) de la siguiente manera.

Suponga que X_c es el centro del clúster potencial c , entonces,

$$X_c = \frac{1}{|k|} \sum_{x \in k} \vec{x} \quad (1)$$

El objetivo del algoritmo K-means es minimizar la distancia euclidiana promedio al cuadrado entre n centros de conglomerados y z puntos de datos (Bock, 2008). La distancia euclidiana al cuadrado viene dada por la suma residual de cuadrados (RRS_z) como se presenta en la Ecuación 2.

$$RRS_k = \sum_{\vec{x} \in k} |\vec{x} - x_c|^2 \quad (2)$$

Por último, la ecuación 3 minimiza la suma total de cuadrados de todos los puntos de datos.

$$\text{Mimimizar } RRS = \sum_{k=1}^K RRS_k \quad (3)$$

Además, es posible saber cuántos puntos de datos se agrupan en cada clúster $c \in K$. Esta información se utilizará en una etapa posterior de este trabajo.

El siguiente paso dentro de esta fase es determinar el vértice vial más cercano a cada clúster. En este trabajo hacemos la suposición que la población de ese clúster comienza o su recorrido desde ese vértice. Ya asociado cada clúster con su correspondiente vértice más cercano el siguiente paso es determinar la distancia hasta o desde el equipamiento de interés. En este trabajo utilizamos la interfaz de programación de aplicaciones (API por sus siglas en inglés) de Google denominada "Google Maps Distance Matrix". Esta proporciona los tiempos de viaje y distancias para una matriz de orígenes y destinos contemplando datos históricos de condiciones de tráfico (Google, 2022). De esta se pueden aprovechar nuevas fuentes de información como la geolocalización de teléfonos móviles o datos de GPS que tienen el potencial de aumentar la precisión de propuestas de planeación urbana (García-Albertos et al., 2019).

3.3 Análisis de accesibilidad territorial

Una vez obtenidos los tiempos de viaje de la población hacia los equipamientos de interés, la siguiente fase de la metodología es realizar el análisis de accesibilidad territorial. Lo anterior se realiza con el objetivo de identificar qué zonas de la ciudad son prioritarias para realizar inversiones en equipamientos con el fin de aumentar la accesibilidad territorial.

Este análisis lo realizamos generando mapas de curvas isócronas. Estos corresponden a representaciones gráficas que muestran las áreas de la ciudad que están a un determinado intervalo de tiempo de un equipamiento de interés. Cada curva o zona del mapa representa un intervalo de tiempo en el cual se puede alcanzar un equipamiento de interés. Por ejemplo, si en un mapa de curvas isócronas para analizar seguridad se manejan intervalos de 5 minutos, las áreas que tienen un equipamiento de seguridad a 5 minutos o menos serán identificadas con un color, las áreas que estén de 5 a 10 minutos con otro color y así sucesivamente.

Es de resaltar que los mapas de curvas isócronas son herramientas muy importantes para la toma de decisiones sobre la planificación no solo de infraestructuras de transporte sino localización de servicios públicos en las ciudades.

Finalmente, concluimos el análisis de accesibilidad generando las ojivas de cobertura de población. Estos gráficos representan la distribución de la población en relación con la cobertura en términos de distancia de viaje. El eje horizontal representa el tiempo de viaje en intervalos mientras que el eje vertical la población acumulada. Estas gráficas se generan para medir la situación actual de accesibilidad territorial de la población y compararlas con las mismas gráficas generadas contemplando los nuevos equipamientos propuestos en la próxima subsección.

3.4 Propuesta de nuevos equipamientos urbanos

La última etapa en la metodología es proponer nuevos equipamientos con el objetivo de mejorar los indicadores de accesibilidad de la ciudad y por ende la calidad de vida de los habitantes. Para ello, una vez identificadas las zonas en las cuales los indicadores de accesibilidad son los más bajos nuevos equipamientos deben ser colocados en esas zonas. La decisión de localización de instalaciones o equipamientos se realiza utilizando un modelo de programación matemática que minimiza el tiempo de viaje requerido para

alcanzar los equipamientos. En este trabajo utilizamos una variante el modelo de localización de instalaciones discreto presentado en (Owen & Daskin, 1998) de la siguiente manera. Considere un conjunto I de clústeres de población $i \in I$ y cada uno agrupa h_i habitantes. Adicionalmente considere un conjunto J que representa los sitios de equipamientos ya establecidos (subconjunto J^*) y los sitios potenciales (subconjunto J^{**}) en donde se pueden construir equipamientos para la ciudad. Por ende $J = J^* \cup J^{**}$. Los sitios potenciales pueden ser lotes o edificaciones de la ciudad y que pueden ser utilizados para establecer nuevo equipamiento. El tiempo de viaje del vértice asociado a clúster de población a cada sitio $j \in J$ es representada por el parámetro t_{ij} . Es de resaltar que el tiempo de viaje es obtenido utilizando la API de Google Maps Distance Matrix. Finalmente P representa el número de equipamientos a ser establecidos (incluyendo los que ya existen). Finalmente, el modelo de optimización utiliza las siguientes variables de decisión:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si el equipamiento es ubicado en el sitio } j \in J. \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el cluster de población } i \in I \text{ es cubierto por el sitio } j \in J. \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Con las anteriores definiciones, el problema de localización de instalaciones (FLP por sus siglas en inglés “facility location problem”) de tipo P-media puede ser escrito como el siguiente modelo de programación lineal entero mixto:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} X_j = P \quad (5)$$

$$X_j = 1 \quad \forall j \in J^* \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (10)$$

La función objetivo de la ecuación 4 minimiza el tiempo de viaje requerido por los habitantes para llegar a los equipamientos. La restricción 5 asegura que exactamente P equipamientos sean establecidos. La restricción 6 considera la localización de los equipamientos que ya están en funcionamiento. La restricción 7 asegura que a cada clúster le sea asignado un equipamiento. La restricción 8 permite asignación de equipamientos a los clústeres solo a los sitios que están seleccionados. Finalmente, las restricciones 9 y 10 definen la naturaleza binaria de las variables de decisión. En la siguiente sección se introduce el caso de estudio y la recolección de información.

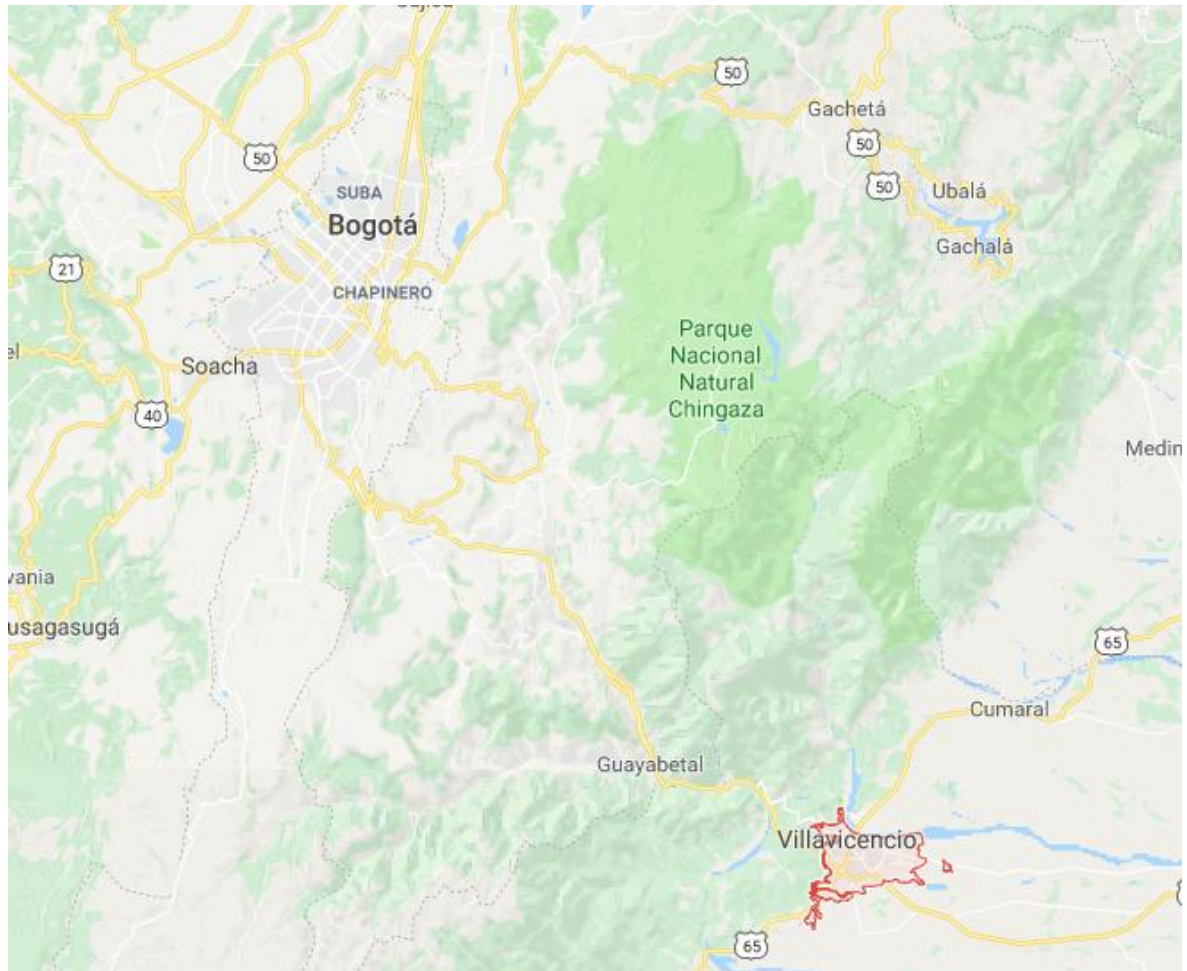
4. Desarrollo del caso de estudio

Con el objetivo de validar y aplicar la metodología presentada en la sección anterior, desarrollamos un caso de estudio inspirado en la ciudad de Villavicencio, capital del departamento del Meta en Colombia. En esta sección presentamos la descripción general de la ciudad haciendo énfasis en la necesidad de realizar procesos de planeación urbana que tengan en cuenta análisis de accesibilidad. Adicionalmente, en esta sección se muestran los resultados de las fases I y II que corresponden a recolección de información y determinación de los tiempos de viaje, respectivamente.

Villavicencio está situada en el Piedemonte de la Cordillera Oriental, al noroccidente del departamento del Meta, en la margen izquierda del río Guatiquía, a 82 km de la capital del país, Bogotá como se puede observar en la Figura 4-1 (Alcaldía de Villavicencio, 2023). De acuerdo con la última actualización político-administrativa de Villavicencio del 2021, la ciudad ahora cuenta con 10 comunas como se puede observar en la Figura 4-2. La población del municipio para el año 2018 (último censo) es de 531,275 habitantes donde se estima que aproximadamente el 90%, de la población, está ubicada en el casco urbano (Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, 2018). Es de resaltar que la mitad de la población no es oriunda del municipio, debido que provienen de otras

ciudades del departamento, posiblemente huyendo del conflicto armado y asentándose en la periferia de la ciudad. Estas personas que emigran generalmente son personas de bajos recursos, las cuales invaden propiedades o lotes que origina un crecimiento desordenado y aleatorio de la ciudad sin estar acorde al plan de ordenamiento territorial del municipio.

