

Ing. Bloy Fujimoly M. Lormeus

Optimización de líneas de autobuses de una zona metropolitana de densidad poblacional mayor a 100 hab. /km² mediante algoritmos genéticos.

2021



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Optimización de líneas de autobuses de una zona metropolitana de densidad poblacional mayor a 100 hab. /km² mediante algoritmos genéticos.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Bloy Fujimoly M. Lormeus

Dirigido por:

Dr. Ricardo Montoya Zamora

C.U. Santiago de Querétaro, Querétaro. Noviembre 2021



Facultad de Ingeniería
Maestría En Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Optimización de líneas de autobuses de una zona metropolitana de densidad poblacional mayor a 100 hab. /km² mediante algoritmos genéticos.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Bloy Fujimoly M. Lormeus

Dirigido por:

Dr. Ricardo Montoya Zamora

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Presidente

M. I. Miguel Ríos Nuñez
Secretario

Dr. Arturo González Gutiérrez
Vocal

Dr. Omar Chávez Alegría
Suplente

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2021
México

RESUMEN

Recientemente, ha surgido un gran interés por estudios orientado al diseño de las líneas de transporte público en la Zona Metropolitana de Querétaro. La oferta, proporcionada por Las concesionarias proporcionan una oferta con una cantidad de autobuses y líneas de transporte público que no satisface la demanda de los usuarios del transporte público, por lo que, en la presente investigación, se realizó una propuesta de optimización de líneas de transporte público basada en el uso de algoritmos genéticos. Primeramente, se sistemaron los datos de la infraestructura existente (la demanda de los usuarios, la cantidad de viajes realizados y la oferta) para poder establecer los datos de entrada. Después, se generaron las rutas iniciales con el uso de dos algoritmos diferentes: el algoritmo de Baaj y Mahmassani (1991) y el algoritmo de Ceder y Wilson (1986). Los resultados de estos algoritmos mostraron una disminución de la distancia y del tiempo de recorrido. Posteriormente se implementaron, en lenguaje de programación C++, los pasos de los algoritmos genéticos para seleccionar y cruzar las rutas obtenidas de los algoritmos anteriores y de las rutas del sistema existente. Posteriormente, se evalúan los resultados del modelo obtenido. Como resultado de esta investigación, la red de autobuses de Querétaro se diseñó utilizando la metodología del modelo basado en el uso de los algoritmos genéticos, el cual redujo el costo generalizado de la red en un 61.20%.

ABSTRACT

Recently, there has been a great interest in studies oriented to the design of public transport lines in the Metropolitan Area of Querétaro. The offer, provided by The concessionaires provide an offer with a quantity of buses and public transport lines that does not satisfy the demand of public transport users, therefore, in the present investigation, a proposal for optimization of lines of transport was made. public transport based on the use of genetic algorithms. First, the existing infrastructure data (user demand, number of trips made and supply) were systematized in order to establish the input data. The initial routes were then generated using two different algorithms: the Baaj and Mahmassani (1991) algorithm and the Ceder and Wilson (1986) algorithm. The results of these algorithms showed a decrease in distance and travel time. Subsequently, the steps of the genetic algorithms were implemented in C ++ programming language to select and cross the routes obtained from the previous algorithms and the routes of the existing system. Subsequently, the results of the obtained model are evaluated. As a result of this research, the Querétaro bus network was designed using the methodology of the model based on the use of genetic algorithms, which reduced the general cost of the network by 61.20%.

(Dedicatoria)

A mis padres:

Clotere Lormeus y Evanette Menard,
por todo el apoyo incondicional que me han brindado a lo
largo de mi vida, ya que, gracias a ustedes, hoy puedo
lograr un sueño más.

A mis Hermanos:

Laurie Clotere Lormeus y Athur Evans L. Junior Lormeus,
por ser mi compañía, apoyo y fuerza para seguir adelante.

A toda mi familia Lormeus y Menard.

Al Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, la cual me forjo como
Ingeniero Civil,

A la Universidad Autónoma de Querétaro, la cual me dio la
oportunidad de ser un Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

Dirección General de Bibliotecas UAO

AGRADECIMIENTOS

A mi estimado tutor y coordinador de la maestría, al Dr. Ricardo Montoya Zamora por brindarme la oportunidad de trabajar con él, por asesorarme desde mis inicios, en la adecuada selección del tema y por mostrar su completo apoyo para la culminación del presente trabajo de investigación. por brindarme su apoyo, su tiempo y por transmitirme sus conocimientos, ya que, sin su ayuda, este trabajo de investigación no se hubiera concluido, porque a pesar de sus diversos compromisos siempre encontró un espacio para ver asuntos de la tesis, por demostrarme que aún existen personas que te brindan ayuda sin recibir nada a cambio.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Arturo González Gutiérrez, por darme el honor de que forme parte de mis sinodales, por brindarme su apoyo, su tiempo y por transmitirme sus conocimientos.

Al M. I. Miguel Ríos Nuñez por su aportación en el desarrollo del presente trabajo de investigación y por todo su apoyo.

Al Dr. Juan José Méndez Palacios y al M.I. Rubén Ramírez Jiménez por formar parte mis sinodales y por sus importantes aportaciones para esta tesis de posgrado.

A todos los profesores que imparten clases en la maestría de ingeniería de las vías terrestres de la Universidad Autónoma de Querétaro por sus excelentes clases impartidas y por todos los conocimientos transmitidos.

A todos mis compañeros de la maestría en Ingeniería de las vías terrestres ya que

de una u otra forma hicieron más ameno mi estancia en Querétaro, así como también a aquellos que me apoyaron para sacar los proyectos y trabajos finales adelante.

A Guadalupe Centeno Retana y Julia Ramírez Santos por su amable atención a lo largo de mis estudios de posgrado en la Universidad Autónoma de Querétaro.

A todas aquellas personas que participaron de una u otra forma para el desarrollo de la presente tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca que me brindaron durante el estudio del posgrado

Dirección General de Bibliotecas UAQ

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
(Dedicatoria).....	5
AGRADECIMIENTOS	6
TABLA DE CONTENIDO	8
Índice de tablas.....	13
Índice de figuras	14
Capítulo 1. Introducción.....	15
1.1. Antecedentes	16
1.2. Descripción del Problema.....	18
1.3. Justificación.....	19
1.4. Hipótesis	20
1.5. Objetivo General.	20
Capítulo 2. Marco teórico	21
2.1. El transporte público.....	21
2.1.1. Red de transporte público	21
2.1.2. Diseño de la red.....	23
2.1.3. Factores que afectan la satisfacción de los usuarios	25
2.1.4. Factores que afectan la demanda del transporte público	26
2.2. Algoritmos de optimización.....	26
2.2.1. Definiciones	26
2.2.2. Tipos de Algoritmos	27
2.2.3. Medición de la complejidad de un algoritmo.....	29
2.2.3.1. Análisis empírico.	29
2.2.4. Algoritmo de diseño de ruta.	30
2.2.5. Algoritmos genéticos.....	30
2.2.5.1. Componentes de un algoritmo genético	32
2.2.5.2. Algoritmos para la generación de rutas iniciales: Algoritmo de Baaj y Mahmassani.....	33
2.2.5.3. Algoritmo de generación de rutas de Ceder y Wilson	36
Capítulo 3. Metodología	39
3.1. Análisis de datos de entrada	40

3.2. Generación de población inicial de líneas de transporte público.....	46
3.3. Función de condición física de ruta	47
3.4. Creación de una selección de un grupo de líneas de transporte público.	50
3.5. Creación de redes de tránsito diversas	51
3.6. Análisis de resultados de la red obtenida con los algoritmos genéticos.....	52
3.7. Comparación de la distribución actual de rutas de transporte público y su respectiva demanda de viajes vs la solución óptima con algoritmos genéticos	53
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	54
Capítulo 5. Conclusiones	71
Referencias bibliográficas	73
Anexos	81
Anexo 1. Tiempos de marcha para las líneas de la zona metropolitana.	81
Anexo 2. costos generalizados de las 25 generaciones.	85
Tabla ordenada de los costos generalizados de las 25 generaciones para el padre 1.	85
Tabla ordenada de los costos generalizados de las 25 generaciones para el padre 2.	86
Anexo 3. Cotos generalizados de las primeras 30 mejores redes para cada generación	87
Anexo 4. Mapas de las redes de menor costo de las 25 generaciones generadas a partir del padre 1.	90
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 1.....	91
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 2.....	92
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 3.....	93
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 4.....	94
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 5.....	95
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 6.....	96
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 7.....	97

Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 8.....	98
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 9.....	99
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 10.....	100
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 11.....	101
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 12.....	102
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 13.....	103
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 14.....	104
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 15.....	105
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 16.....	106
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 17.....	107
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 18.....	108
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 19.....	109
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 20.....	110
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 21.....	111
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 22.....	112
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 23.....	113
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 24.....	114
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 25.....	115

Anexo 5. Mapas de las redes de menor costo de las 25 generaciones generadas a partir del padre 2.....	116
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 1.....	116
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 2.....	117
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 3.....	118
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 4.....	119
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 5.....	120
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 6.....	121
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 7.....	122
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 8.....	123
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 9.....	124
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 10.....	125
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 11.....	126
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 12.....	127
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 13.....	128
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 14.....	129
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 15.....	130
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 16.....	131
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 17.....	132

Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 18.....	133
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 19.....	134
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 20.....	135
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 21.....	136
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 22.....	137
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 23.....	138
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 24.....	139
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 25.....	140

Índice de tablas

Tabla 4.1. Tabla de los resultados de las redes generadas con los dos primeros algoritmos.....	54
Tabla 4.2. Tabla de los costos generalizados de las 25 generaciones de la mejor red generada a partir del padre 1.....	60
Tabla 4.3. Tabla de los costos generalizados de las 25 generaciones de la mejor red generada a partir del padre 2.....	61
Tabla 4.4. Tabla Resumen.....	65

Dirección General de Bibliotecas UNQ

Índice de figuras

3.1. Metodología	36
3.1. Estructura de la red de calles y carreteras disponible.....	38
3.3. Fragmentos de la matriz usada para la aplicación del algoritmo de Ceder y Wilson.....	39
3.4. Fragmentos de la matriz usada para la aplicación del algoritmo de Baaj y Mahmassani	40
3.5. Paradas físicas	41
3.6. Paradas en ruta	42
3.7. Proceso de generación de líneas de transporte público	43
3.8. Procesamiento de la selección aleatoria de las líneas de transporte público.....	47
3.9. Proceso de selección de conjuntos de padres de líneas de transporte público.....	47
3.10. Proceso de cruzamiento de las líneas de transporte público.....	48
3.11. Mapa de líneas de transporte de la red existente en la zona metropolitana.....	50
4.2. Líneas de transporte público generadas con el algoritmo Baaj y Mahmassani.....	52
4.3. Líneas de transporte público generadas con el algoritmo Ceder y Wilson.....	53
4.3. Primeras 74 líneas de transporte público generadas con el algoritmo Baaj y Mahmassani.....	55
4.4. Primeras 74 líneas de transporte público generadas con el algoritmo Ceder y Wilson	56
4.5. Cruzamiento de la primera generación en el punto después de la línea de transporte 8.....	58
4.6. Cruzamiento de la segunda generación.....	59
4.7. Resultados del cruzamiento de la segunda generación	59
4.8. Evolución del costo generalizado por generación.....	62
4.9. Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1	63
4.10. Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2.....	63

Capítulo 1. Introducción

El presente trabajo de investigación considera el problema, de trazado de las rutas y de frecuencias con las que transitan los autobuses, del transporte público que existe en la zona metropolitana de Querétaro. En este caso particular, el enfoque es la utilización de algoritmos genéticos para el trazado de las rutas, además de conocer cuáles son los criterios que valoran estos algoritmos para su desempeño. Para un mejor análisis del comportamiento del transporte público, se opta por la utilización de una herramienta computacional de Sistemas de Información Geográfica especializada en Transporte (TransCAD). Del mismo modo una de las bondades que tienen las herramientas computacionales es el lenguaje de programación que estas utilizan por lo tanto para desempeñar el desarrollo de los algoritmos se emplean de manera programada.

Es necesario tener en cuenta la importancia de las diferentes maneras para optimizar la red de transporte público. La factibilidad de este punto es posible con una comparativa del sistema construida a partir de los algoritmos genéticos y el sistema existente, con la contemplación de los diferentes comportamientos en la red, además como lo indican Fernández y Friesz (1993) es importante considerar un equilibrio económico en las partes actantes la oferta y la demanda, es decir operadores y usuarios respectivamente.

1.1. Antecedentes

En la literatura, autores como Arbex y da Cunha (2015), An y Lo (2016) y Fan *et al.* (2018) analizaron el problema de movilidad existente en diferentes ciudades y del diseño de la red de transporte público; igualmente, propusieron soluciones y herramientas como algoritmos genéticos para llegar a un diseño óptimo.

Baaj y Mahmassani (1991) le dieron un enfoque heurístico híbrido a su investigación para generar rutas eficientes. Esta misma línea de investigación fue mejorada por Shih y Mahmassani (1994) con un tránsito acomodado con respeto al tiempo de viaje. Baaj y Mahmassani (1995) propusieron generar rutas con la aplicación del algoritmo Lisp para el diseño de redes de tránsito.

Zhao (2006) utilizó un algoritmo de optimización para obtener los resultados óptimos del modelo promovido para el problema de red de tránsito Urbano. Fan y Mumford (2010) usaron un modelo simple de problema de red de tránsito Urbano, y un enfoque validado se presentó mediante el uso de un algoritmo simple.

Chu (2018) estudió la posibilidad de encontrar soluciones al problema de planificación de diseño de red, así como el cronograma para sistemas de autobuses urbanos usando un algoritmo de programación de enteros mixtos y, con la proposición de un algoritmo paralelo de bifurcación, precio y corte. Una desventaja es que el tiempo de operación aumenta a medida que la red está más grande.

Cipriani *et al.* (2012) buscaron en la solución para obtener una red de transporte efectiva en una zona urbana que posee un sistema de transporte que reúne diferentes modos. Este proceso consistió en un conjunto de heurísticas que tienen una primera rutina para la generación de rutas basadas en el proceso de concentración de flujo y un algoritmo paralelo genético para encontrar una óptima o casi óptima red de rutas con las frecuencias. Los resultados obtenidos de los experimentos realizados arrojaron datos de efectividad en la satisfacción de la demanda (reducción del 30% del tiempo de espera), en las líneas de transporte con una mayor eficiencia (reducción del 20% de los costos operativos).