Figura 4-1: Localización de Villavicencio en Colombia. Fuente: Google Maps



Haciendo un análisis preliminar, el crecimiento desordenado de la ciudad se ve acentuado en las comunas que quedan en la periferia del municipio, la comuna 5, 8, 9 y 10 e incluso parte de la zona rural, donde se han generado a lo largo de los últimos años que, barrios subnormales, a raíz de la migración hacia la ciudad, se legalicen, generando grandes inversiones por parte del estado en infraestructura básica como vías, acueducto y alcantarillado, y algunos equipamientos urbanos. Estos asentamientos se pueden observar en la Figura 4-3. Estas inversiones mejoran la calidad de vida de las personas dentro del área de influencia del proyecto, y se localizan en áreas donde existe la disponibilidad de

un predio, o donde al formulador del proyecto mejor le parezca sin tener en cuenta una metodología que le permita maximizar la cobertura de población en el área de influencia de los proyectos.

Figura 4-2: División político-administrativa de Villavicencio. Fuente: Adaptado de (Alcaldía de Villavicencio, 2023)

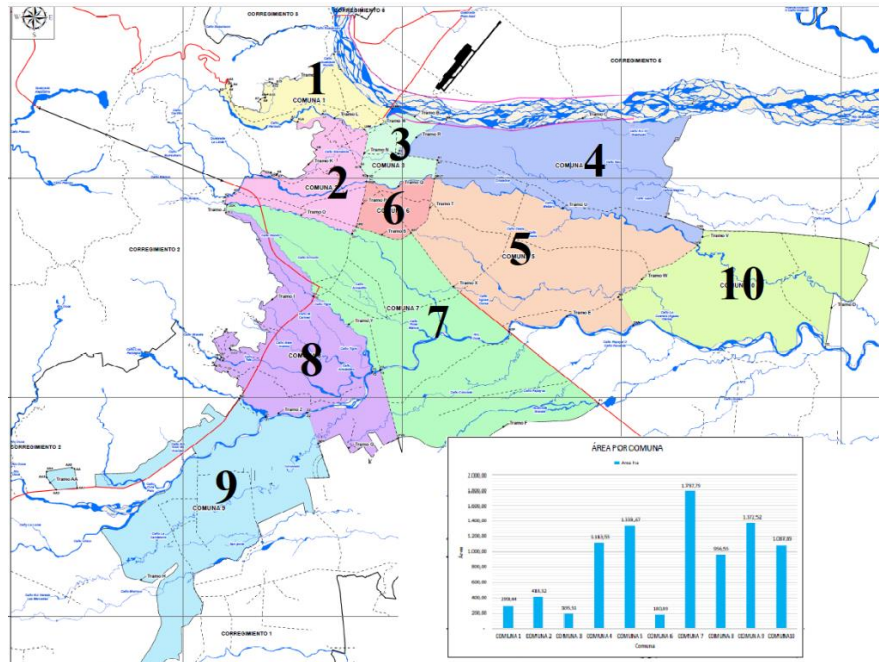
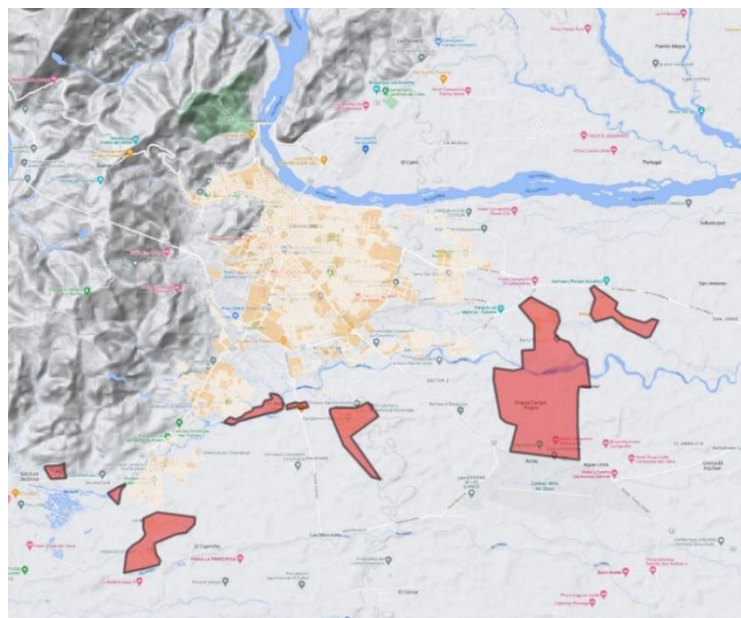


Figura 4-3: Asentamientos ilegales a las afueras de Villavicencio.



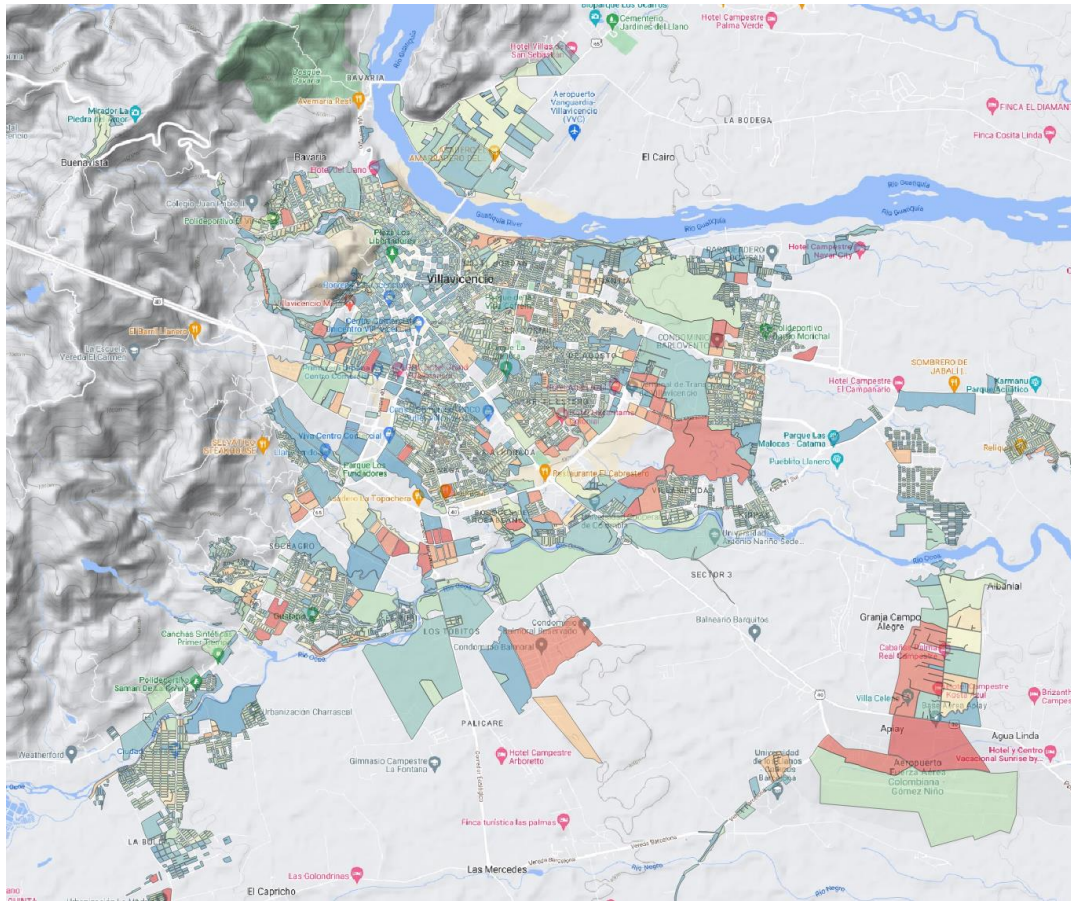
Un análisis preliminar de la ubicación de estos proyectos de equipamiento de la ciudad arroja una concentración de los NAP en el casco antiguo del municipio, específicamente en las comunas 2, 3 y 6. Esta centralización de los NAP dificulta el acceso a estos servicios para la población más alejada, la cual se encuentra a las afueras de la ciudad, donde los NAP disminuyen su cobertura, lo que a su vez ocasiona disminución de calidad de vida de los habitantes de estas zonas.

Por esta razón, se hace necesario hacer una evaluación de la cobertura de los distintos nodos de actividad primaria (salud, seguridad, educación y recreación) en el municipio de Villavicencio, mediante un análisis de accesibilidad media integral determinando las áreas de la ciudad que poseen la mejor cobertura, así como la población realmente impactada por los mismos. Además, esto permite determinar en qué lugares de la ciudad se pueden ubicar nuevos equipamientos de distinta índole, impactando un mayor número de habitantes. Por otro lado, se realizará un análisis de accesibilidad media global que permitirá evaluar las condiciones de oferta de la red vial del municipio de Villavicencio, encontrando las zonas de la ciudad con mejor accesibilidad. En ambas medidas se realizará un análisis comparativo con la población que nos resultarán en indicadores de equidad en el acceso y disfrute de la ciudad a través de la infraestructura vial y la oferta de los nodos de actividad primaria.

4.1 Recolección de información

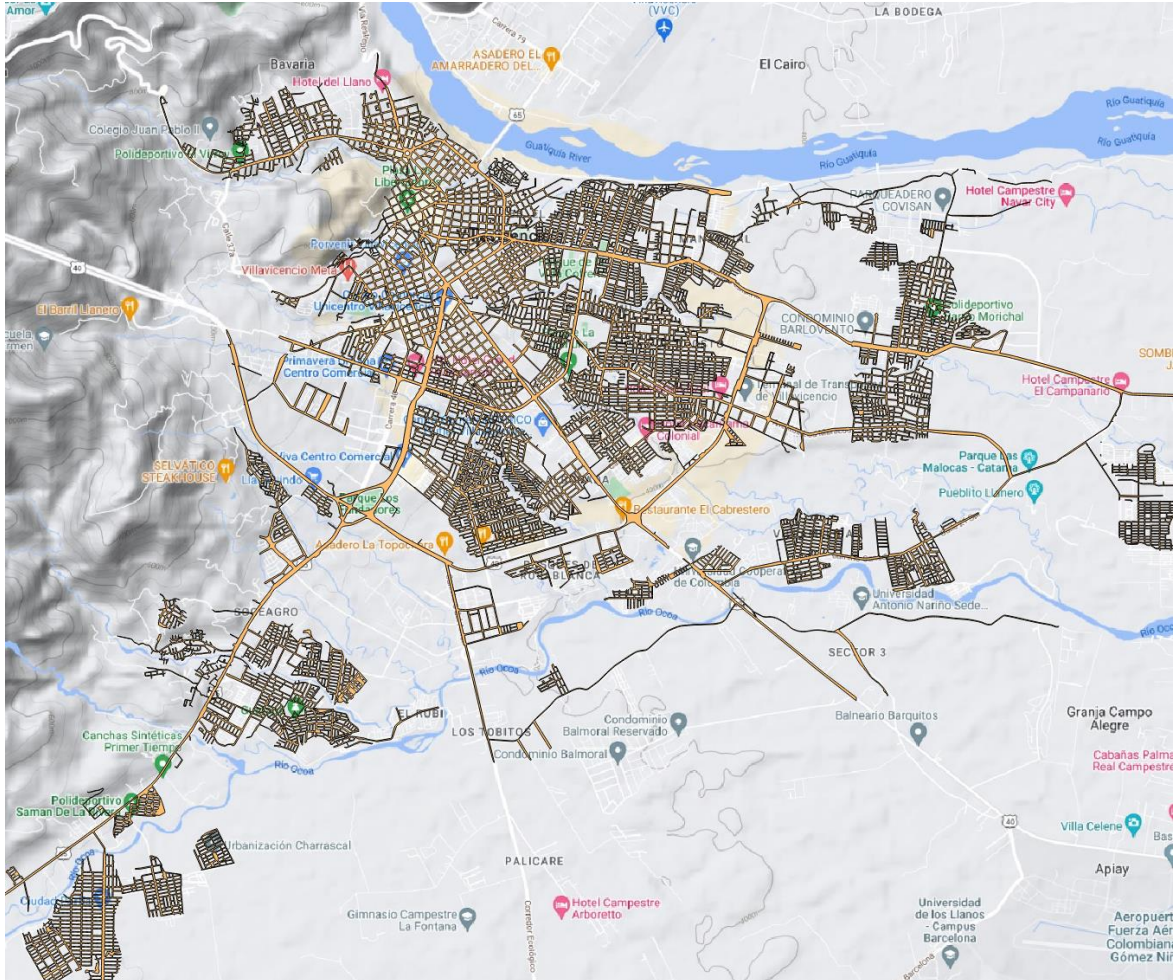
Para nuestro caso de estudio, la información de la población de Villavicencio fue extraída del portal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi disponible (IGAC) en (IGAC, 2023) en formato ESRI Shapefile (*.shp). Esta información aparte de contener las capas cartográficas de las manzanas de Villavicencio también cuenta con la información de cuantas personas habitan en cada manzana. En total se encontraron 5441 manzanas que representan la ubicación de la totalidad de habitantes del casco urbano de Villavicencio como se observa en la Figura 4-4. Para analizar y manipular los archivos de extensión shp utilizamos el software libre y de código abierto QGIS en su versión 3.20.0-Odense.

Figura 4-4: Manzanas de Villavicencio.



Por otra parte, con la ayuda de la base cartográfica del municipio de Villavicencio disponible en el portal del IGAC en (IGAC, 2023) se extrajo la información de las vías de Villavicencio. Debido a que la base cartográfica obtenida del IGAC se encuentra desactualizada, y en estos últimos 5 años el municipio de Villavicencio ha tenido importantes inversiones en sus vías primarias, como en la apertura de nuevos corredores, y la expansión del casco urbano, se completó la información manualmente con cartografía de proveedores de tecnología, en este caso Google Maps. La representación de la red vial de la ciudad de Villavicencio se muestra en la Figura 4-5.

Figura 4-5: Red vial de Villavicencio.



Finalmente se recolectó la información respecto a los NAP de la ciudad la cual fue obtenida manualmente o con ayuda del portal del DANE disponible en (Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, 2023). En este estudio analizamos los siguientes NAP:

1. Educación: Se incluyeron en el análisis 163 instituciones de educación primaria y secundaria oficiales los cuales son 163 establecimientos.
2. Salud: Se incluyeron en el análisis 13 instituciones médicas correspondientes a centros de salud, clínicas y el hospital departamental ubicado en la ciudad.
3. Seguridad: El análisis de seguridad se dividió en dos. El primer subanálisis corresponde a las fuerzas de seguridad de policía. Estas están disponibles en 13 equipamientos compuestas por estaciones de policía y Comandos de Atención Inmediata (CAI). El otro subanálisis de seguridad fue realizado con respecto a los bomberos, encontrando una estación en la ciudad.

-
4. Recreación: Este último análisis se enfocó en los parques, polideportivos y canchas disponibles en la ciudad para actividades de recreación de la ciudadanía. Estas en total son 315 equipamientos.

4.2 Distancias y tiempos de viaje

Como se especificó en la sección anterior, el cálculo de las distancias y tiempos de viaje fue realizado con ayuda de la API de Google denominada “Google Maps Distance Matrix”. Para ello primero se realizó un preprocesamiento de la información el cual es descrito a continuación. Vale la pena resaltar que para realizar el preprocesamiento de los datos recolectados se utilizó el software de programación general Python ejecutado en el entorno de desarrollo integrado (IDE por sus siglas en inglés) Jupyter Notebooks al cual se accedió a través de la plataforma Anaconda. Los códigos de Python para realizar el preprocesamiento y las solicitudes de distancias y tiempos de viaje se encuentran en el repositorio <https://github.com/asleyfer/tesisMSc> dentro del directorio `códigos_python/`.

El preprocesamiento comienza extrayendo los centroides de las manzanas de la ciudad en un archivo plano tipo CSV que contiene la latitud y la longitud de los centroides. Posterior a eso se leen utilizando la librería CSV de Python. Posteriormente se realizan los clústeres utilizando el algoritmo K-means en donde se generaron $k = 200$ clústeres. Esto fue hecho con la ayuda de la librería sklearn de Python. Como resultado se obtuvo 200 clústeres con una distancia promedio de 164 metros desde cada manzana al clúster más cercano y una desviación estándar de 8.3 metros.

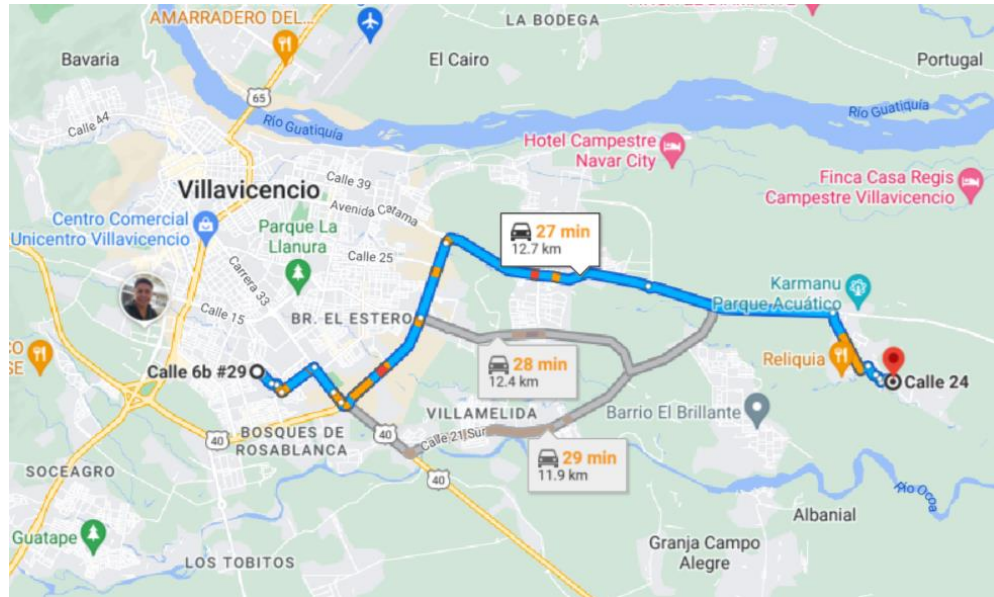
El siguiente paso en la metodología es determinar el vértice vial más cercano a cada clúster. En este trabajo suponemos que la población agrupada en ese clúster comienza su recorrido desde ahí. Esto es hecho con ayuda de la red vial del municipio que contiene la georreferenciación de 58,283 vértices de la ciudad. Igual que con la información de las manzanas, la información de los vértices viales se extrae en un archivo plano CSV y es leída por Python. Debido a la gran cantidad de vértices, establecer la distancia más cercana entre cada vértice y cada clúster conlleva una gran cantidad de cálculos. Debido a lo anterior y para acelerar el tiempo de computación se utilizó la clase `spatial.KDTree` de la librería Scipy. Una vez determinado el vértice más cercano a cada cluster ahora se procede a determinar los tiempos de viaje mediante Google Maps.

Lo anterior se realiza generando solicitudes a la API de Google. Para ello se debe generar una llave desde la plataforma de Google Desarrolladores. Con la llave, las coordenadas de los orígenes y las coordenadas de destino se puede crear una dirección URL con la cual se hacen las solicitudes. La respuesta de la solicitud es un diccionario en formato JSON que contiene el tiempo y distancia entre el origen y el destino. La información que arroja corresponde al tiempo de viaje en vehículo (carro) estimado a la hora en la cual se realiza la consulta. Lo anterior se decodifica y de esa manera se obtiene la distancia y el tiempo de viaje. Para mayor información, los lectores interesados pueden consultar la documentación disponible en (Google Maps Plataform, 2023). La Figura 4-4 presenta un ejemplo de una solicitud manual hecha en la plataforma de Google Maps a través de un navegador de internet y una solicitud hecha a la API de Google Maps. Se puede observar que el tiempo reportado por la API es el mismo que la solicitud manual. De esta manera con la API podemos realizar miles de consultas en un corto tiempo.

Las solicitudes se realizaron para los NAP de la siguiente manera:

1. NAP de educación. Se realizó un total de 32,600 solicitudes que corresponden a los tiempos y distancias desde cada clúster hacia las 163 instituciones educativas. Estas consultas fueron realizadas un día hábil durante la franja horaria de 7:00am a 8:00am para lograr capturar las horas pico de la ciudad.
2. NAP de salud: Se realizó un total de 2,600 solicitudes que corresponden a los tiempos y distancias de viaje desde cada clúster con los 13 equipamientos de salud identificados en la ciudad. La consulta se realizó en la franja horaria pico de un día hábil de la ciudad.
3. NAP de seguridad: Por una parte, se realizó 2,600 solicitudes para conocer los tiempos de viaje y distancias desde los 13 equipamientos de fuerza de policia hacia cada clúster. Por otra parte, se realizó 200 solicitudes para determinar los tiempos de viaje y distancias desde la estación de bomberos hacia los clústeres.
4. NAP de recreación: Para el análisis de este NAP se realizó un total de 36,000 solicitudes para conocer la distancia y tiempo de viaje desde cada clúster a los 316 equipamientos recreativos de la ciudad.

Figura 4-6: Ejemplo de solicitud de tiempos y distancias de viaje utilizando Google Maps Distance Matris API



```

{
  "destination_addresses" : [ "Cl. 24, Villavicencio, Meta, Colombia" ],
  "origin_addresses" : [ "Cl. 7 #29-31, Villavicencio, Meta, Colombia" ],
  "rows" : [
    {
      "elements" : [
        {
          "distance" : {
            "text" : "11.9 km",
            "value" : 11943
          },
          "duration" : {
            "text" : "27 mins",
            "value" : 1623
          },
          "status" : "OK"
        }
      ]
    }
  ],
  "status" : "OK"
}

```

Las anteriores solicitudes dan como resultado 5 matrices de distancias y tiempos de tamaño 200 (total de clústeres) por el número de equipamientos de cada categoría o NAP. Es importante tener en cuenta que para el NAP de seguridad se generaron dos matrices debido a que contempla los análisis de policía y bomberos. Finalmente se determinó para cada cluster de población el equipamiento más cercano y con esa información se realizaron los mapas de curvas isócronas y las ojivas de cobertura poblacional que son presentados en la siguiente subsección.

5. Resultados y análisis

En esta sección presentamos, por una parte, el análisis de accesibilidad territorial de la ciudad de Villavicencio respecto a los NAP bajo estudio. Por otra parte, se presenta la localización de nuevos equipamientos y su impacto en la accesibilidad territorial.

5.1 Análisis de accesibilidad territorial

Para realizar el análisis de accesibilidad territorial se construyeron mapas de curvas isócronas para cada NAP. La Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3, Figura 5-4 y la Figura 5-5 presentan los mapas de isócronas para los NAP de educación, salud, seguridad-policía, seguridad-bomberos y recreación, respectivamente. Estos mapas de isócronas también se encuentran en formato PDF y con mayor calidad en el repositorio <https://github.com/asleyfer/tesisMSc> dentro del directorio mapas_isócronos/. Adicionalmente, en el análisis de accesibilidad territorial se calculó la ojiva porcentual de población acumulada para los NAP bajo estudio la cual se encuentra en la Figura 5-6. Posteriormente se realiza un análisis de los resultados individuales por NAP y el análisis integrado. El objetivo de este análisis es establecer a que servicios dentro de los que están bajo estudio es prioritario para realizar inversiones. Adicionalmente, se pretende establecer en qué zonas de la ciudad tendría mayor beneficio construir equipamiento. Es de resaltar que, para calcular el mapa de curvas isócronas de recreación, la matriz de cálculos está en metros. Es decir, se conoce para cada clúster de población a cuantos metros está el parque más cercano. Asumiendo que una persona camina en promedio a 4 km/h obtuvimos los tiempos de desplazamiento.