Prieto (2015) buscó con diferentes algoritmos maneras eficientes para optimizar la red de transporte Público. Para solucionar estos problemas, consideró el algoritmo de Krishna y propuso una nueva red de 106 líneas de transporte público; y la comparó con la red existente. La desventaja encontrada al momento de aplicar este algoritmo es la integración de la zona suburbana de transporte en la zona metropolitana de Querétaro. Del análisis realizado, Los resultados que se obtuvieron mejoraron la red existente. Concluyó que, sin estudio previo para la justificación de rutas, la oferta presentada por las concesionarias no satisfacía la demanda.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

1.2. Descripción del Problema

En la actualidad, muchos países han hecho una prioridad la disminución de la cantidad de automóviles privados incitando al uso del transporte público y con ello la disminución de tráfico (Fu *et al.*, 2018). En este sentido, Li *et al.* (2016) mencionaron que, a partir de 2014, la ciudad de Shanghái registró 3.04 millones vehículos de motor, y el número de automóviles privados registrados aumentó un 85,59% a 2.19 millones.

El número de automóviles de la zona metropolitana en estudio crece más ferozmente que el número de habitantes. De acuerdo al INEGI, la entidad tuvo en este 2017 una tasa de crecimiento poblacional de 1.4 por ciento y llegaremos a los 2 millones 63 mil habitantes; sin embargo, el parque vehicular mantuvo un ritmo de crecimiento de 7 por ciento anual desde el 2012. En el 2017, se registró un aumento en la cantidad de vehículos particulares (3 veces la cantidad que existía en 2010) de la zona en estudio, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Por este motivo, las vialidades han dejado de ser suficientes y los tiempos de traslado en horas pico han llegado a incrementarse considerablemente.

Según Barreno *et al.* (2010), el problema del transporte tiene una importancia relevante en países de primer mundo y en países en desarrollo. Según Delgado *et al.* (2014), los problemas en el sector del transporte público urbano están ligados a la calidad del servicio, la distancia de recorrido, el costo y el tiempo del viaje. Estos factores influyen mucho en la toma de decisión de los pasajeros tal como lo especifican Arbex y da Cunha (2015). La distancia de recorrido de los vehículos de transporte público influye mucho en la toma de decisión de los usuarios en el momento de decidir el tipo de transporte que va a usar para llegar a su destino; y en la red actual, las rutas presentan distancias de recorrido bastante largas.

1.3. Justificación

Para mejorar las redes de transporte, Buba y Lee (2018) e Ibarra *et al.* (2015) coinciden en la importancia del análisis de factores como la tecnología disponible, el proceso de planificación, las estrategias de control, entre otros para el diseño de una red eficiente de transporte público. Investigaciones recientes reportadas en Ahmed *et al.* (2018) y Fieldbaum *et al.* (2016) sostienen que la incorporación de nuevos métodos es necesaria para el diseño de una red eficiente con el fin de encontrar soluciones óptimas. En este sentido, Cipriani *et al.* (2012) consideran optimizar de manera efectiva, el tiempo de espera en un 30%, la distancia de recorrido, los costos operativos en un 20% y al mismo tiempo satisfacer la demanda usando algoritmos genéticos en una ciudad como Roma. Kidwai *et al.* (2005) reportan resultados similares en cuanto a la reducción de distancia de recorrido con el uso de una red de 60 nodos y recomienden usar los algoritmos genéticos en una red más grande y mejorar los resultados.

Buba y Lee (2018), Ibarra *et al.* (2015), Ahmed *et al.* (2018), Fieldbaum *et al.* (2016) y Cancela *et al.* (2015) concluyen que, para solucionar problemas de eficiencia de los diseños, se deben realizar estudios para complementar los análisis del transporte público. Por eso, la proposición del autor Woxenius (2007), de usar los algoritmos genéticos como herramienta para el análisis de deficiencia de la red puede alcanzar resultados satisfactorios en una zona con una densidad poblacional mayor a 100 hab. /Km².

1.4. Hipótesis

El desarrollo y la aplicación del algoritmo genético para optimizar las líneas de transporte público, en una zona metropolitana de densidad poblacional de más de 100 hab. /Km², reducirá la distancia promedio de recorrido un 30% sin dejar de satisfacer la demanda.

1.5. Objetivo General.

Optimizar las líneas de transporte público en una zona metropolitana de densidad población de más de 100 hab. /Km², al aplicar algoritmos genéticos que permitan reducir la distancia promedio de recorrido.

Capítulo 2. Marco teórico

Para poder entender el tema presentado en este documento, lo más útil y clarificador es proporcionar definiciones de las palabras relevantes relacionadas con esta investigación: la red de transporte público y los algoritmos de aproximación, especialmente los algoritmos genéticos, haciendo hincapié en las diferentes etapas para su desarrollo. Se analiza por separado los temas.

2.1. El transporte público

Recientemente, en el mundo, se han notado varios cambios notables. El transporte, como forma parte de la sociedad, ha tenido transformaciones por la necesidad y aumento de la demanda y su importancia en el desarrollo de la sociedad. Del mismo modo, la satisfacción de la debe ser la prioridad al resolver un problema de transporte público.

2.1.1. Red de transporte público

El transporte público es necesario en la sociedad por su importancia para la movilidad, el desarrollo de la economía de las poblaciones y regiones, y para alcanzar un balance entre las diferentes comunidades (Rodríguez *et al.*, 2014). Su uso efectivo es la única opción que permite cubrir la demanda de los movimientos de los ciudadanos (Bayliss y Fox, 2000). El eficiente servicio de transporte público es indispensable para la supervivencia de las sociedades modernas. Este servicio impacta en todas perspectivas de la vida (Desaulniers y Hickman, 2007). El nuevo paradigma de gestión de transporte se caracteriza por los siguientes atributos (de Pablos *et al.*, 2012):

- Seguridad y comodidad para los usuarios.
- Efectividad, ofreciendo un control exhaustivo de la demanda y distribución de recursos.

Los sistemas de portación son los pasajeros, operadores y les autoridades locales para la eficiencia de un transporte público. El servicio puede ser medido por su

costo, cobertura de la demanda, capacidad y tiempo de transferencia. Sin embargo, las partes interesadas evalúan la eficiencia del servicio desde su punto de vista. (Kılıç y Gök, 2017)

Según Nesmachnow *et al.* (2019), los métodos de optimización del tráfico apuntan a mejorar el flujo de vehículos en la red de carreteras. Los criterios se clasifican en dos clases principales: aquellos que influyen en el comportamiento de los conductores (mediante el establecimiento de semáforos, la instalación de señales, entre otros) y esos que proponen cambiar la infraestructura (agregar nuevos carriles, ensanchar las calles, entre otros)

Según Muñoz *et al.* (2014), las consecuencias de las diferencias de clases sociales de la gente se reflejan directamente en la movilidad, el costo de los viajes puede causar que algunos pasajeros, por su condición económica se sientan excluidos del uso del transporte económico.

Por lo que, sin la existencia de alternativas, con un grado alto de accesibilidad, para el transporte público, se puede ver afectada la aplicación de este medio (Bonsall y Kelly, 2005). La estructura, que presentan las grandes ciudades actualmente, tiene un distanciamiento importante entre las comunidades. La distribución de los ingresos tiene mucha importancia (Ubbels y Verhoef, 2004). El transporte, como fuente de comunicación de las comunidades, debe ser considerado en la elaboración de los planes de desarrollo de la zona por su importancia en alcanzar la equidad social necesaria para el desarrollo de la zona.

No se puede enfocar totalmente el transporte público a sus problemas y como puedo resolverlos. Otros factores que afectan al transporte se ven olvidados por los diseñadores, al momento de realizar el análisis, como pueden ser el contexto en el cual trabajan los operadores y la calidad de las unidades. Al igual se debe considerar un sistema efectivo de transporte porque existen usuarios que se trasladan por sus actividades en zonas alejadas dentro del sistema. Al optimizar el

sistema, se quiere alcanzar un aumento en la utilización de las unidades al alcanzar su máxima capacidad, pero no se debe buscar alcanzar la saturación de las vías con un aumento de los vehículos; todo este proceso se debe de realizar sin olvidar las uno de los factores más importantes el conductor del vehículo (Luyando *et al.*, 2014).

2.1.2. Diseño de la red

En la práctica, el plan del sistema de tránsito consiste en las siguientes partes: el proyecto de planeación del sistema para el traslado de las personas; el vehículo horario; el plan de despacho de los conductores. Al considerar estos puntos, la planeación se considera relevante para aumentar el aprovechamiento de los choferes de los pelotones (Cherchi *et al.*, 2017).

El aspecto del diseño de la red consiste en determinar un conjunto de rutas de tránsito factibles en una red de carreteras existente y puntos de parada predefinidos (puntos de demanda) que constituyen una red de tránsito eficiente, para atender la demanda de viaje de los pasajeros con un tiempo de viaje mínimo, incluidas las penalizaciones por transferencia (Buba y Lee, 2018).

Según Farahani *et al.* (2013), Basándose en la literatura existente, se puede dividir la definición de la planeación de una red de transporte público en tres partes importantes:

- Está relacionado con la construcción de nuevas calles o la expansión de capacidad de las calles existentes.
- Obtiene los puntos importantes para aumentar las capacidades del sistema y mejorar dicho sistema.
- Se debe tomar decisiones importantes con liderazgo para obtener una excelente planeación de transporte, haciendo un enfoque en los criterios tácticos y operativos. Las decisiones estratégicas son decisiones a largo plazo relacionadas con la infraestructura de redes de transporte, que

incluyen tanto las redes de tránsito y carreteras; las decisiones tácticas son las que se refieren con la utilización efectiva de infraestructuras y recursos de redes de transporte urbano existentes y decisiones operativas son decisiones a corto plazo, que en su mayoría están relacionadas con control de flujo de datos, gestión de la demanda para la resolución de problemas.

El diseño de un sistema lleva a grupo de líneas de transporte, donde cada una cuenta con un punto de salida y un punto de llegada con paradas intermedias, subida y bajada de usuarios, una duración de traslado para ir de una parada a otra, tomando en cuenta las necesidades de los pasajeros y los beneficios de las concesionarias y los operadores. El servicio de transporte público debe ser eficiente tomando en cuenta la integración de todos los tipos de beneficiarios, deber tener una mayor cantidad de recorridos, menos distorsiones en los viajes. Además, el deseo de los operadores es proporcionar un nivel de servicio significativo con menos tamaño de ruta (Bhushan *et al.*, 2019).

Según Murata *et al.* (2017), el transbordo tiene menos importancia para un usuario con vehículo privado; en este caso hace uso de un solo modo, pero para los demás existe la necesidad de hacer un traslado a pie antes de hacer uso del transporte público en cuestión. Para eso, se debe mencionar que la longitud y la duración del recorrido como relevante. Considerando lo mencionado anteriormente, se puede resaltar estas cuatro sucesiones: 1) caminata y uso del Metro; caminata-Metro-otro medio; otro medio-Metro-caminata, y otro medio-Metro-otro medio.

Los diseñadores de rutas se han basado mucho en la experiencia histórica, las pautas simples, el conocimiento local y los procedimientos ad hoc. En cambio, estudios recientes toman en consideración el uso de la tecnología para obtener la distribución del sistema de transporte público. La planificación de rutas implica los siguientes objetivos (Nayeem *et al.*, 2014): aumentar la satisfacción de los beneficiarios para disminuir la distancia y la duración de los recorridos.

Para resolver un problema de distribución de las rutas dentro de un sistema, se busca un grupo de líneas que satisface las necesidades de los usuarios (Jha et al., 2019).

López et al. (2017), para alcanzar una mejora en la planeación de la red de transporte, se debe valorar la utilización de las siguientes partes:

- El tiempo que un pasajero espera dentro del vehículo durante una parada en una estación intermedia. Se considera tanto en la función objetivo como un costo y en el cálculo del tiempo de ciclo de línea.
- El tiempo de parada. Este es el tiempo que tarda el conductor en ir de un extremo al otro.
- Una red de peatones que representa no solo a los pasajeros que caminan a las estaciones cercanas, sino también a su destino directo.
- La capacidad de incorporar líneas operativas, cuyos diseños (tramos y estaciones) ya están determinados, pero se pueden cambiar sus frecuencias operativas.
- Un presupuesto de planificación que limita la adquisición de nuevos vehículos.

2.1.3. Factores que afectan la satisfacción de los usuarios

Dell'Olio et al. (2010) hicieron el análisis de los siguientes elementos que tienen una relevancia importante en la decisión de los beneficiarios para decidir el tipo de modo para trasladarse de un punto a otro. La satisfacción de los usuarios, según el estudio realizado en España, depende de la credibilidad de paso de los vehículos y el tiempo que el usuario pasa en una parada esperando el paso de dicho vehículo. Por lo que, la prioridad de las concesionarias debe ser la precisión en la determinación de la hora de paso. En esta investigación, los encuestadores dedujeron que los elementos más importantes para los usuarios son el bienestar,

la limpieza y el tiempo de espera; el impacto de los demás factores varía dependiendo de las características socioeconómicas de los usuarios. Román *et al.* (2014) exploró el impacto de los factores de calidad en las elecciones de los usuarios de transporte público. Los resultados de su investigación mostraron que el comportamiento de los viajeros interurbanos difiere debido a las diferentes percepciones de los factores, como la frecuencia y la disposición a pagar.

2.1.4. Factores que afectan la demanda del transporte público

Buehler y Pucker (2012) relacionaron los elementos que tienen una importancia en la decisión de los usuarios en Estados Unidos de América y Alemania y encontraron correlaciones en las características socioeconómicas y de uso del suelo. Llegaron a la conclusión de que los alemanes tienen cinco veces más tendencia a utilizar el transporte público en comparación con los estadounidenses. Van Oort *et al.* (2014) examinaron la importancia de la confianza de la demanda en el sistema, un sistema confiable aumenta la cantidad de usuarios en un 18%. Otro factor importante de demanda del transporte público es el empleo, según Tfl (2010). En España, Cordera *et al.* (2015) exploraron el impacto del desempleo en la demanda del transporte público.

2.2. Algoritmos de optimización.

Para entender el concepto de algoritmos genéticos, que es un algoritmo de optimización y una metaheurística, se requiere conocer la definición del concepto de algoritmo, así como los tipos y la complejidad de los algoritmos para poder explicar la importancia del tipo de algoritmo utilizado en esta investigación.

2.2.1. Definiciones

Según Gurevich (1999), un algoritmo se define como un grupo de ordenes que se dan o se programan para dar una solución a un problema o hacer una tarea determinada. Se puede decir, también, que un algoritmo es una serie ordenada de acciones con finalidad de encontrar soluciones a problemas específicos.