Figura 5-1 Mapa de curvas isócronas para los NAP de educación.

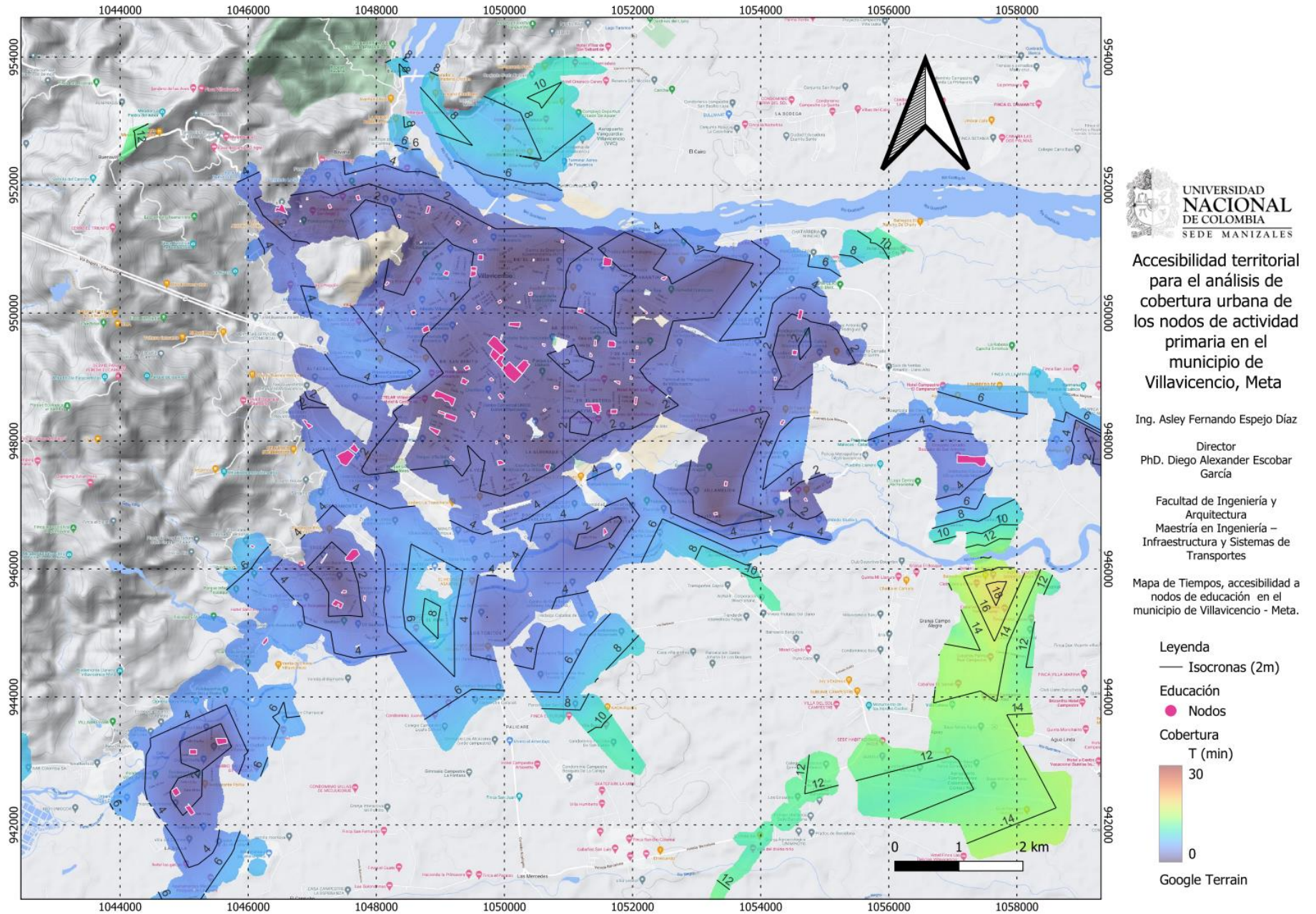


Figura 5-2 Mapa de curvas isócronas para los NAP de salud.

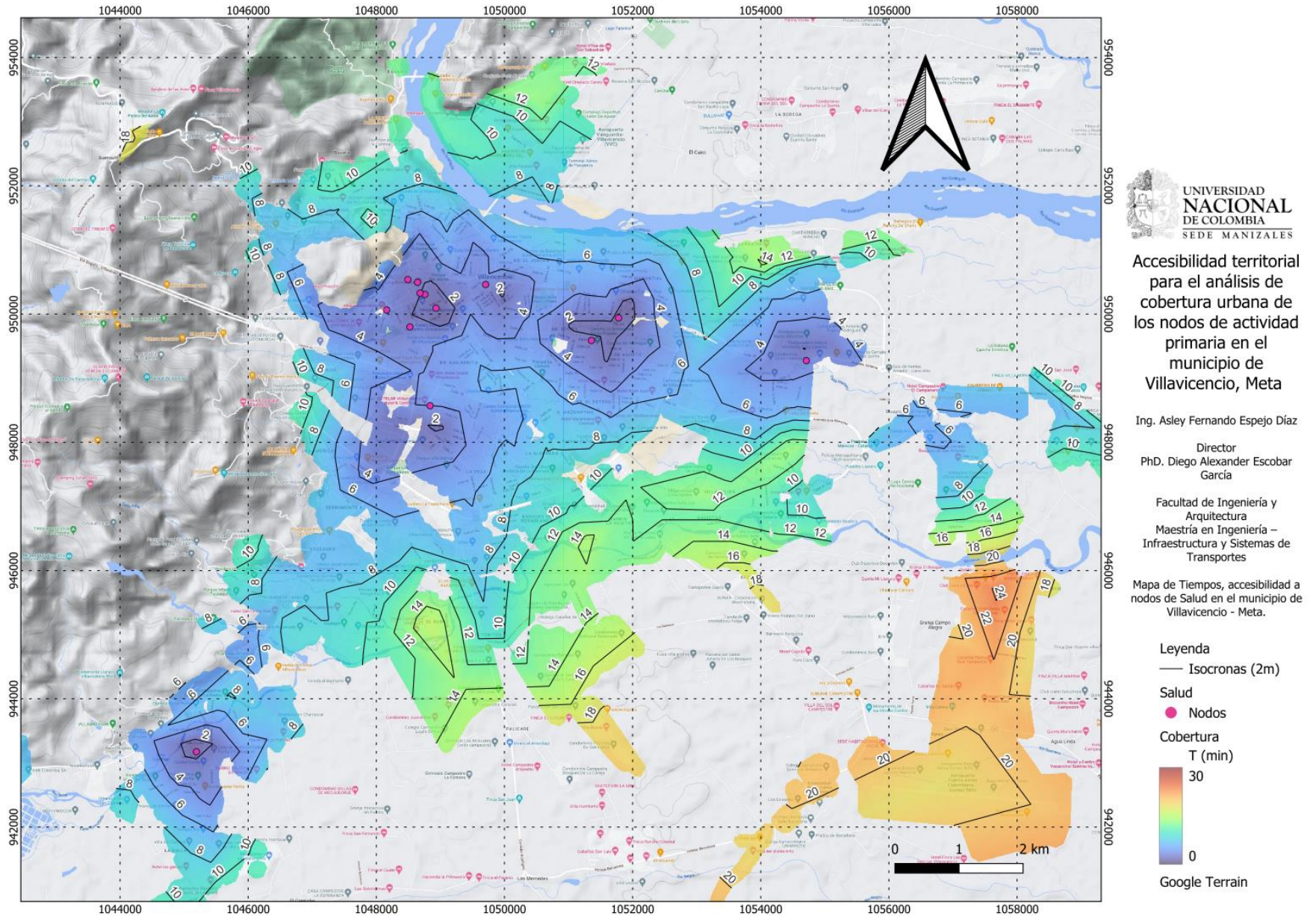


Figura 5-3 Mapa de curvas isócronas para los NAP de seguridad (policía).

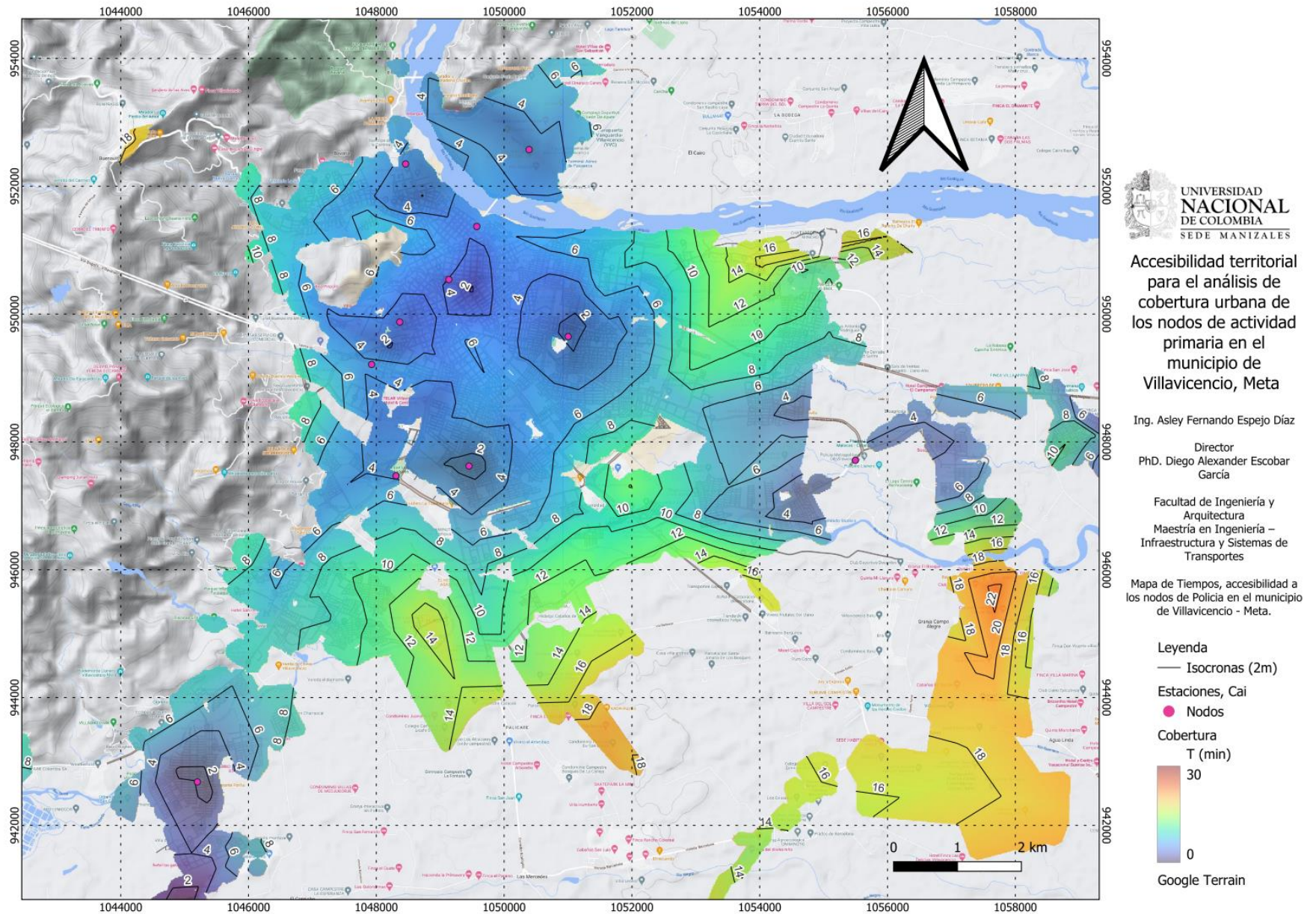


Figura 5-4 Mapa de curvas isócronas para los NAP de seguridad (bomberos).

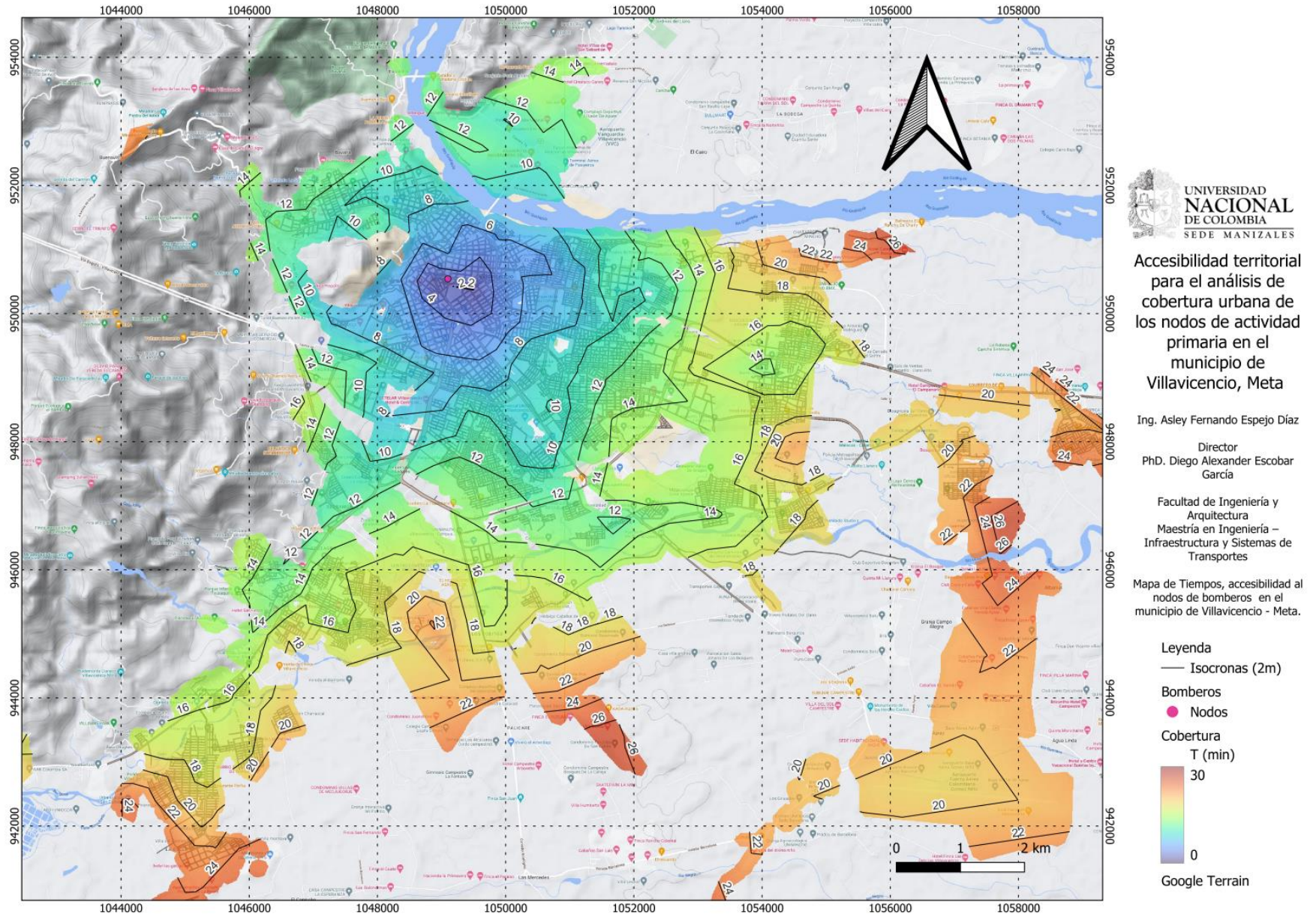
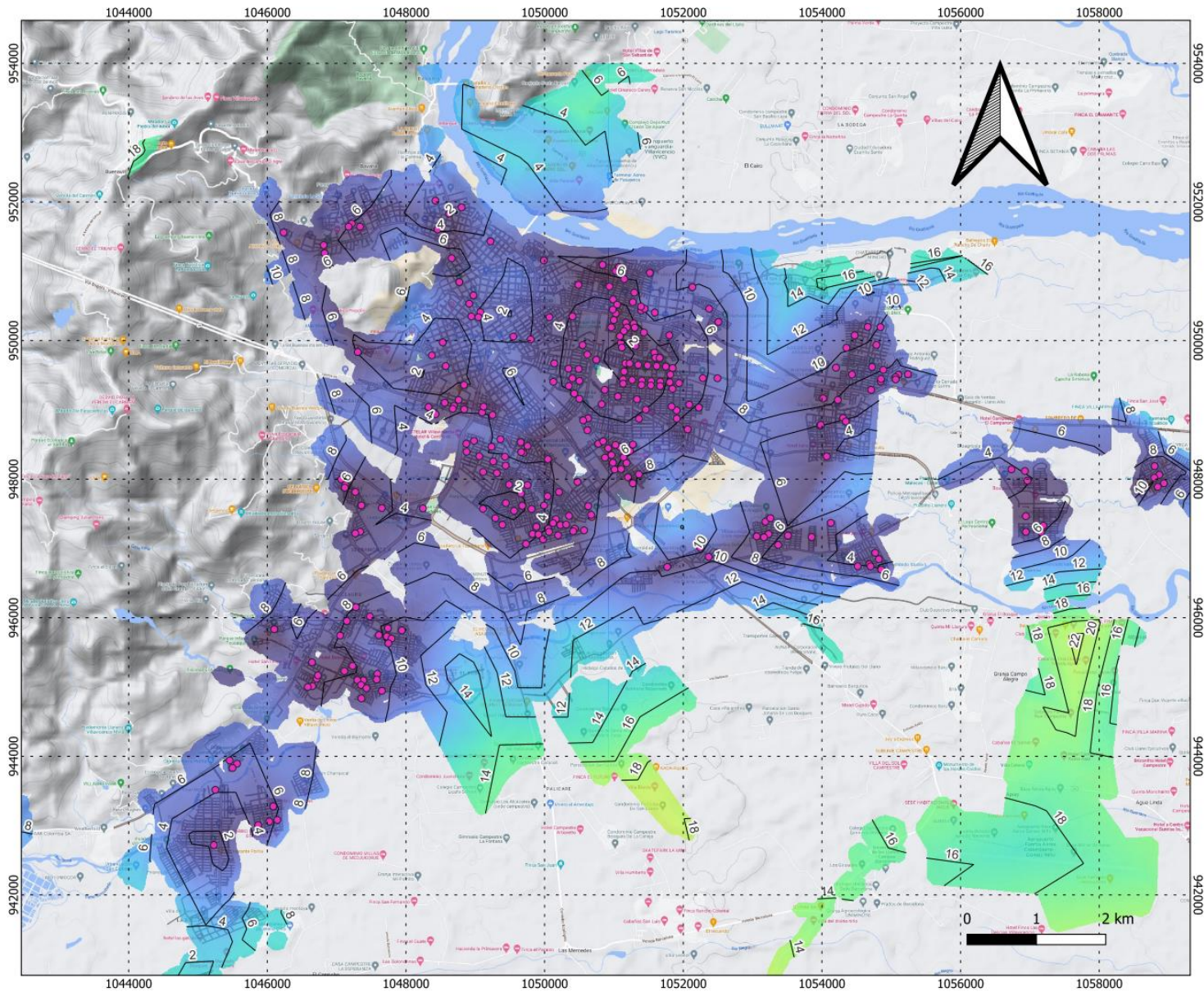


Figura 5-5 Mapa de curvas isócronas para los NAP de recreación.



Accesibilidad territorial para el análisis de cobertura urbana de los nodos de actividad primaria en el municipio de Villavicencio, Meta

Ing. Asley Fernando Espejo Díaz

Director
PhD. Diego Alexander Escobar García

Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Maestría en Ingeniería – Infraestructura y Sistemas de Transportes

Mapa de Tiempos, accesibilidad a nodos de recreación en el municipio de Villavicencio - Meta.

Leyenda

— Isocronas (2m)

Recreación

● Nodos

Cobertura

T (min)

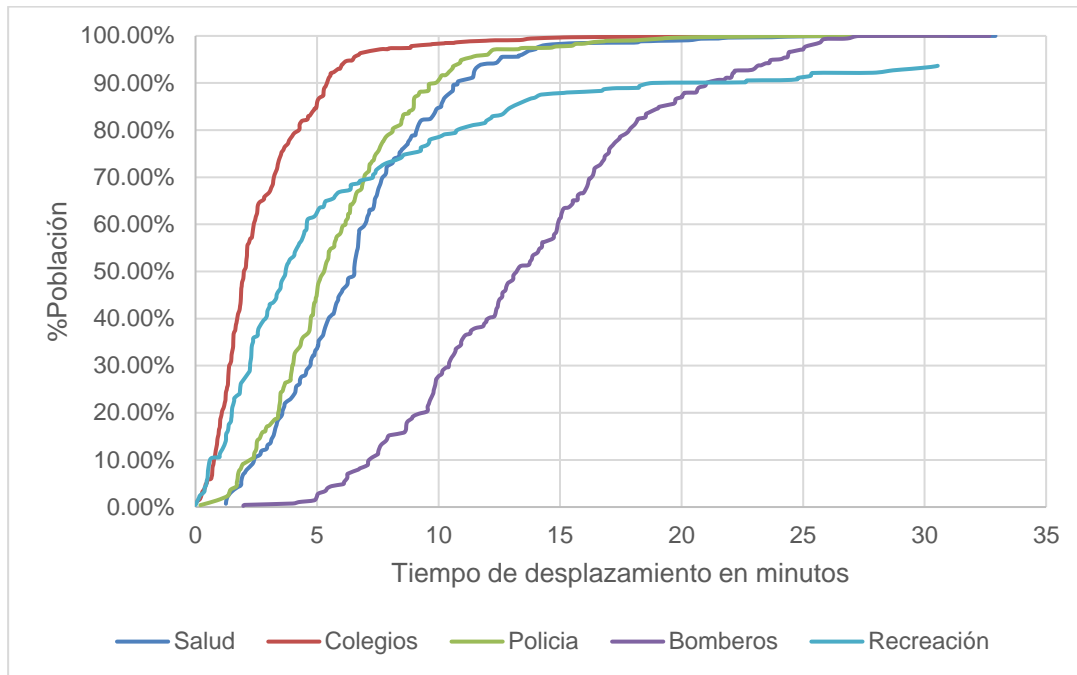
30

0

Google Terrain

0 1 2 km

Figura 5-6 Ojiva porcentual acumulada para los NAP bajo estudio.



A continuación, se presenta el análisis de los mapas de curvas isócronas y de las ojivas porcentuales acumuladas por cada categoría de NAP. Los archivos en donde se analizaron las matrices de distancia y se elaboraron las curvas isócronas están disponibles en el repositorio <https://github.com/asleyfer/tesisMSc> dentro del directorio matrices_resultados/.

Educación: De la Figura 5-1 que corresponde al mapa de curvas isócronas de educación pública (colegios oficiales) se puede concluir que la oferta es suficiente. Los resultados indican que un 84.74% de la población tiene a 5 minutos o menos en vehículo un colegio oficial. Respecto a la ojiva porcentual de población acumulada de la Figura 5-6, esta resultó la mejor entre los NAP estudiados. Esta curva tiene un crecimiento importante en el primer intervalo (0-5 minutos) mientras que en el segundo intervalo (5-10 minutos) supera el 98% de la población. En caso de que la ciudad decida invertir en nuevos equipamientos de educación públicos debe revisar temas de capacidad instalada, debido a que la accesibilidad territorial para la población es suficiente.