Los algoritmos genéticos son partes de los programas de un cómputo; como cualquier sistema de programación, este tiene un elemento de entrada, un elemento inicial que, después de la utilización de una serie de órdenes, dan un resultado que se puede notificar como output. Por ser un conjunto de pasos específicos, la transición de un estado a otro, se puede llamar determinista; un grupo de algoritmos no necesita un elemento de entrada específico, puede ser aleatorio, estos algoritmos se hacen llamar algoritmos aleatorios. Un algoritmo puede ser considerado como un elemento que puede ejecutar un ordenador por sus especificaciones.

2.2.2. Tipos de Algoritmos

Según Carpenente y Casas (2013), podemos establecer varias clasificaciones de algoritmos. La primera clasificación de los algoritmos tiene en cuenta si la ejecución de dicho algoritmo lleva a un mismo resultado (se dice que es determinista) si no es un algoritmo no determinista.

Tomando en consideración las especificaciones de los resultados que proporcionan los algoritmos, se pueden clasificar de esta forma:

- Algoritmos exactos son algoritmos que siempre devuelven una solución óptima.
- Algoritmos aproximados, que dan un resultado que tiene una aproximación considerable al óptimo que se está buscando.
- Algoritmos heurísticos, son algoritmos que deben ser evaluados para saber su grado de acercamiento al óptimo buscado. Estos algoritmos toman menos tiempo para encontrar una solución.

En cuestión de la duración de la ejecución de los pasos de un algoritmo, no se aconseja el uso de los algoritmos exactos, estos algoritmos demoran bastante para encontrar resultados; a diferencia de los algoritmos aproximados que tardan menos pero no menos que los algoritmos heurísticos. La metodología es muy diferente entre los algoritmos heurísticos y algoritmos exactos y aproximados. (Bonabeau *et al.*, 1999)

Dentro del grupo de los algoritmos heurísticos podemos distinguir los denominados métodos metaheurísticos, que imitan fenómenos simples observados en la naturaleza y que parecen estar asociados con la inteligencia artificial. Estos algoritmos tratan de adaptar el comportamiento de diferentes especies a soluciones de problemas altamente complejos mediante optimización.

Se pueden considerar los siguientes algoritmos:

- Algoritmos evolutivos (genéticos): basado en modelos biológicos que emulan el proceso natural de evolución.
- Algoritmos basados en el comportamiento de las comunidades de hormigas, abejas, etc.
- Algoritmo de recocido simulado
- Búsqueda heurística (tabú, aleatorios...)
- Sistemas multiagente

En general, los métodos tradicionales se encargan de buscar y garantizar un óptimo local mientras que los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global, pero no garantizan ese alcance. (Gutiérrez y Harbour, 1995).

Los algoritmos heurísticos no tienen la capacidad de encontrar soluciones relativas a una zona determinada de los elementos de entrada. Por lo que, se recurren a algoritmos más específicos capaces de evadir y de no considerar algunas complicaciones. Estos algoritmos se hacen llamar metaheurísticos. (Achterberg, 2009).

Normalmente, estos algoritmos tienen su origen de diferentes disciplinas científicas distintas:

- La capacidad de proyectar de los algoritmos (dan resultados favorables a un grupo de problemas)
- Algoritmos especializados (cada problema se resuelve de forma diferente).
- Basado en la realidad.
- Basado en la estadística.

La mayoría de las veces, las metaheurísticas se trabajan como procedimientos vigorosos que dan buenos resultados a una gran variedad de problemas. Asimismo, existen algunos metaheurísticos como el teorema de No Free Lunch en donde no se hacen uso de informaciones de algún heurístico para proyectar su diseño. La suposición, de que siempre para un metaheurístico se necesita la composición de algún heurístico conocido, no es cierta (Di Natale y Stankovic, 1995).

Seguidamente, se nombrarán los procedimientos de optimización de las soluciones de los problemas:

- Búsqueda Exhaustiva
- Búsqueda Local
- Búsqueda Tabú
- Algoritmo de recocido simulado
- Algoritmos Genéticos
- Colonias de Hormigas

2.2.3. Medición de la complejidad de un algoritmo

Al momento de usar los algoritmos, lo que se busca es la calidad de los resultados de estos. Asimismo, es de mucha importancia la velocidad con la cual este algoritmo trabaja en la obtención de resultados para cualquier tipo de problema. A continuación, se discuten algunos enfoques que nos sirven para medir el rendimiento de un algoritmo (Kennedy et al., 2001).

2.2.3.1. Análisis empírico.

Para Ríos (1996), este procedimiento tiene como objetivo evaluar cual es la conducta del algoritmo en la vida real para diferentes problemas.

La cantidad de pasos, que tiene cada algoritmo, es muy relevante para el análisis de cada caso. En términos generales, se debe hacer uso de estadística para obtener cuánto dura la ejecución de cada algoritmo. (Ríos, 1996)

Para la evaluación de las peores ocurrencias, se debe encontrar el máximo número de pasos que se deben considerar en los algoritmos para resolver cualquier tipo de problema.

2.2.4. Algoritmo de diseño de ruta.

Para poder hablar de un algoritmo para diseñar rutas, debe cumplir con los siguientes pasos:

- El primer Paso consiste en tener una matriz de demanda d_{ij} entre tiempo t_{ij} o (pasajeros por Hora) de nodos Terminales.
- El segundo paso es obtener el par origen destino más grande de nuestro arreglo
- El paso siguiente toma en cuenta la realización de un camino más corto del primer elemento de la lista de i a j
- El cuarto paso consiste en la verificación de la satisfacción de la restricción presentada en la ecuación 2.1, con la duración del traslado:

$$tv_{ij} \leq \left[1 + \frac{\alpha(i,j)}{100} \right] t_{ij}^* \quad \text{Para todos } i,j \in N \quad (2.1)$$

- En el quinto paso, se selecciona el siguiente nodo j siguiente al conjunto y configúralo como nodo de inicio, para posible extensión del camino. Si ahí no hay más nodos continua, de otra manera, regresa al primer paso.
- Como sexta parte, se debe tomar en cuenta un grupo de puntos con una longitud determinada (en lo que concierne a la cantidad de líneas) de los puntos especificados y retomar el paso 4.
- El último paso consiste en verificar que la lista está vacía para terminar el procesamiento del algoritmo.

2.2.5. Algoritmos genéticos

Según Allen *et al.* (2018), el algoritmo genético es uno de los primeros algoritmos que se usó para encontrar una solución a contratiempos; es un algoritmo

generalizado que generalmente se implementa en la resolución de conflictos de investigación operativa intratable.

La base de los algoritmos genéticos tiene que ver con una parte de la ciencia que estudia de la herencia y la elección normal. En el tiempo, se considera como la sola metaheurística capaz de tener dos grupos de elementos de entrada que se llaman individuos de una población que puede actuar como dos individuos en la vida real. (Hamann et al., 2006)

Los algoritmos genéticos toman vida por la teoría biológica de evolución de Darwin, el primer desarrollador de este tipo de algoritmo fue Holland. Estos algoritmos tienen un comportamiento no determinista, que se usan para encontrar soluciones, usando una función objetivo, a problemas de optimización. El desempeño de estos algoritmos se hace en cuatro fases: Inicio, selección, cruce y mutación.

El cruzamiento es una parte del algoritmo en donde los hijos (resultados) toman características a partir de combinación de algunas propiedades de los padres.

El cruce es una operación más importante que la mutación; por lo que, el algoritmo la mayoría de las veces, lo considera como operador principal. Los pasos de los algoritmos genéticos son los siguientes:

- Crear de forma aleatoria de una población inicial.
- Evaluar las capacidades de los individuos.
- Seleccionar los individuos con las mejores características.
- Hacer el cruce y la mutación para obtener un nuevo grupo de hijos.
- Repetir el procedimiento hasta llegar a resultados muy cercanos.

Se debe considerar cinco elementos fundamentales para hacer uso de algoritmos genéticos (Allen *et al.*, 2018):

- Tener en cuenta al menos una posible solución de este contratiempo.
- La creación de una primera población para los elementos de entrada.
- Una función que ordena los resultados tomando en cuenta las características de los individuos.
- La forma que los individuos se van cruzar y a mutar.
- La forma que se va a evaluar los resultados.

Algunas aplicaciones de los algoritmos genéticos son las siguientes:

- Mejoramiento (constitutivo, de topologías, numérica, combinatoria, entre otros)
- Aprendizaje automático (sistemas de regulación)
- Banco de datos (mejoramiento en la forma de realizar las búsquedas)
- Identificación de modelos (por ejemplo, imágenes)
- Concepción de textos (regulares, libres de contexto, entre
- Programación de desplazamientos de robots

2.2.5.1. Componentes de un algoritmo genético

Según Gómez y Guerrero (2013), los conceptos de los elementos que componen el algoritmo genético, derivan de la biología como el nombre del algoritmo:

- Una población de cromosomas: Cada individuo contiene células y los núcleos de éstas tiene dos grupos de veintitrés cromosomas. Los algoritmos genéticos toman como referencia la transformación resultante de la combinación de dos individuos diferentes para dar un individuo mejorado.
- El gen, evolución del elemento estructural que está en medio de un núcleo de las células de un organismo, representan el elemento de programación

de una característica en particular de un posible resultado. Cada elemento que constituye el cromosoma puede ser considerado como un posible elemento de resultado del problema.

- Escogencia de elementos de acuerdo con las características: la aptitud se toma en cuenta al momento de hacer una evaluación de la supervivencia de un individuo. En el caso de los algoritmos genéticos, se considera su facilidad al momento de encontrar una solución a un problema y la determinación de la mejor solución.
- Recombinación: Durante la reproducción celular, los padres que tienen características similares hacen un intercambio de algunas de sus características, y este proceso tiene el nombre de cruzamiento. Haciendo énfasis en la importancia de este proceso en los algoritmos genéticos, los elementos de manera aleatoria intercambian características con objetivo de crear un nuevo elemento con mejores características.
- Mutación: Este proceso sucede cuando los elementos de las células de un individuo se someten a cambios que le permiten sobrevivir a algunos cambios, estos elementos evolucionan para permitir al individuo adaptarse. Esta evolución puede afectar al individuo tanto que pierde algunas de sus características o adquiere otras, este cambio ocurre sin control en el organismo. En la aplicación de los algoritmos genéticos, este procedimiento, considerado como un operador, de forma aleatoria, modifica algunas características en los elementos de inicio para dar un nuevo elemento con mejores propiedades.

2.2.5.2. Algoritmos para la generación de rutas iniciales: Algoritmo de Baaj y Mahmassani

El algoritmo propuesto por estos autores es considerado como uno de los mejores para encontrar una solución híbrida con el objetivo basada de aumentar las

posibilidades de encontrar los mejores resultados para la planeación de un sistema de transporte (Baaj y Mahmassani, 1991). Los elementos para iniciar el proceso de aplicación de dicho algoritmo es la cantidad de usuarios que no pueden acceder al servicio. Tomando como base métodos establecidos, este algoritmo propone la creación de nuevos puntos en el sistema existente. Se hace un ciclo de creación de nuevas líneas de transporte, cambiando algunas de las características, para encontrar resultados.

El método primordial para atribuir al sistema la cantidad de usuarios es la condición de reducir el número de personas que se trasladan de un punto a otro. Tal enfoque híbrido incorpora el conocimiento y la experiencia de los planificadores de redes de tránsito e implementa técnicas de búsqueda eficientes utilizando herramientas de el algoritmo de mejora de la ruta, procedimientos algorítmicos desarrollados por otros y módulos para herramientas implementadas en lenguajes convencionales. el algoritmo de diseño de generación de rutas implementado por Lisp es un algoritmo de diseño que:

- Está fuertemente guiado por la matriz de demanda,
- Permite que se implementen los conocimientos del diseñador para reducir el espacio de búsqueda, y
- Genera diferentes conjuntos de rutas correspondientes a diferentes compensaciones entre objetivos en conflicto (costos de usuario y operador).

La ecuación 2.2 plantea la función con la cual se puede asegurar de la optimización de los resultados obtenidos con la aplicación del método formulado por Baaj y Mahmassani (1991).

$$Min = C_1 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n d_{ij} t_{ij} + C_2 \sum_{\text{Todo } k \in SR} f_k t_k \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 está sujeto a la ecuación 2.3 que presenta la vialidad de frecuencia.

$$f_k \geq f_{min} \quad \text{Para toda } k \in SR \quad (2.3)$$

La ecuación 2.4 propone la evaluación de las limitaciones del coeficiente de capacidad de los vehículos considerados para el modo de transporte en el sistema.

$$LF_k = \frac{(Q_k)_{max}}{f_k CAP} \leq LF_{max} \quad \text{Para toda } k \in SR \quad (2.4)$$

La ecuación 2.5 representa la restricción del tamaño de la flota que se usa para la red de transporte público.

$$\sum_{\text{Todo } k \in SR} N_k = [\sum_{\text{Todo } k \in SR} f_k t_k] < W \quad \text{para toda } k \in SR \quad (2.5)$$

Donde:

d_{ij} = Solicitud de viajes del punto i al j (Demanda).

t_{ij} = Tiempo de viaje total entre i y j = $t_{invtt, ij} + t_{wt, ij} + t_{tt, ij}$.

$t_{invtt, ij}$ = Tiempo de viaje en vehiculo entre nodo i y j.

$t_{wt, ij}$ = Tiempo de espera mientras viaja de i a j.

$t_{tt, ij}$ = Tiempo de transbordo mientras viajan entre nodo i a j.

N_k = Cantidad de vehículos que circulan en la línea de transporte k;

$$N_k = f_k T_k$$

f_k = Frecuencia de autobuses operando en la ruta k^{th} .

t_k = Duración del viaje en su totalidad de ida y regreso k^{th} .

f_{min} = Frecuencia mínima de autobuses que operan en cualquier ruta.

W = Cantidad de vehículos disponibles para la operación de la línea.

LF_k = Coeficiente de Factor de carga en la ruta k

Q_k^{max} = Número máximo de autobuses que pueden circular de un punto a

otro.

CAP = Capacidad de asientos de autobús que operan en la red.

SR = Grupo de líneas de transporte en el resultado;

C_1, C_2 = Pesos reflejando la importancia relativa de los dos componentes de costos.