Salud: La Figura 5-2 corresponde al mapa de curvas isócronas de salud. Esta figura confirma el análisis preliminar realizado previamente que concluyó que los NAP están centralizados en el casco urbano antiguo de la ciudad que corresponde a las comunas 2,

3 y 6. Aunque el 84.56% de población está entre los dos primeros intervalos (0-10 minutos), aproximadamente 101 mil personas se demoran más de 10 minutos en llegar a un centro de salud. Esto puede traer consecuencias mortales en caso de urgencias vitales de esa población. Adicionalmente, de la Figura 5-2 se puede concluir que la cobertura en salud de las comunas 5 y 7 es deficiente. Es por lo anterior que en la próxima subsección se propondrán equipamientos en esas comunas y se evaluará el impacto en la ojiva de cobertura poblacional para esta categoría de NAP.

Seguridad: En esta categoría de NAP se analizaron las fuerzas de seguridad (policía) y los bomberos. Es de resaltar que en estos casos los tiempos de viaje fueron calculados desde los NAP hacia los vértices que representan las ubicaciones de la población. Lo anterior es que, a diferencia de los NAP de educación y de salud, en casi la totalidad de casos la policía y los bomberos se dirigen hacia la población. La Figura 5-3 presenta el mapa de curvas isócronas de la policía. De acuerdo con esta figura y con la ojiva de cobertura acumulada de la Figura 5-6 se observa que más del 90% de la población está dentro de los 10 minutos y respecto a las otras categorías esto representa un buen desempeño. Por el contrario, los resultados de bomberos no son tan positivos. La Figura 5-4 presenta el mapa de curvas isócronas para los servicios de bomberos. De este mapa se puede observar que las comunas 4, 5, 7, 8, 9 y 10 presentan zonas donde las franjas de las curvas isócronas corresponden a más de 10 minutos. Lo anterior es confirmado por la gráfica de ojiva de cobertura poblacional. Esta ojiva es la de peor desempeño entre las estudiadas. Aproximadamente un 40% de la población está en los intervalos más hacia la derecha, es decir, los de más de 15 minutos. Inclusive hay un porcentaje pequeño de la población estudiada que está a más de 30 minutos. Estos tiempos pueden ser muy altos en caso de incendios y requerirse acción de los bomberos. Es por lo anterior que en la próxima subsección se propondrán equipamientos de bomberos en esas comunas y se evaluará el impacto en la ojiva de cobertura poblacional para esta categoría de NAP.

Recreación: La última categoría de NAP abordada en este trabajo es el de recreación. La Figura 5-5 presenta el mapa de curvas isócronas para recreación. De esta Figura y de la Figura 5-6 que es la ojiva porcentual se puede concluir que la ciudad tiene buen equipamiento en recreación. De esas figuras se puede observar que, aproximadamente el 80% de la población está a 10 o menos minutos caminando de un parque y aproximadamente el 90% a 15 minutos o menos.

En la siguiente subsección se presentará la propuesta de nuevos equipamientos para los NAP de salud y de seguridad-bomberos los cuales fueron identificados como los de peores resultados en la ciudad.

5.2 Propuesta de nuevos equipamientos

En esta subsección se aplica el modelo de optimización presentado en la subsección 3.4. con el objetivo de seleccionar las ubicaciones que minimicen los tiempos de viaje requeridos por población y así mejorar la accesibilidad territorial. El modelo de programación matemática fue implementado en el software IBM Cplex. La codificación del modelo y los archivos fuente se encuentran en el repositorio <https://github.com/asleyfer/tesisMSc> dentro del directorio Modelo_de_optimización/. A continuación, se presenta la selección de nuevos equipamientos para salud y luego para bomberos.

5.2.1 Nuevos equipamientos en Salud

Como insumo del modelo de optimización se requiere información de la localización de los clústeres de población (conjunto I), localización de los equipamientos de salud existentes (conjunto J^*), localización de las ubicaciones candidatas (conjunto J^{**}), número de equipamientos nuevos a implementar y finalmente los tiempos de viaje t_{ij} entre los clústeres de población y los actuales y posibles equipamientos. La Tabla 5-1 presenta la localización de los equipamientos actuales y de los candidatos los cuales fueron seleccionados teniendo en cuenta terrenos disponibles en las localidades de Villavicencio que peor accesibilidad territorial tiene con base en los resultados de la anterior sección.

Tabla 5-1: Localización de equipamientos de salud actuales y propuestos

Id	Nombre	Latitud	Longitud
1	Hospital Departamental	4.14449528	-73.6437534
2	Clinica Martha	4.14686996	-73.6390494
3	Clinica Meta	4.14474753	-73.636807
4	Clinica UCC	4.14839505	-73.6394091
5	Servimedicos	4.14210669	-73.640478
6	Cemi	4.14878484	-73.6407691
7	Centro de salud Barzal	4.14668573	-73.6383766
8	Centro de salud El Porvenir	4.14807557	-73.6298372
9	Centro de salud Esperanza	4.13098551	-73.6376471

10	Centro de Salud Morichal	4.13731734	-73.5847618
11	Centro de salud Popular	4.14017234	-73.6149691
12	Centro de salud Porfia	4.08220585	-73.6705198
13	Centro de salud Recreo	4.14336566	-73.6111542
14	Localización potencial 1	4.11969212	-73.6205949
15	Localización potencial 2	4.12411166	-73.6172046
16	Localización potencial 3	4.12891072	-73.6086917
17	Localización potencial 4	4.12649229	-73.6198604
18	Localización potencial 5	4.10701926	-73.6551738

Adicionalmente se realizaron nuevas consultas del tiempo de viaje desde los hogares a las localizaciones potenciales para determinar el parámetro t_{ij} . Para este análisis estudiaremos el impacto de abrir 1 y 2 equipamientos de salud considerando los 13 equipamientos de salud existentes en la ciudad. Por lo tanto, el parámetro P del modelo de optimización fue establecido en 14 y 15 para escoger la ubicación de 1 y 2 equipamientos de salud adicionales, respectivamente. La Figura 5-7 y la Figura 5-8 presentan los mapas de isócronas para salud considerando 1 y 2 equipamientos adicionales, respectivamente. Adicionalmente la Figura 5-9 presenta la ojiva porcentual acumulada en donde se presenta la situación actual y los dos escenarios bajo estudio.

Con base en los resultados se puede observar una reducción de tiempos de desplazamiento de la población a los servicios de salud. Un ejemplo de ello es que dentro del primer intervalo que es de 0 a 5 minutos, en la situación actual sólo el 33.62% de la población está en ese rango a los servicios de salud. En el escenario 1 en donde se aumenta un equipamiento de salud localizado utilizando el modelo de optimización un 39.88% de la población estaría dentro de ese rango. Adicionalmente, en el caso de ubicar dos nuevos equipamientos de salud en las localizaciones optimas encontradas con el modelo matemático un 45.30% de la población estaría en ese rango. Lo anterior representa un aumento de cobertura del 6.26% y 11.68% en el escenario 1 y 2 respecto a la situación actual, lo que es 26,688 y 49,790 habitantes respectivamente. Lo anterior puede ser decisivo en caso de que se requieran servicios de urgencia en donde demoras en cuestión de minutos pueden tener desenlaces fatales.

Figura 5-7 Mapa de curvas isócronas para los NAP de salud actuales y considerando 1 equipamiento adicional.

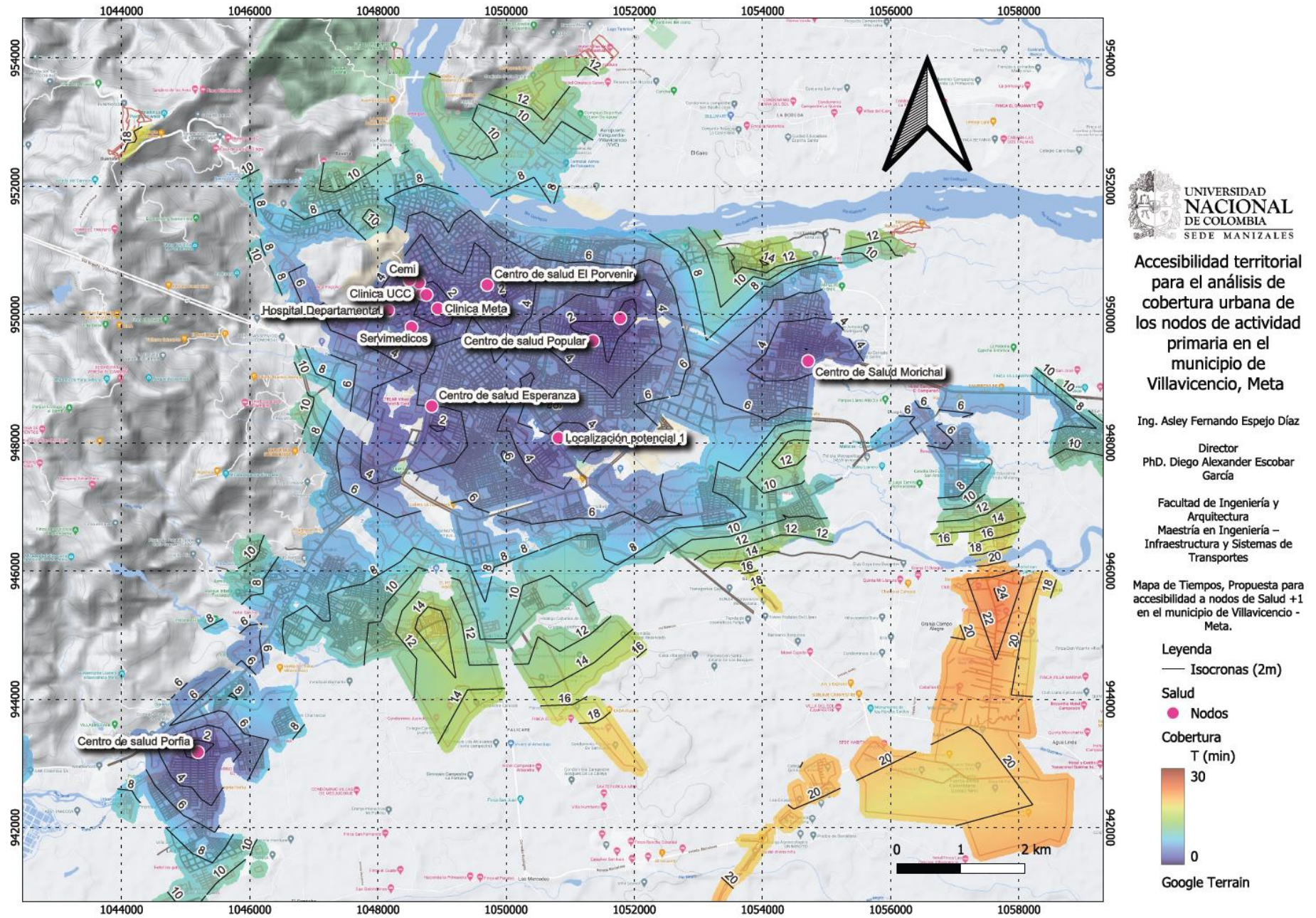


Figura 5-8 Mapa de curvas isócronas para los NAP de salud actuales y considerando 2 equipamientos adicionales.