2.2.5.3. Algoritmo de generación de rutas de Ceder y Wilson

Debido a la gran cantidad de factores externos y operativos que intervienen en el diseño de una red de autobuses (por ejemplo, financieros, socioeconómicos, políticos, etc.), es deseable establecer un proceso de planificación que incorpore niveles alternativos de complejidad. La aceptabilidad de este proceso debido a las propiedades del autobús depende de su simplicidad, flexibilidad y practicidad (Ceder y Wilson, 1986).

En esta sección se propone un enfoque metodológico de dos niveles, basado en cinco objetivos principales:

- Desarrollar un algoritmo para un diseño de red óptimo para que las rutas brinden servicio entre todos los pares de origen y destino y cumplan con las restricciones operativas y de servicio en los tiempos de viaje, transferencia y espera.
- Desarrollar medidas de desempeño desde la perspectiva del pasajero, operador y comunidad.
- Combinar otros componentes de planificación de operaciones (construcción de horarios y programación de vehículos) con procedimientos de diseño de redes;
- Desarrollar análisis de sensibilidad para determinar las tolerancias de la solución debido a posibles cambios y restricciones de la demanda; y
- Desarrollar un sistema interactivo hombre-máquina para que el planificador pueda cambiar las restricciones o rutas durante el proceso de diseño.

La ecuación 2.6 muestra la función que ayuda en la optimización de los resultados con la aplicación del algoritmo desarrollado por Ceder y Wilson (1986).

$$\min \{a_1 (\sum_{i,j \in [l..n]} d_{ij} (tv_{ij} - t_{ij}^*) + \sum_{i,j \in [l..n]} tt_{ij} + \sum_{i,j \in [l..n]} te_{ij}) + a_2 \sum_{r_k \in R} f_k t_k\} \quad (2.6)$$

Las limitaciones de la ecuación 2.6 son las siguientes:

La ecuación 2.7 muestra la restricción del tiempo de viaje.

$$\frac{tv_{ij}}{t_{ij}^*} \leq 1 + \alpha_{ij} \quad \forall r_k \in R \quad (2.7)$$

La restricción de tiempo mínimo y máximo para los viajes se representa en la ecuación 2.8.

$$t_{min} \leq t_k \leq t_{max} \quad \forall r_k \in R \quad (2.8)$$

Para verificar que la red cumple con la frecuencia mínima de paso, se aplica la ecuación 2.9.

$$f_k \geq f_{min} \quad \forall r_k \in R \quad (2.9)$$

La ecuación 2.10 representa la restricción del tamaño de la flota que se usa para la red de transporte público.

$$\sum_{r_k \in R} f_k t_k \leq W_{max} \quad (2.10)$$

Donde:

d_{ij} = Demanda de viajes del nodo i al j.

tv_{ij} = Periodo que pasa el usuario en el medio de transporte del nodo i al j.

t_{ij}^* = Duración del traslado por la ruta más corta entre el nodo i al j

tt_{ij} = Duración del cambio de vehículo entre el nodo i al j

- te_{ij} = la demora del paso del autobús del punto i al j.
- $f_k t_k$ = Numero de autobuses operando en ruta k;
- f_k = Frecuencia de autobuses operando en ruta k^{th} .
- t_k = Tiempo de ida y vuelta de la ruta de orden k^{th} .
- a_1 y a_2 = Coeficientes de conversión a (costos no especificados)
- α_{ij} = Cambio máximo de camino permisible para la duración del recorrido.
- t_{min} y t_{max} = Duración de recorridos mínima y máxima respectivamente.
- f_{min} = Frecuencia mínima
- W_{max} = Es un valor máximo establecido para el tamaño de la flota.

Capítulo 3. Metodología

Para optimizar la distancia de recorrido de los autobuses con el desarrollo y la aplicación de algoritmos genéticos, se utilizó el procedimiento presentado en la figura 3.1:

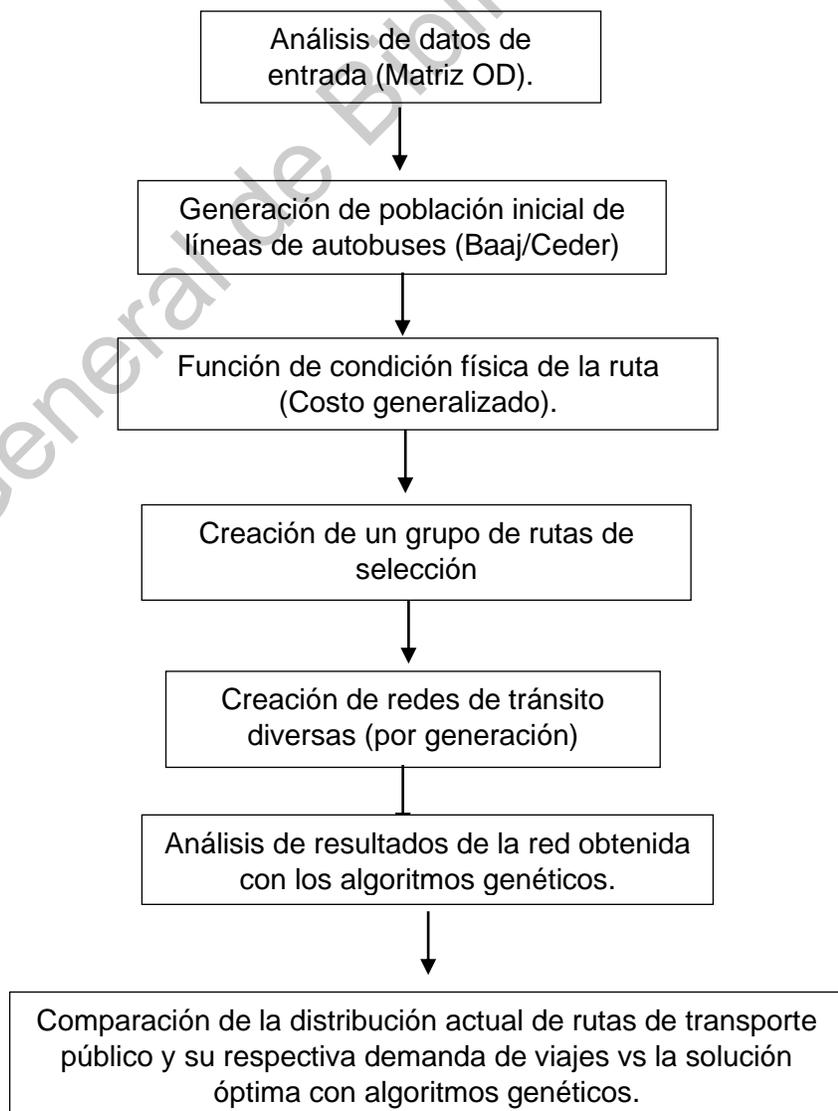


Figura 3.1. Metodología

3.1. Análisis de datos de entrada

Los elementos considerados para el estudio son aportados por organismos gubernamentales específicamente el Instituto Queretano de Transporte correspondientes al año 2017. Los datos de entrada, que se utilizaron para poder desarrollar el algoritmo genético, han sido señalados por Zhao *et al.* (2014), Arbex y da Cunha (2015) y Owais y Osman (2018), y se describen brevemente a continuación:

- La estructura de la red de calles y carreteras disponible para diseñar y optimizar las líneas de transporte público presentadas en la figura 3.2. Las infraestructuras disponibles dentro de la zona de estudio son de los municipio que forman parte de dicho territorio compuesto por Querétaro, El Marqués, Corregidora, Huimilpan y Colón.

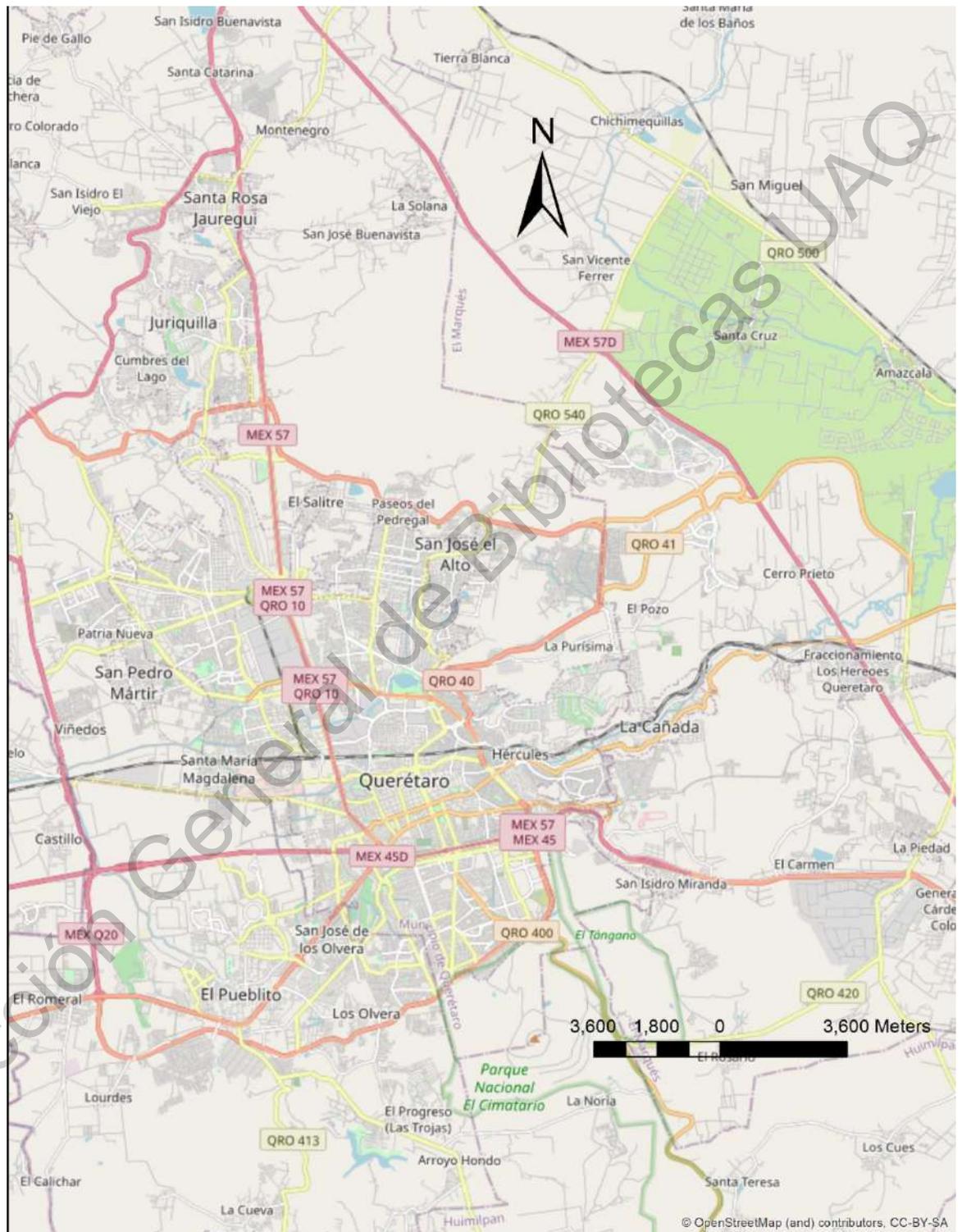


Figura 3.2. Esquema del sistema de infraestructuras disponibles.

- Registros referentes a la duración de los traslados en cada parte de las líneas de transporte que llevan los usuarios de un punto a otro. Los tiempos de viaje entre dos nodos son los mismos independientemente de la dirección. La información de las líneas de autobuses con su tiempo de recorrido en minutos para el ciclo completo de los viajes de ida y regreso se presentan en el anexo 1.
- Datos relativos a la demanda de viajes por tránsito entre cada par origen-destino: también conocida como matriz origen-destino. Las matrices usadas son actualizadas con el modelo gravitacional. Las figuras 3.3 y 3.4 presentan los fragmentos de los matrices usados para la aplicación de los algoritmos.

ORIGEN	DESTINO	GENERALIZE	INVEHICLE	INITIAL_WA	TRANSFER_W	TRANSFER_T	ACCESS_TIM	EGRESS_TIM	TIEMPO_BAS	VIAJES_TPU	TARGET	FIELD_1
555106	555008	28.76	8.58	1.15	0.00	0.00	12.30	12.05	32.93	18421.00	559.45	41.16
555059	555131	30.02	7.52	0.91	0.86	1.07	2.79	3.01	14.39	6920.00	480.87	17.99
555103	555090	17.25	3.93	0.80	0.00	0.00	5.82	1.95	11.70	4415.00	377.34	14.63
554944	554946	21.68	6.76	4.00	0.00	0.00	9.41	2.80	18.97	6920.00	364.78	23.71
554952	554908	28.11	6.25	2.50	0.00	0.00	17.67	6.44	30.36	10095.00	332.51	37.95
554873	555423	18.14	3.77	2.21	0.00	0.00	2.90	5.49	12.15	3103.00	255.32	15.19
554886	555402	18.66	6.64	4.00	0.00	0.00	4.17	2.38	13.19	3295.00	249.82	16.49
555103	554882	26.46	34.42	2.50	0.00	0.00	5.82	3.05	43.30	9986.00	230.63	54.13
554985	554885	26.21	21.34	6.00	0.00	0.00	6.64	4.10	32.08	6922.00	215.76	40.10
555422	554882	27.30	23.12	4.00	0.00	0.00	7.46	5.17	35.75	7274.00	203.45	44.69
555118	555117	17.76	3.53	3.00	0.00	0.00	6.08	1.50	11.11	2167.00	195.06	13.89
554873	555396	27.05	23.25	4.00	0.00	0.00	8.44	4.39	36.07	6921.00	191.85	45.09
555331	555405	25.59	29.34	1.88	0.00	0.00	2.52	5.59	37.46	6921.00	184.78	46.83
554861	555234	25.80	4.84	2.40	0.00	0.00	18.20	2.91	25.96	4584.00	176.59	32.45
555325	554979	31.24	19.00	5.00	0.00	0.00	16.66	5.25	40.90	6920.00	169.18	51.13
555436	555052	40.30	26.91	1.82	1.26	0.00	9.28	5.31	41.50	6920.00	166.73	51.88
555397	555320	25.22	13.43	4.50	0.00	0.00	11.04	2.34	26.81	4380.00	163.36	33.51
555003	555090	19.63	11.12	3.00	0.00	0.00	4.96	1.95	18.03	2868.00	159.08	22.54
554873	555392	21.02	13.01	2.21	0.00	0.00	2.90	5.99	21.91	3326.00	151.82	27.39
554987	554945	23.52	16.11	1.09	0.00	0.00	7.10	6.37	29.57	4382.00	148.21	36.96
555331	555052	29.04	39.61	5.00	0.00	0.00	4.23	3.64	47.48	6921.00	145.77	59.35
555071	555120	20.18	8.79	1.18	0.00	0.00	3.95	6.96	19.71	2868.00	145.54	24.64
555397	554882	20.98	7.83	2.22	0.00	0.00	6.03	5.17	19.04	2726.00	143.20	23.80
554873	554876	21.37	8.39	2.06	0.00	0.00	2.90	8.82	20.10	2876.00	143.08	25.13
555331	555408	21.02	17.08	5.00	0.00	0.00	2.52	2.15	21.76	3103.00	142.59	27.20
555110	555066	21.75	8.71	0.98	0.00	0.00	4.63	8.66	22.00	3074.00	139.72	27.50

Figura 3.3. Fragmentos de la matriz usada para la aplicación del algoritmo de Ceder y Wilson.

Fuente: Instituto Queretano del Transporte

ORIGEN	DESTINO	VIAJES
555106	555008	18421.00
554952	554908	10095.00
555103	554882	9986.00
555422	554882	7274.00
555015	555397	7080.00
554985	554885	6922.00
555436	555228	6921.00
555331	555405	6921.00
555331	555052	6921.00
555325	555320	6921.00
554873	555396	6921.00
555436	555164	6920.00
555436	555052	6920.00
555325	554979	6920.00
555228	554984	6920.00
555059	555131	6920.00
555015	555164	6920.00
554944	554946	6920.00
555313	554865	5841.00
555059	555432	4734.00
554997	555015	4623.00
554861	555234	4584.00
555103	555090	4415.00
555397	554952	4382.00
554987	554945	4382.00
554969	555125	4382.00
554953	554882	4381.00

Figura 3.4. Fragmentos de la matriz usada para la aplicación del algoritmo de Baaj y Mahmassani.

Fuente: Universidad Autónoma de Querétaro.

- Datos relativos a los parámetros de diseño como el tiempo que pasa el usuario en el vehículo, el tiempo mínimo que separa el paso de autobús en cada ruta, las paradas en ruta y físicas, la capacidad de asientos del autobús (asumiendo que todos los autobuses son homogéneos en términos de capacidad de asientos para poder uniformizar el sistema) y el factor de carga máxima permitida en cualquier ruta de tránsito. Las figuras 3.5 y 3.6 muestran los puntos de espera físicos y en el camino de los usuarios en la zona en estudio.

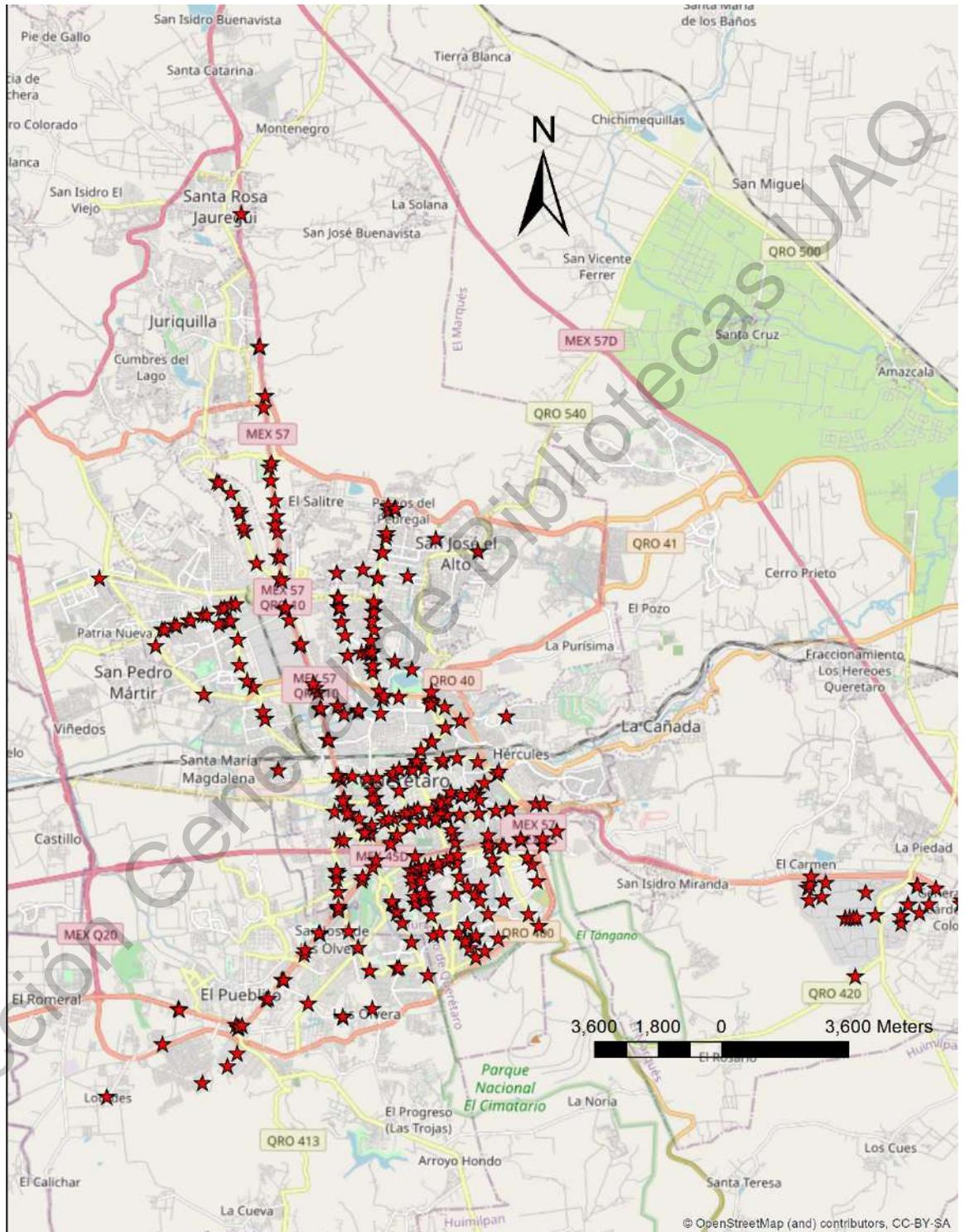


Figura 3.5. Paradas físicas.

Fuente: elaboración propia con datos del Instituto Queretano de Transporte.

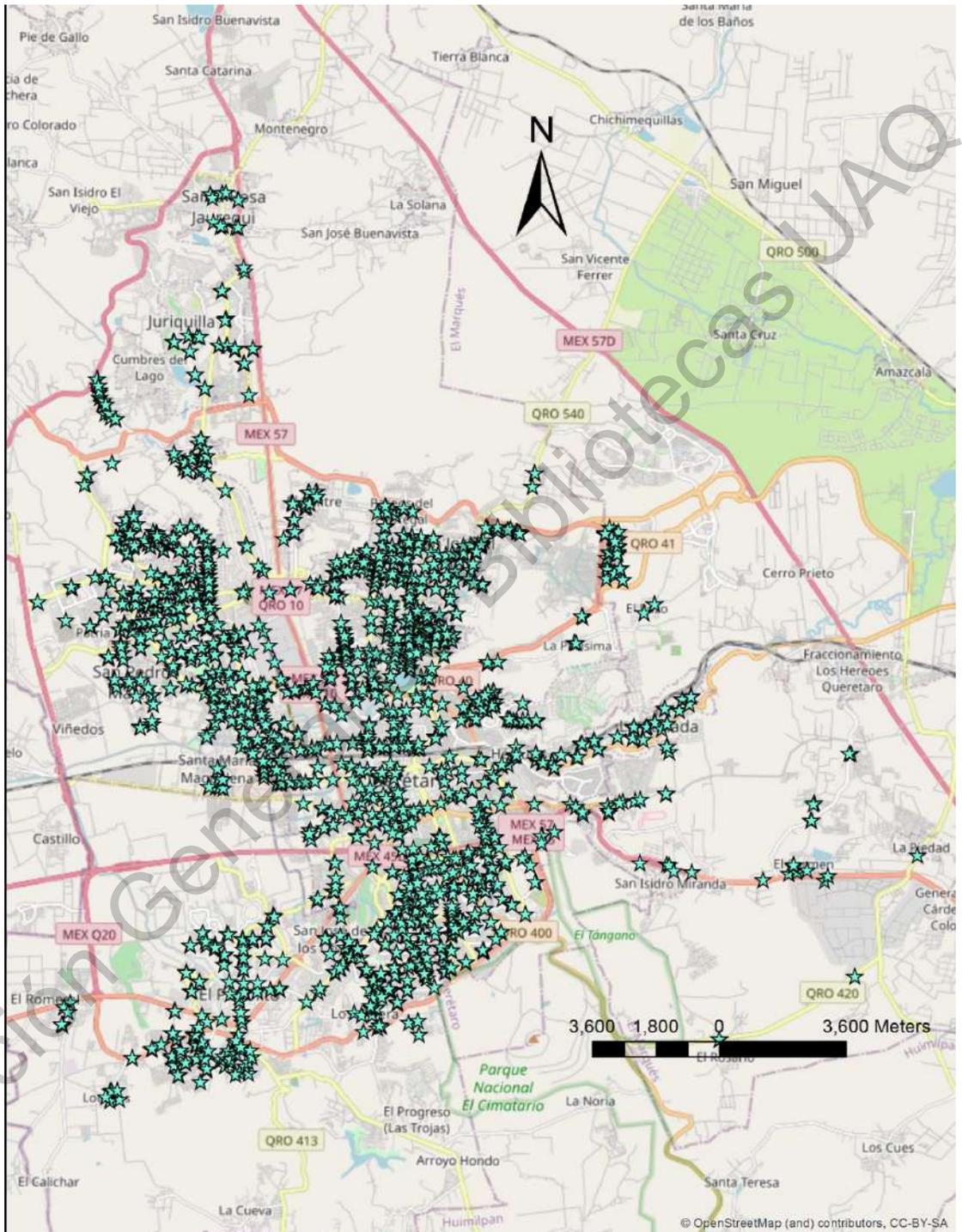


Figura 3.6. Paradas en ruta.

Fuente: elaboración propia con datos del Instituto Queretano de Transporte.

3.2. Generación de población inicial de líneas de transporte público.

En esta etapa, las rutas se construyeron de manera secuencial como lo sugirieron Berrebi *et al.* (2015) y Owais y Osman (2018). Para iniciar la generación de rutas, se determinó un nodo inicial y a partir de este nodo se seleccionará el nodo que le sucede. El proceso continuó siempre que se pueden seleccionar nodos o el individuo no está limitado por la longitud de las líneas máxima predefinida. El procedimiento se ejecutó, en computadora en un software de sistema de información geográfica (TransCAD), con el uso de dos algoritmos en la etapa de concepción de las líneas que sirvieron de base, implementados por Baaj y Mahmassani (1991) y por Ceder y Wilson (1986), programados en el lenguaje de programación C. Se generaron 1000 líneas de transporte público con las heurísticas de Baaj y de Ceder aplicando restricciones de tiempo mínimo y máximo de viaje para la construcción. La figura 3.7 muestra el método de concepción de las líneas generadas con los dos algoritmos mencionadas anteriormente.

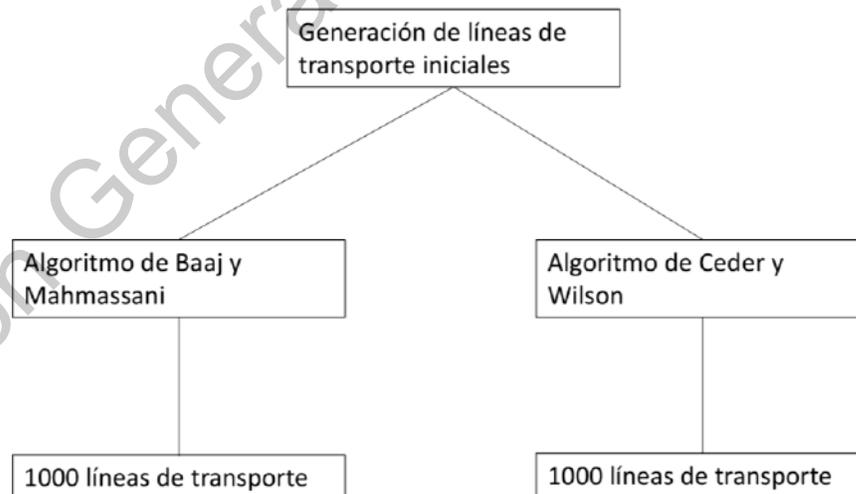


Figura 3.7. Proceso de generación de líneas de transporte público.

Para la aplicación de los algoritmos, se usó una computadora laptop con las siguientes características: Memoria RAM de 16 GB, de sistema operativo de 64 bits, de procesador Intel® Core™ i7 de 10ª generación, con Velocidad del procesador de 4.0 GHz y Windows 10. Al conjunto de líneas de Baaj, se le denominó padre 1 y al conjunto de líneas de Ceder, se le denominó padre 2.

3.3. Función de condición física de ruta

Haciendo enfoque en el sistema planteado por Arbex y da Cunha (2015) y Owais y Osman (2018), se determinó que la función objetivo es el elemento clave para la concepción de los elementos del sistema. Se utilizó la ecuación de costo generalizado para métodos de equilibrio de TransCAD para la evaluación de las líneas generadas. Esta fórmula está presentada en la ecuación 3.1. Esta ecuación es implementada en el desarrollo del algoritmo genético.

El procedimiento elegido para la distribución de las personas que usan este medio de transporte en el sistema tiene el nombre “Equilibrio del usuario”. Porque es un método que refleja lo que sucede en la red en realidad y que considera la cantidad de gente que lleva un vehículo por hora y la selección del camino por el usuario; todo este sistema tiene como base la tardanza con la que se proporciona el servicio.

$$C_k = \sum_{i \in J} [r_j + VOT * (\gamma_x x_j + \gamma_w w_j)] + \sum_{i \in J} [VOT * (\gamma_d d_i + \gamma_v t_i (1 + \alpha (v_i / C_i)^\beta))] \quad (3.1)$$

Donde:

C_k = Costo total de la ruta k , en términos monetarios.

C_i = Capacidad horaria de los vehículos que sirven al enlace i .

d_i = Tiempo de permanencia en las paradas asociadas al enlace i .

i = Índice de un enlace por el que pasa la ruta k .

I = Conjunto de enlaces utilizados en la ruta k .

j = Índice de una línea de tránsito utilizada en la ruta k .

J = Conjunto de líneas de tránsito utilizadas en la ruta k .

r_j = Tarifa por línea j .

t_i = Tiempo en el vehículo o tiempo sin tránsito en el enlace i .

v_i = Volumen en enlace i .