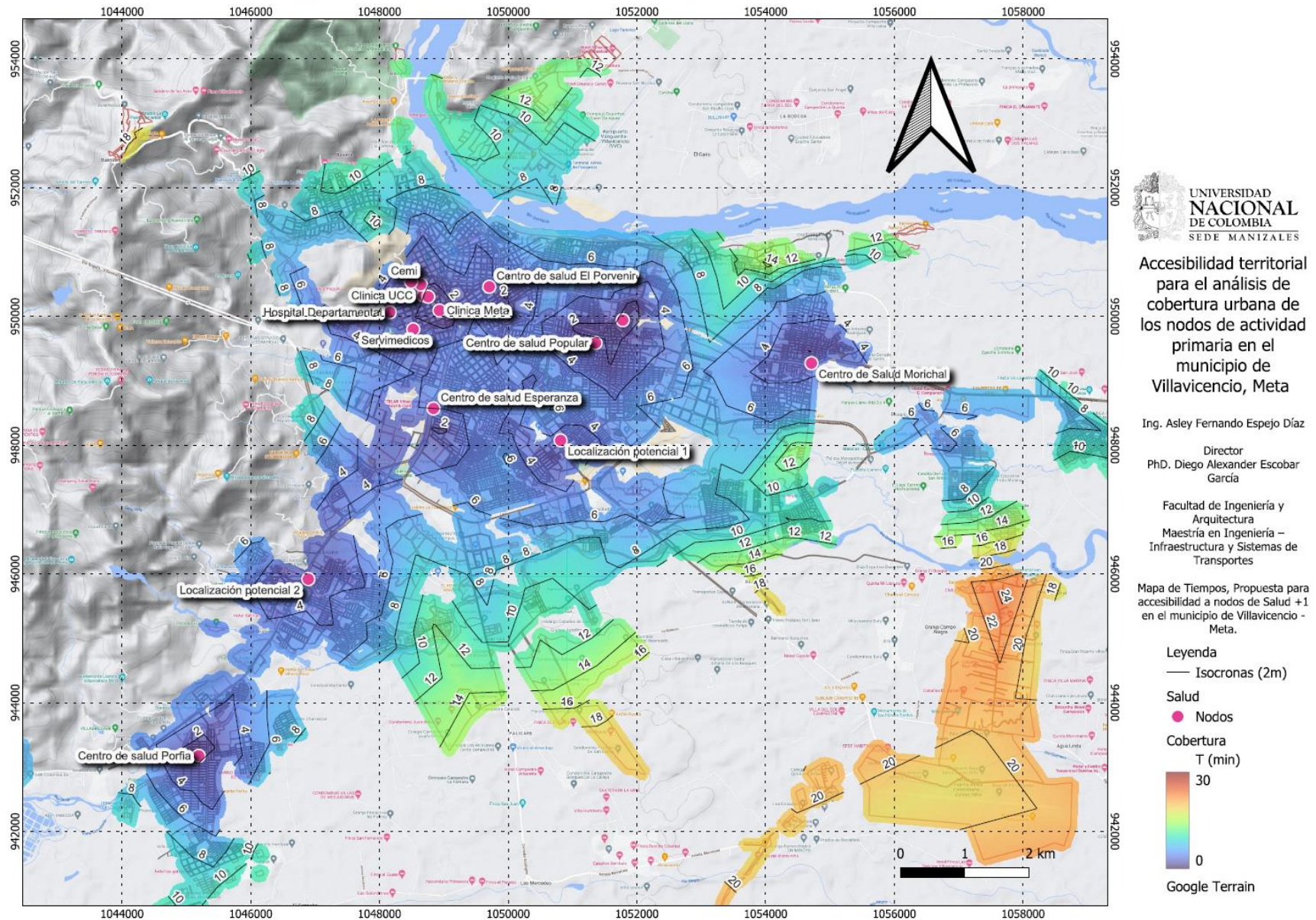
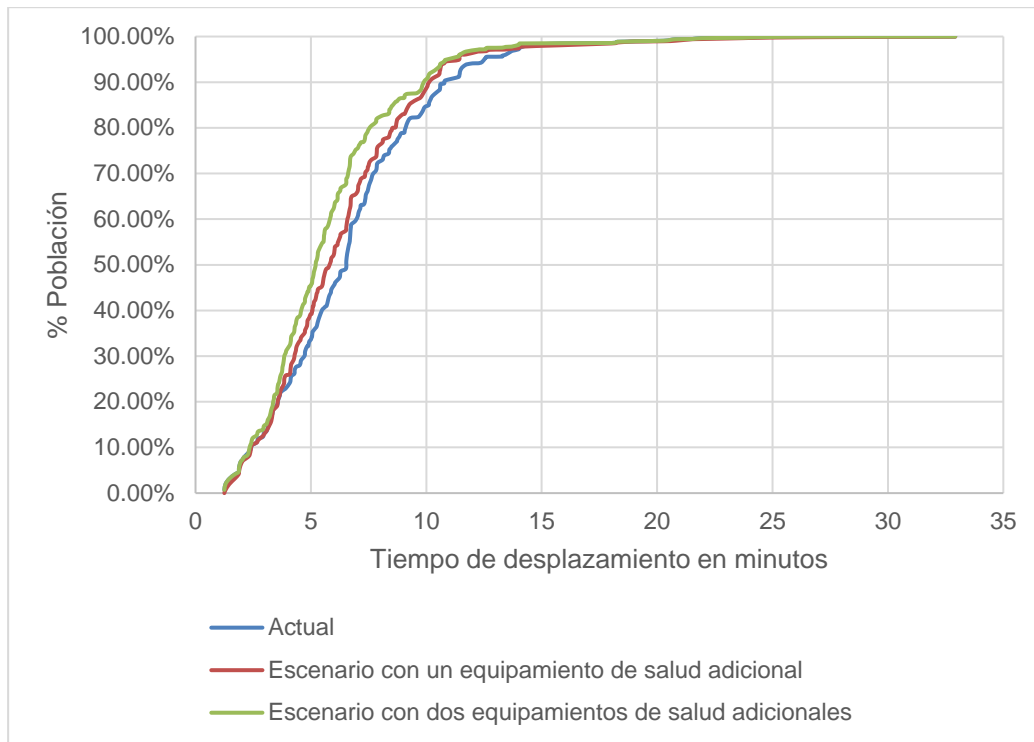


Figura 5-9 Ojiva porcentual acumulada para la situación actual y los escenarios del análisis de salud



5.2.2 Nuevos equipamientos en seguridad - bomberos

Al igual que para la propuesta de nuevos equipamientos de salud, para la propuesta de una nueva estación de bomberos se debe tener en cuenta los equipamientos existentes y las ubicaciones potenciales para la nueva estación de bomberos. Estos últimos fueron ubicados con base en ubicaciones que pueden ser utilizadas por la ciudad para ello. La Tabla 5-2 contiene la localización de la estación actual y los sitios candidatos para una nueva estación. Es de resaltar que los archivos para el análisis de los tiempos de viaje, construcción de ojivas y los mapas resultantes de la selección de nuevos equipamientos para salud y seguridad-bomberos están disponibles en el repositorio <https://github.com/asleyfer/tesisMSc> dentro del directorio Análisis_nuevos_equipamientos/

Tabla 5-2: Localización de equipamientos de salud actuales y propuestos

Id	Nombre	Latitud	Longitud
1	Estación de bomberos de Villavicencio	4.148923	-73.635258
2	Localización potencial 1	4.1095554	-73.6550236
3	Localización potencial 2	4.10154238	-73.6500275
4	Localización potencial 3	4.14391639	-73.6100244

5	Localización potencial 4	4.1292535	-73.6069264
6	Localización potencial 5	4.12649229	-73.6198604

La Figura 5-10 muestra la ojiva porcentual acumulada para la situación actual y añadiendo una estación de bomberos ubicada en la localización óptima determinada con el modelo de programación matemática. Adicionalmente la Figura 5-11 presenta el mapa de isócronas para seguridad-bomberos considerando el equipamiento adicional. De los resultados se puede concluir que la mejora con el nuevo equipamiento es significativa. Dentro de los intervalos 1 y 2 que representa la población para la cual un vehículo de bomberos puede llegar en 10 minutos o menos pasa de agrupar el 27.77% de la población en la situación actual a agrupa 51.04% con un equipamiento más. Lo anterior se traduce en 102,188 personas sobre las cuales los bomberos tienen un tiempo de respuesta menor.

Figura 5-10 Ojiva porcentual acumulada para la situación actual y escenario del análisis de Seguridad-Bomberos

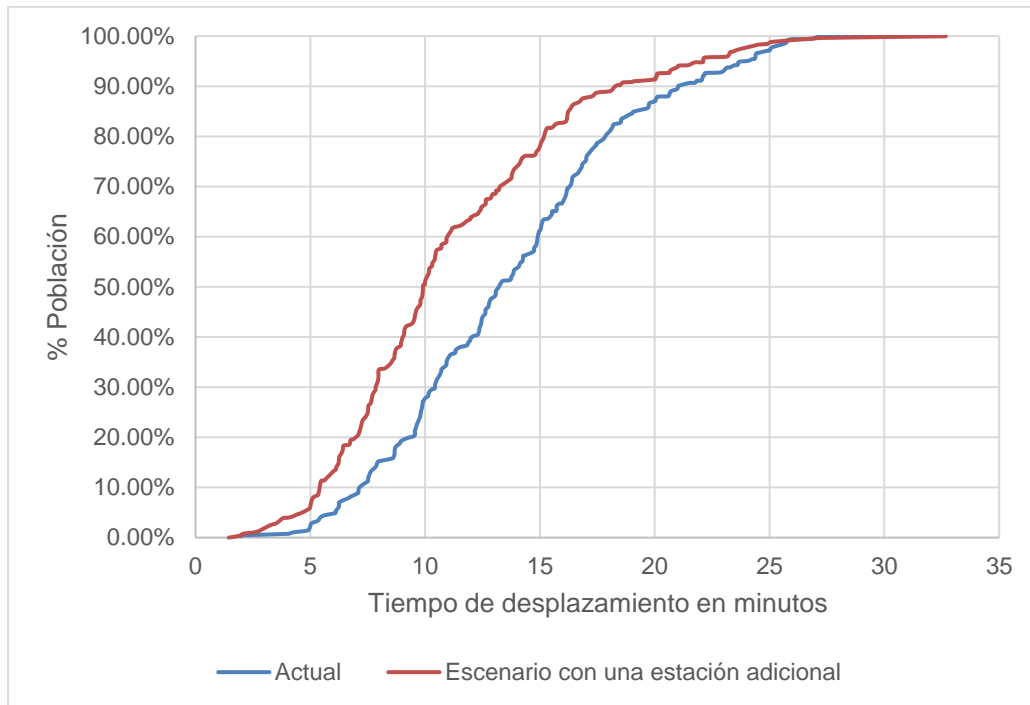
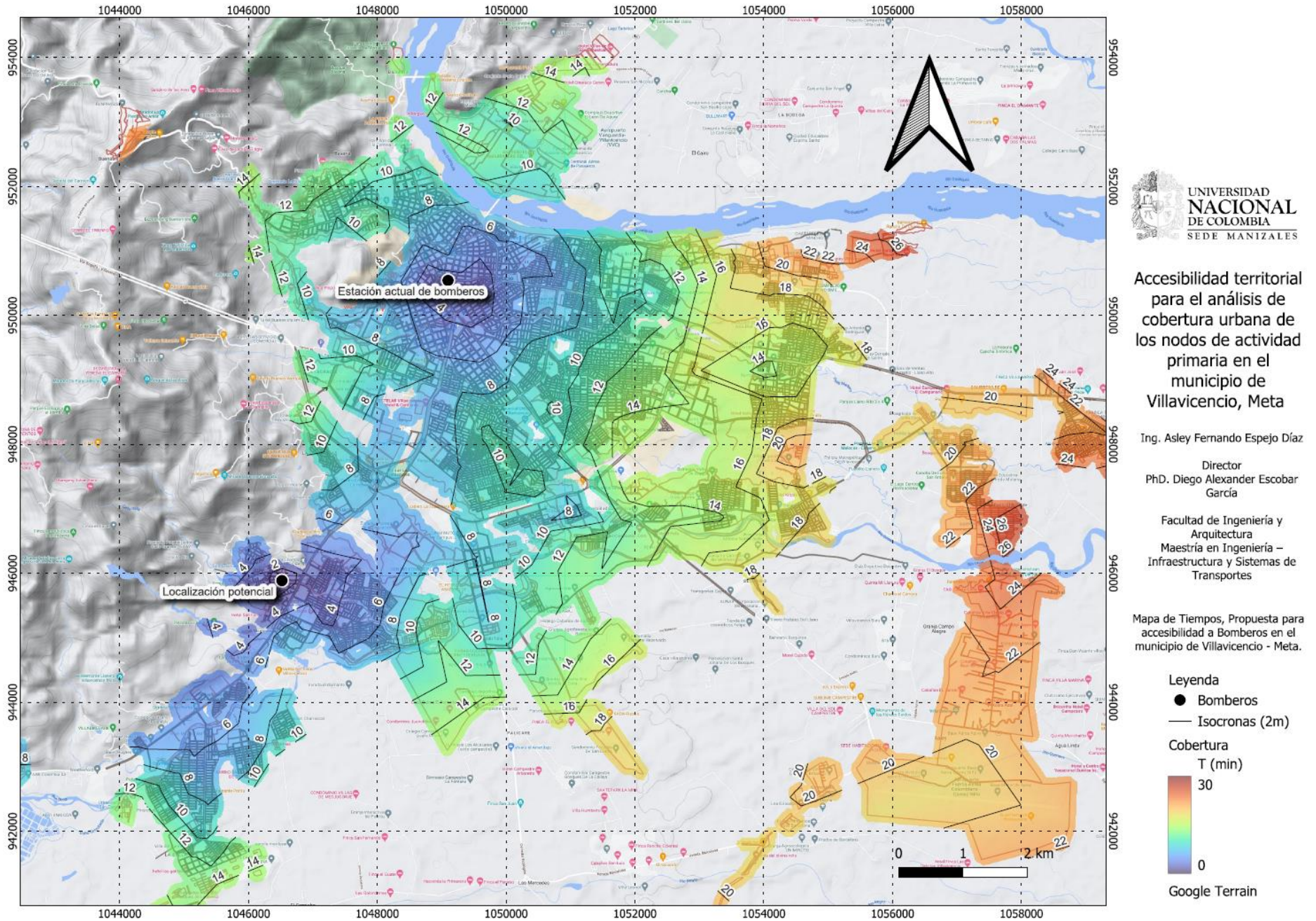