VOT = Valor monetario de la unidad de tiempo.

w_j = Tiempo de espera para la línea de tránsito j .

x_j = Transferencia de tiempo de penalización para la línea de tránsito j .

α, β = Parámetros del efecto de apiñamiento.

γ_d = Peso del tiempo de residencia.

γ_v = Peso de tiempo en el vehículo.

γ_w = Peso del tiempo de espera

γ_x = Peso del tiempo de penalización por transferencia.

Si j es la primera línea de tránsito abordada, entonces x_j es igual a cero.

Las variables asociadas con VOT representan el tiempo y las variables asociadas con VOI representan: impedancia, que luego se convierten en valor monetario. En la ecuación 3.1, los efectos de incomodidad debido a la congestión de embarque / desembarque se contabilizan. Utilizando el valor positivo adecuado de los parámetros correspondientes, los esfuerzos de incomodidad se pueden expresar en medida de tiempo. Los parámetros VOT , VOI , γ_d , γ_v , γ_w , γ_x , α , β , y los que se utilizan para calcular el tiempo de permanencia están todos determinados por el usuario.

Cabe señalar que, en una asignación de tránsito estocástico, t_i y w_j son variables aleatorias. El usuario debe especificar los tipos de funciones de distribución aleatoria para el avance del vehículo y la percepción del costo del usuario, así como sus variaciones. Las variaciones de avance para las líneas de tránsito deben incluirse en la tabla de ruta, mientras que la variación en la percepción del costo del usuario se define como un valor global.

El retraso en el ascenso / descenso se captura en el tiempo de permanencia. A lo largo de un camino, el tiempo de permanencia se calcula para cada parada, dada por la ecuación 3.2:

$$d = c_0 + c_1 * v_{on} + c_2 * v_{off} \quad (3.2)$$

Donde:

d = Tiempo de permanencia.

c_0 = Constante.

c_1 = Peso por volumen de ascenso.

c_2 = Peso por el volumen de descenso.

v_{on} = Volumen de ascenso.

v_{off} = Volumen de descenso.

Ambos c_1 y c_2 tienen valores positivos para los modelos de equilibrio. Los pesos para el tiempo de permanencia se pueden establecer en cero cuando se supone que la permanencia está incorporada en el tiempo del recorrido del enlace.

El tiempo de espera se calcula en cada parada donde se produce el embarque inicial o un traslado, con las ecuaciones 3.3 y 3.4.

$$w = \alpha * h \quad (3.3)$$

$$w = \alpha/f \quad (3.4)$$

w = Tiempo de espera

α = Parámetro entre llegadas.

h = Intervalo de paso.

f = Frecuencia de servicio de línea.

3.4. Creación de una selección de un grupo de líneas de transporte público.

En este paso, el objetivo fue iterar a los operadores (en este caso, la selección) de los algoritmos genéticos, para crear un conjunto de líneas de transporte público mejoradas para el siguiente nivel de selección, de acuerdo a lo citado en los artículos de *Boyles et al.* (2014), *Li et al.* (2014), *Arbex y da Cunha* (2015) y *Owais y Osman* (2018).

Puesto que la red del año 2017 contaba con la cantidad de 74 líneas, en esta investigación, los grupos de padres sea del 1 o del 2 cuentan con la misma cantidad para poder compararse con la existente en este año. El algoritmo genético seleccionó, en la primera iteración, de forma aleatoria 74 líneas de autobuses de Ceder y asignó los viajes de la matriz OD utilizando estrategias óptimas del software TransCAD, volvió a seleccionar de forma aleatoria 74 líneas de autobuses y asignó nuevamente los viajes repitiendo este procedimiento hasta 100 iteraciones. Este mismo proceso se realizó con las rutas generadas con las heurísticas de Baaj y Mahmassani. La Figura 3.8 muestra el proceso de la cantidad de veces que fueron aplicados los algoritmos genéticos para seleccionar los conjuntos de padres. Se estimó, para todo el sistema (de 74 rutas), el costo generalizado total, se almacenaron los datos y se usaron estos primeros padres para comenzar con el cruzamiento.

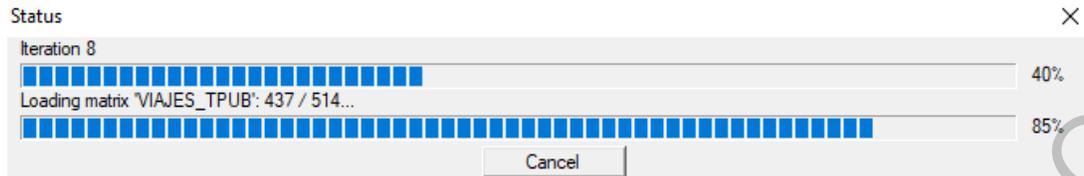


Figura 3.8. Procesamiento de la selección aleatoria de las líneas de transporte público.

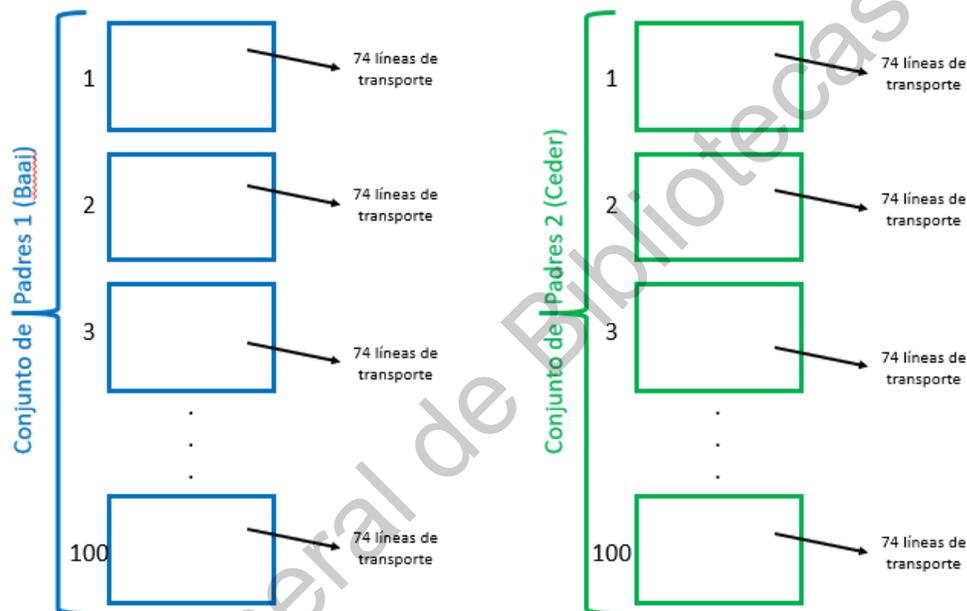


Figura 3.9. Proceso de selección de conjuntos de padres de líneas de transporte público.

3.5. Creación de redes de tránsito diversas

En esta etapa, los algoritmos se utilizaron para crear un conjunto de redes de tránsito con una variedad de parámetros de red, aplicándolos a las poblaciones iniciales generadas con los algoritmos de Ceder y Wilson y Baaj y Mahmassani, y a la red existente, para la siguiente etapa del análisis de los resultados. El proceso de cruce de este algoritmo se hace de manera aleatoria en un punto para crear nuevas líneas de autobuses (hijos). El algoritmo genético hizo un cruzamiento, en un punto aleatorio, de las mejores opciones de líneas de transporte público de Baaj y Mahmassani y de Ceder y Wilson, para formar nuevas

líneas de autobuses candidato (hijos); y estos hijos se vuelven a cruzar para formar las líneas óptimas de autobuses. La Figura 3.10 muestra la representación del cruzamiento de las líneas de autobuses dentro de los padres seleccionados aleatoriamente.

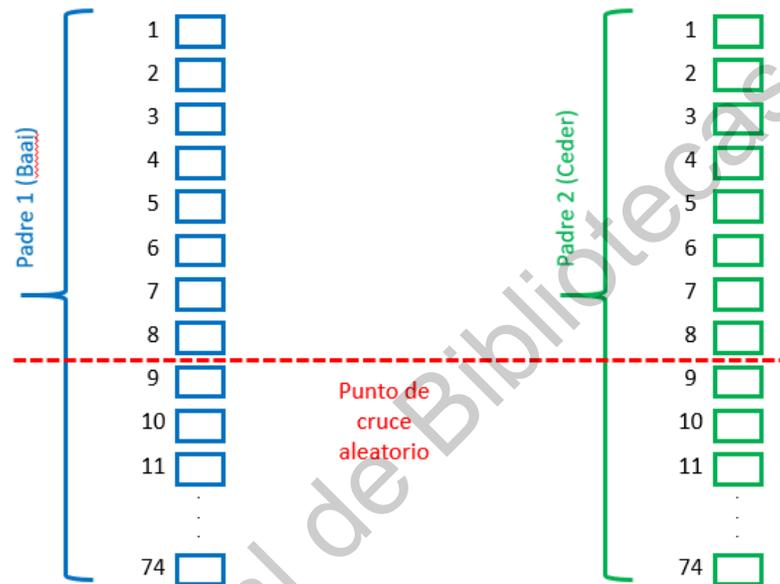


Figura 3.10. Proceso de cruzamiento de las líneas de transporte público.

3.6. Análisis de resultados de la red obtenida con los algoritmos genéticos

Los resultados mostrados en TransCAD al final de la aplicación del algoritmo programa (costos generalizados y costo de caminata) y los esquemas de representación del sistema, se analizaron con el objetivo de encontrar la distribución ideal del sistema a partir del análisis comparativo de los costos generalizados.

3.7. Comparación de la distribución actual de rutas de transporte público y su respectiva demanda de viajes vs la solución óptima con algoritmos genéticos

Esta fase consistió en examinar los elementos numéricos asociados con el sistema de la zona en estudio (la cantidad de usuarios que usan el transporte, la distribución de las líneas actualmente); éstos fueron comparados con los resultados de los sistemas obtenidos. Esto, ayudó a confirmar la optimización de la red existente con el uso de algoritmos genéticos que es un método de optimización en la búsqueda de conexión de grandes redes evaluando indicadores. Los datos de la red del instituto Queretano de Transporte que fueron analizados se ven en las tablas del Anexo 1. La figura 3.11 muestra el sistema que existe en la zona de estudio.

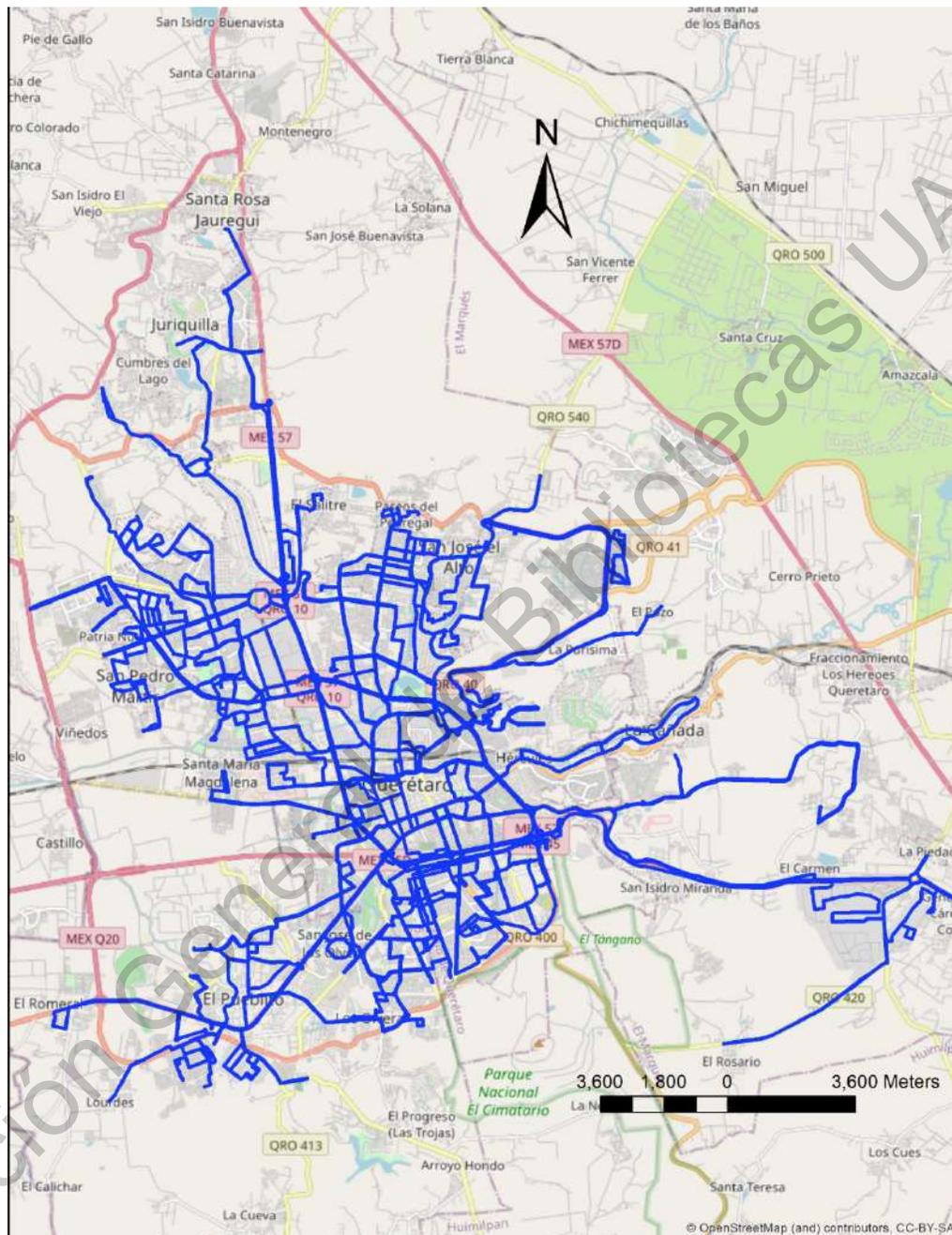


Figura 3.11. Mapa de líneas de transporte de la red existente en la zona metropolitana.

Fuente: elaboración propia con datos del Instituto Queretano de Transporte.

Capítulo 4. Resultados y discusión

El análisis de los datos proporcionados por el instituto Queretano de Transporte llevó a los resultados observados en las tablas del anexo 4 los cuales muestran que la distancia y el tiempo de recorrido de las líneas de transporte están elevados en comparación con los aceptados.