Figura 5-11 Mapa de curvas isócronas para los NAP de seguridad – Bomberos considerando 1 equipamiento adicional.



6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En este trabajo final de maestría se propuso una metodología para estudiar la accesibilidad territorial y proponer nuevos equipamientos para mejorarla. La metodología está compuesta de 4 fases de la siguiente manera. La primera fase recolecta la información de la población, la infraestructura vial y los equipamientos urbanos. La segunda fase determina los tiempos y distancia de viaje de la población a los equipamientos urbanos. La tercera fase analiza la accesibilidad territorial determinando las zonas de la ciudad que presentan deficiencias en equipamientos urbanos. Finalmente, la fase 4 determina nuevos equipamientos minimizando los tiempos de recorrido de los habitantes. Esta metodología fue utilizada en el caso de estudio inspirado en la ciudad de Villavicencio, capital del departamento de meta. Mediante la metodología propuesta y el caso de estudio se dio cumplimiento al objetivo general y los 4 objetivos específicos presentados en la introducción. Los principales resultados del caso de estudio muestran que la metodología logra analizar la accesibilidad territorial y proponer nuevos equipamientos en la ciudad. Se determinó que las categorías de NAP en los que la ciudad debe invertir son salud y bomberos. Se encontró que siguiendo la metodología se pueden localizar nuevos equipamientos que aumenten la accesibilidad territorial de Villavicencio. En el caso de salud, con 1 o 2 nuevos equipamientos una parte importante de la población mejora su accesibilidad a salud. En el caso de bomberos, se encontró que la mejor ubicación de una estación es en los límites de las comunas 8 y 9, con lo que se impacta mayor población mejorando los tiempos de respuesta del servicio de bomberos.

6.2 Recomendaciones

Trabajo futuro, puede incluir un análisis del servicio de educación que contemple la oferta de colegios privados y universidades. Adicionalmente, trabajos futuros pueden incluir modelos de optimización que contemplen tiempos de transporte recolectados en distintas franjas horarias.

Bibliografía

- Adams, A. M., Ahmed, R., Ahmed, S., Yusuf, S. S., Islam, R., Zakaria Salam, R. M., & Panciera, R. (2020). Modelling improved efficiency in healthcare referral systems for the urban poor using a geo-referenced health facility data: the case of Sylhet City Corporation, Bangladesh. *BMC Public Health*, 20(1), 1476.
<https://doi.org/10.1186/s12889-020-09594-5>
- Alcaldía de Villavicencio. (2023). *Villavicencio*. <https://villavicencio.gov.co/>
- Batty, M. (2008). The Size, Scale, and Shape of Cities. *Science*, 319(5864), 769–771.
<https://doi.org/10.1126/science.1151419>
- Batty, M. (2009). Accessibility: In Search of a Unified Theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(2), 191–194. <https://doi.org/10.1068/b3602ed>
- Biehl, D. (1991). *The Role of Infrastructure in Regional Development*.
https://books.google.com.co/books?id=D5%5C_IzWEACAAJ
- Bock, H.-H. (2008). Origins and extensions of the k-means algorithm in cluster analysis. *Electronic Journal for History of Probability and Statistics*, 4(2).
- Bunge, W. (1979). PERSPECTIVE ON THEORETICAL GEOGRAPHY. *Annals of the Association of American Geographers*, 69(1), 169–174.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1979.tb01248.x>
- Cardona, S., Escobar, D. A., & Moncada, C. A. (2018). Análisis de Accesibilidad como Herramienta para la Generación de Zonas Libres de Tráfico. Caso del Municipio de La Dorada en Colombia. *Información Tecnológica*, 29(5), 203–214.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000500203>
- Clark, B. (2003). Ebenezer Howard And The Marriage Of Town And Country. *Organization & Environment*, 16(1), 87–97.
<https://doi.org/10.1177/1086026602250258>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 Colombia*. <https://sitios.dane.gov.co/cnpv>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2023). *Estadísticas por tema*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema>
- Encyclopedia of Mathematics. (2023). *Encyclopedia of Mathematics*.
http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Mathematical_programming&oldid=15875

- Escobar, D. A., Montoya, J. A., & Galindo, J. A. (2018). Coverage evaluation for recreational and cultural facilities through accessibility in Pitalito, Colombia. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(84), 4147–4158. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.87334>
- Escobar, D. A., Montoya, J. A., & Moncada, C. A. (2018). Analysis of coverage for armed force land use in Pitalito (Colombia), through territorial accessibility. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(65), 3233–3244. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.87326>
- Escobar, D. A., Urazán, C. F., & Moncada, C. A. (2017). Análisis de Cobertura Urbana de los Nodos de Actividad Primaria Mediante un Estudio de Accesibilidad Territorial en Quibdó (Colombia). *Información Tecnológica*, 28(5), 177–190. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000500018>
- Freemark, Y., Bliss, A., & Vale, L. J. (2022). Housing Haussmann's Paris: the politics and legacy of Second Empire redevelopment. *Planning Perspectives*, 37(2), 293–317. <https://doi.org/10.1080/02665433.2021.1937293>
- García-Albertos, P., Picornell, M., Salas-Olmedo, M. H., & Gutiérrez, J. (2019). Exploring the potential of mobile phone records and online route planners for dynamic accessibility analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 125, 294–307. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.02.008>
- Geurs, K. T., Boon, W., & Van Wee, B. (2009). Social Impacts of Transport: Literature Review and the State of the Practice of Transport Appraisal in the Netherlands and the United Kingdom. *Transport Reviews*, 29(1), 69–90. <https://doi.org/10.1080/01441640802130490>
- Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>
- Gibbons, S., & Vignoles, A. (2012). Geography, choice and participation in higher education in England. *Regional Science and Urban Economics*, 42(1–2), 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2011.07.004>
- Gold, J. R. (1998). Creating the Charter of Athens: CIAM and the functional city, 1933-43. *Town Planning Review*, 69(3), 225. <https://doi.org/10.3828/tpr.69.3.2357285302gl032l>
- Google. (2022). *Distance Matrix API overview*. <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/overview>
- Google Maps Plataform. (2023). *Distance Matrix API*.

- <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/>
- Hall, P. (1998). *Cities in Civilization: Culture, Innovation, and Urban Order*. Weidenfeld & Nicolson. <https://books.google.com.co/books?id=0AmeQgAACAAJ>
- Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. <https://doi.org/10.1080/01944365908978307>
- IGAC. (2023). *Consulta Catastral*. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/consulta-catastral>
- Ingram, D. R. (1971). The concept of accessibility: A search for an operational form. *Regional Studies*, 5(2), 101–107. <https://doi.org/10.1080/09595237100185131>
- Karst, T., & van Eck, J. R. R. (2003). Evaluation of Accessibility Impacts of Land-Use Scenarios: The Implications of Job Competition, Land-Use, and Infrastructure Developments for the Netherlands. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(1), 69–87. <https://doi.org/10.1068/b12940>
- Kim, H., & Ham, Y. (2019). Participatory sensing-based geospatial localization of distant objects for disaster preparedness in urban built environments. *Automation in Construction*, 107, 102960. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102960>
- Koester, F. (1914). *Modern City Planning and Maintenance*. McBride, Nast. <https://books.google.com.co/books?id=OZIdAAAAMAAJ>
- Manning, C., Raghavan, P., & Schütze, H. (2009). *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press.
- Mao, L., & Nekorchuk, D. (2013). Measuring spatial accessibility to healthcare for populations with multiple transportation modes. *Health & Place*, 24, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2013.08.008>
- Montoya, J. A., Escobar, D. A., & Younes, C. (2018). Coverage of educational centers from territorial accessibility in the municipality of Pitalito - Huila, Colombia. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(61), 3021–3033. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.87310>
- Morris, J. M., Dumble, P. L., & Wigan, M. R. (1979). Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research Part A: General*, 13(2), 91–109. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(79\)90012-8](https://doi.org/10.1016/0191-2607(79)90012-8)
- Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119993308>
- Ortúzar S, J. de D. (2012). *Modelos de demanda de transporte*. Eds. Universidad Católica

- de Chile. <https://books.google.com.co/books?id=9e1TDwAAQBAJ>
- Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3), 423–447. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6)
- Pirie, G. H. (1979). Measuring Accessibility: A Review and Proposal. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 11(3), 299–312. <https://doi.org/10.1068/a110299>
- Shen, G., Wang, Z., Zhou, L., Liu, Y., & Yan, X. (2020). Home-Based Locational Accessibility to Essential Urban Services: The Case of Wake County, North Carolina, USA. *Sustainability*, 12(21), 9142. <https://doi.org/10.3390/su12219142>
- Tahmasbi, B., Mansourianfar, M. H., Haghshenas, H., & Kim, I. (2019). Multimodal accessibility-based equity assessment of urban public facilities distribution. *Sustainable Cities and Society*, 49, 101633. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101633>
- Talen, E., & Anselin, L. (1998). Assessing Spatial Equity: An Evaluation of Measures of Accessibility to Public Playgrounds. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 30(4), 595–613. <https://doi.org/10.1068/a300595>
- Wan, N., Zou, B., & Sternberg, T. (2012). A three-step floating catchment area method for analyzing spatial access to health services. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(6), 1073–1089. <https://doi.org/10.1080/13658816.2011.624987>
- Wang, Y., Deng, Y., Ren, F., Zhu, R., Wang, P., Du, T., & Du, Q. (2020). Analysing the spatial configuration of urban bus networks based on the geospatial network analysis method. *Cities*, 96, 102406. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102406>