La utilización de la densidad poblacional en este proyecto de investigación es para hacer la consideración que se puede considerar en otros lugares al igual que en la zona de estudio. Una zona metropolitana es un grupo de municipio conectados por sus actividades económicas y sociales. Considerando los estudios realizados por Obregón y Betanzo (2015), La densidad poblacional está estrechamente ligado al costo de los viajes por las distancias de recorridos, mayor es la mancha urbana, mayor es la distancia que se debe de recorrer; mayor densidad de población, menor huella en el territorio, así como un despliegue menos disperso de servicios básicos (transportes, entre otros). Por lo que se consideró la densidad poblacional de una zona metropolitana mediana como lo es Querétaro.

Del uso de los algoritmos de Ceder y Wilson (1986) y Baaj y Mahmassani (1991), se obtuvieron redes de las iteraciones seleccionando como nodos iniciales las de máxima demanda, las redes obtenidas y sus características se presentan en las figuras 4.1 y 4.2.

Se crearon un grupo de 1000 líneas (2000 contando ida y regreso), con la heurística de Baaj y Mahmassani; Las rutas generadas con el algoritmo de Ceder y Wilson fueron 139 (278 contando ida y regreso) por el cumplimiento de la condición de tiempo de viaje máxima y mínima; de las restricciones.

Las distancias de recorrido de los nuevos caminos creados con los dos algoritmos cambian de manera fortuita sin tener un esquema uniforme de transformación y estos caminos tienen menos distancia de recorrido que los existentes. La duración de los recorridos tiene las mismas configuraciones que las distancias, con la diferencia que en comparación a las existente, la variación es mucho mayor.

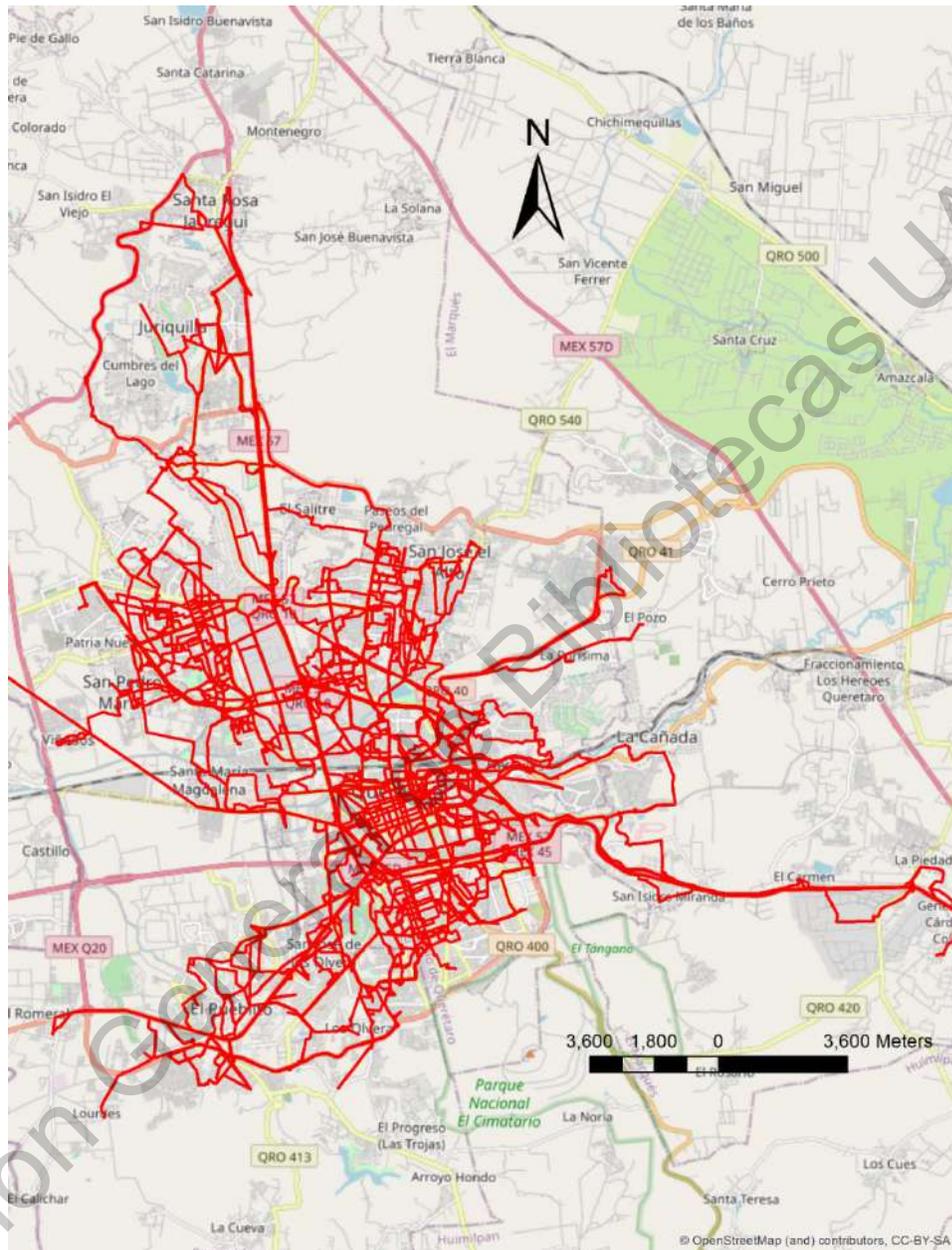


Figura 4.1. Líneas de transporte público generadas con el algoritmo Baaj y Mahmassani.

Fuente: Elaboración propia.

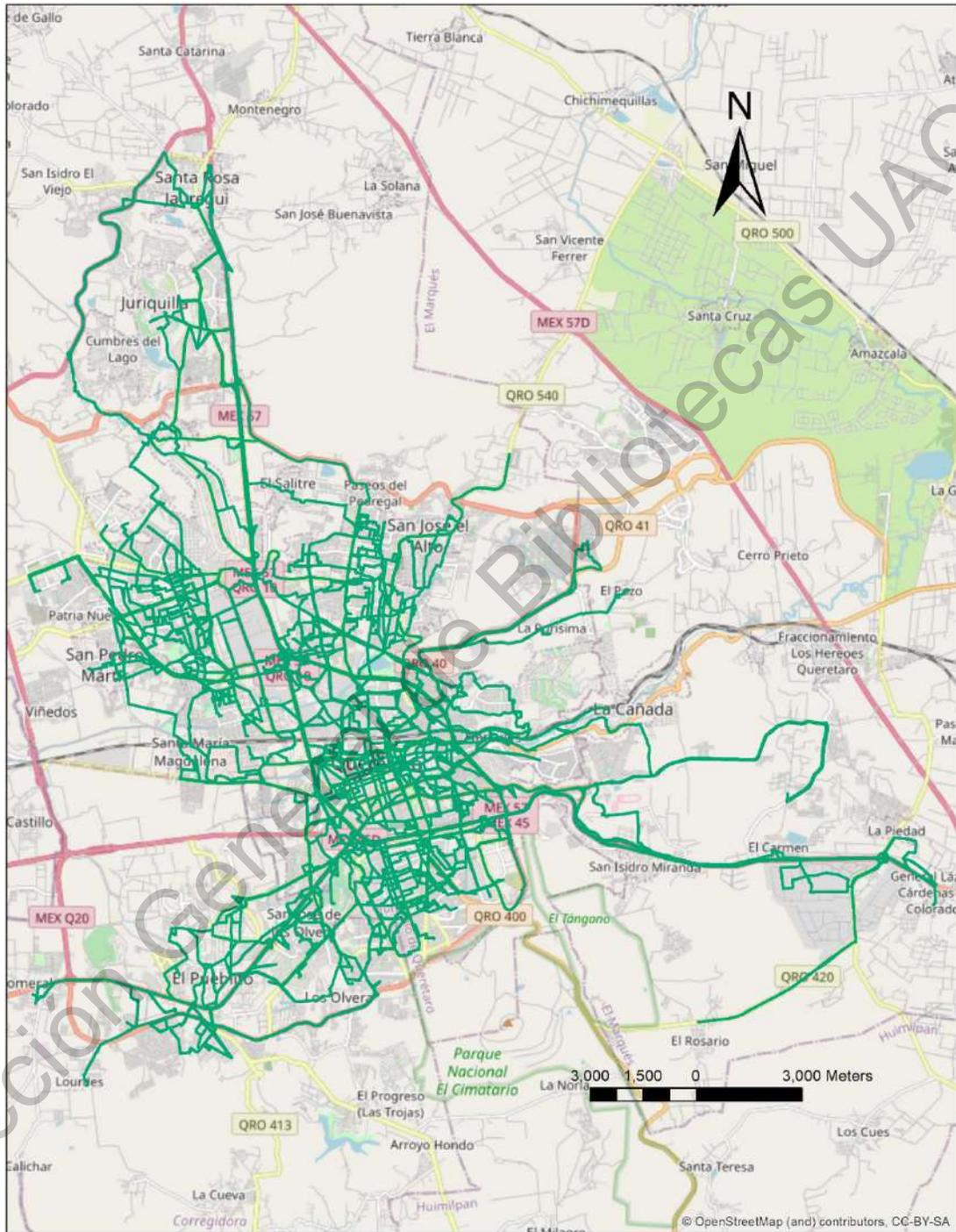


Figura 4.2. Líneas de transporte público generadas con el algoritmo Ceder y Wilson.

Fuente: Elaboración propia.

Se tomaron las primeras 74 líneas de transporte público generadas por los dos primeros algoritmos para poder hacer comparación con la red existente mostrada en la figura 3.11. Las figuras 4.3 y 4.4 representan las gráficas de las redes que constituyen las primeras 74 líneas de transporte respectivamente generadas por los algoritmos de Baaj y Mahmassani y Ceder y Wilson.

Los dos algoritmos ofrecen porcentajes considerables de reducción en cuestión de tiempo y distancia media de viaje en la tabla 4.1. La duración y los trayectos de los recorridos sufren una rebaja importante después de emplear los dos algoritmos. Los resultados para los dos factores, mencionados en este párrafo, son respectivamente, para Baaj y Mahmassani, Ceder y Wilson e IQT, de 5867,00, 5863,00 y 9945,00 min; y desde 1938.98, 1933.68 y 2968.38 km.

El tiempo y la distancia medios de los algoritmos y la red existente están más cerca, pero hay una reducción, expresada como porcentaje para cada algoritmo (respectivamente 8,80% y 9,05% para la distancia; y 17,63% y 17,69% para el tiempo. El algoritmo de Baaj y Mahmassani toma menos tiempo de ejecución que el de Ceder y Wilson.

Tabla 4.1. Tabla de los resultados de las redes generadas con los dos primeros algoritmos.

	Algoritmo de Baaj y Mahmassani	Algoritmo de Ceder y Wilson	IQT
Distancia total de viaje (Km)	1938.98 Km	1933.68 Km	2968.38 Km
Distancia media de viaje (Km)	36.58 Km	36.48 Km	40.11 Km
% de reducción	8.80%	9.05%	
Tiempo total de viaje (min)	5867 min	5863 min	9945 min
Tiempo medio de viaje (min)	110.7 min	110.62 min	134.39 min
% de reducción	17.63%	17.69%	
Km de rutas	747.94 Km	747.94 Km	747.94 Km

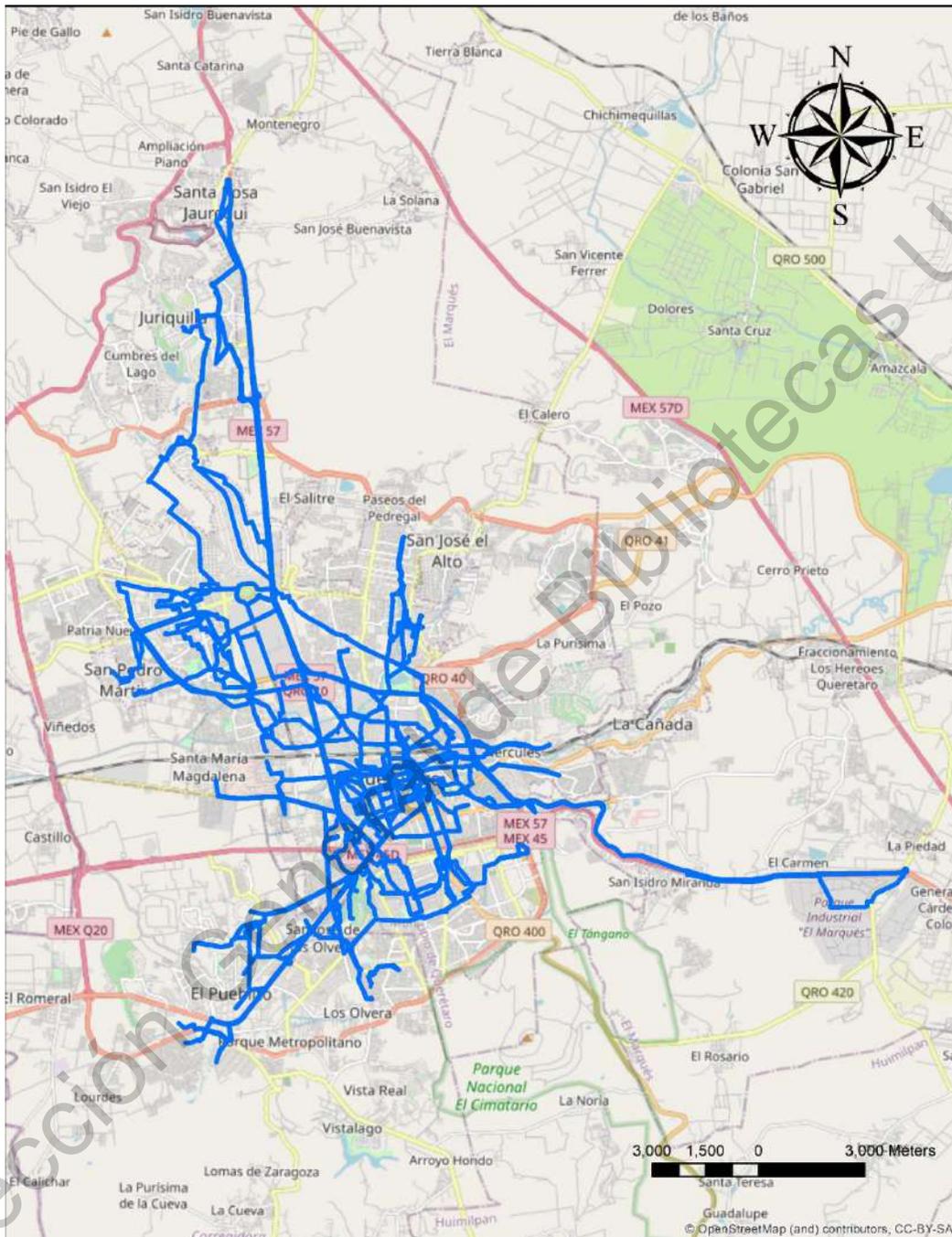


Figura 4.3. Primeras 74 líneas de transporte público generadas con el algoritmo Baaj y Mahmassani.

Fuente: Elaboración propia.

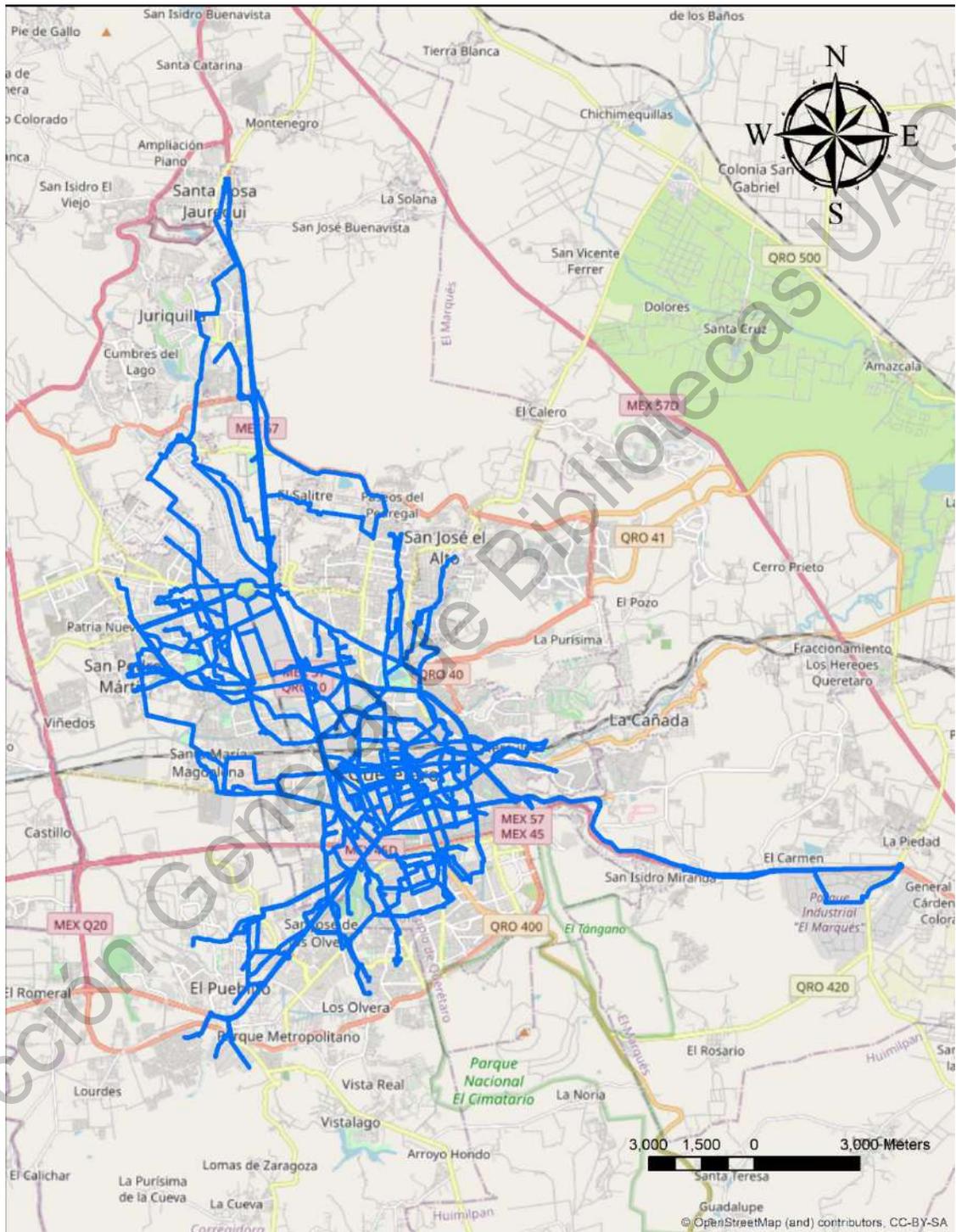


Figura 4.4. Primeras 74 líneas de transporte público generadas con el algoritmo Ceder y Wilson.

Fuente: Elaboración propia.

Después de obtener las líneas de transporte público iniciales, se aplicaron los algoritmos genéticos a estas líneas. En la primera fase, se eligen los grupos de padres con los cuales se van a realizar las operaciones de los algoritmos genéticos para generar resultados que se van a analizar. Los dos primeros algoritmos (de Baaj y Mahmassani y de Ceder y Wilson) crearon un grupo de líneas que se consideran como padres (Padre 1 y Padre 2 respectivamente).

Se seleccionaron, de forma aleatoria, 74 rutas de transporte pertenecientes al conjunto de líneas del padre 1 (Baaj) y 74 rutas de transporte pertenecientes al conjunto de líneas del padre 2 (Ceder). Los dos procesos anteriores se repitieron 100 veces porque el tiempo de cómputo fue limitado, aproximadamente 3 horas para evaluar a cada padre. Se estimó, para todo el sistema (de 74 rutas), el costo generalizado total, se almacenaron los datos y se usaron estos primeros padres para comenzar con el cruzamiento.

Para realizar el cruzamiento de los padres, se usó el cruzamiento en un punto. Se generó un número aleatorio mayor que 1 y menor a 74 para generar los dos nuevos padres: el padre 1 obtuvo las líneas de transporte del método de Baaj en la primera parte, y las rutas de Ceder en la segunda parte y el padre 2 obtuvo las líneas de transporte del método de Ceder en la primera parte, y las rutas de Baaj en la segunda parte.

Este procedimiento se realizó 100 veces y se evaluó la función de desempeño para obtener 100 hijos 1 y 100 hijos 2. Se seleccionaron los 50 mejores hijos evaluados del padre 1 y los 50 mejores del padre 2 para formar a la siguiente generación. La figura 4.5 representa el primer cruzamiento dentro de los padres escogidos de manera aleatoria en donde se ve que se respeta un orden y los resultados que se generan a partir del padre seleccionado como primero.

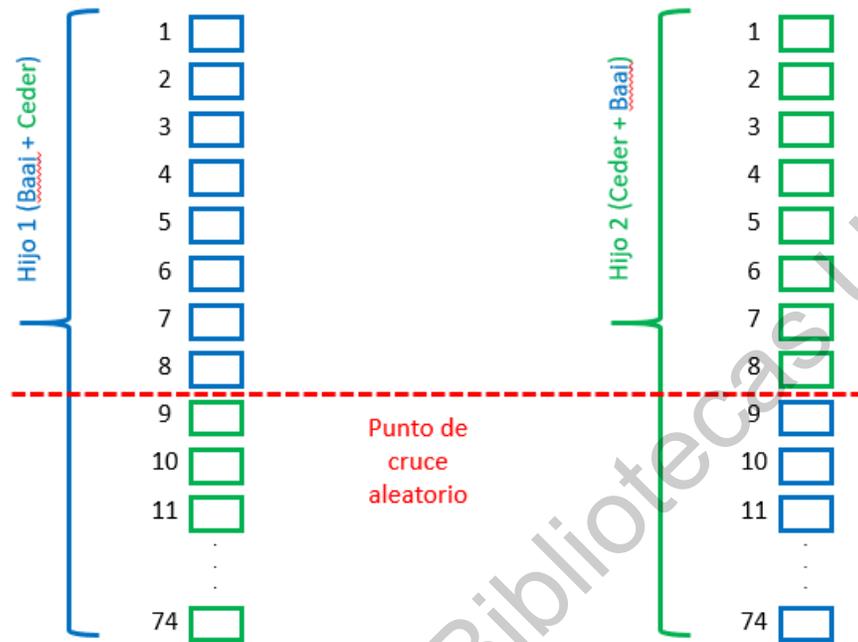


Figura 4.5. Cruzamiento de la primera generación en el punto después de la línea de transporte 8.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la 2da generación, ya no hay un orden de líneas de transporte, por metodología; Por lo que, la selección de los conjuntos de elementos padres y de los puntos de cruzamiento se hace al azar debido a lo mencionado anteriormente. Por esta razón, no existe correspondencia entre los hijos de la 2da generación, ni habrá en las generaciones siguientes. Las figuras 4.6 y 4.7 representan el segundo cruzamiento en donde se ve que no existe un orden.

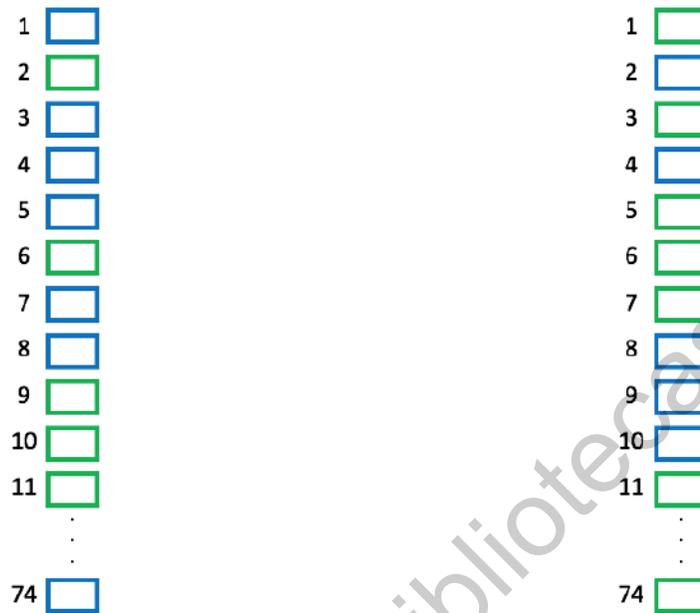


Figura 4.6. Cruzamiento de la segunda generación.

Fuente: Elaboración propia.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
2	3024392.33	315001.581	Bj_0026r	Bj_0026r	Bj_0240r	Bj_0240r	Bj_0818r	Bj_0818r	Bj_0754r	Bj_0754r	Bj_0470r	Bj_0470r	Bj_0660r	Bj_0660r	Bj_0836r	Bj_0836r	Bj_0295r	CD_C
3	4020783.85	238106.394	Bj_0409r	Bj_0409r	Bj_0041r	Bj_0041r	Bj_0842r	Bj_0842r	Bj_0092r	Bj_0092r	Bj_0661r	Bj_0661r	Bj_0649r	Bj_0649r	Bj_0133r	Bj_0133r	Bj_0257r	Bj_02
4	4069380.47	300561.97	Bj_0750r	Bj_0750r	Bj_0418r	Bj_0418r	Bj_0018r	Bj_0018r	Bj_0109r	Bj_0109r	Bj_0566r	Bj_0566r	Bj_0308r	Bj_0308r	Bj_0321r	Bj_0321r	Bj_0125r	Bj_01
5	4121175.79	260055.866	Bj_0424r	Bj_0424r	Bj_0159r	Bj_0159r	Bj_0925r	Bj_0925r	Bj_0764r	Bj_0764r	Bj_0381r	Bj_0381r	Bj_0584r	Bj_0584r	Bj_0183r	Bj_0183r	Bj_0683r	Bj_06
6	4154042.15	301601.206	Bj_0573r	Bj_0573r	Bj_0678r	Bj_0678r	Bj_0529r	Bj_0529r	Bj_0375r	Bj_0375r	Bj_0463r	Bj_0463r	Bj_0756r	CD_0068r	CD_0079r	CD_0079r	CD_0084r	CD_C
7	4194122.56	218203.751	Bj_0514r	Bj_0514r	Bj_0771r	Bj_0771r	Bj_0733r	Bj_0733r	Bj_0029r	Bj_0029r	Bj_0972r	Bj_0972r	Bj_0621r	Bj_0621r	Bj_0127r	Bj_0127r	Bj_0536r	Bj_0536r
8	4323562.23	220889.857	Bj_0471r	Bj_0471r	Bj_0155r	Bj_0155r	Bj_0474r	Bj_0474r	Bj_0118r	Bj_0118r	Bj_0569r	Bj_0569r	Bj_0647r	Bj_0647r	Bj_0882r	Bj_0882r	Bj_0536r	Bj_05
9	4454068.87	278876.021	Bj_0999r	Bj_0999r	Bj_0507r	Bj_0507r	Bj_0057r	Bj_0057r	Bj_0545r	Bj_0545r	Bj_0910r	Bj_0910r	Bj_0392r	Bj_0392r	Bj_0391r	Bj_0391r	Bj_0060r	Bj_0060r
10	4499556.25	281455.339	Bj_0424r	Bj_0424r	Bj_0159r	Bj_0159r	Bj_0155r	Bj_0155r	Bj_0925r	Bj_0925r	Bj_0764r	Bj_0764r	Bj_0183r	Bj_0183r	Bj_0584r	Bj_0584r	Bj_0489r	Bj_0489r
11	4504745.33	292817.545	Bj_0905r	Bj_0905r	Bj_0396r	Bj_0396r	Bj_0474r	Bj_0474r	Bj_0907r	Bj_0907r	Bj_0164r	Bj_0164r	Bj_0564r	Bj_0564r	Bj_0564r	Bj_0817r	Bj_0817r	Bj_0290r
12	4545904.77	305346.725	Bj_0026r	Bj_0026r	Bj_0240r	Bj_0240r	Bj_0818r	Bj_0818r	Bj_0754r	Bj_0754r	Bj_0470r	Bj_0470r	Bj_0660r	Bj_0660r	Bj_0836r	Bj_0836r	Bj_0295r	Bj_02
13	4622120.24	289566.071	Bj_0648r	Bj_0648r	Bj_0539r	Bj_0539r	Bj_0948r	Bj_0948r	Bj_0794r	Bj_0794r	Bj_0541r	Bj_0541r	Bj_0426r	Bj_0426r	Bj_0944r	Bj_0944r	Bj_0723r	Bj_07
14	4635458.45	281203.947	Bj_0790r	Bj_0790r	Bj_0418r	Bj_0418r	Bj_0018r	Bj_0018r	Bj_0109r	Bj_0109r	Bj_0566r	Bj_0566r	Bj_0308r	Bj_0308r	Bj_0321r	Bj_0321r	Bj_0125r	Bj_01
15	4672102.77	271107.845	Bj_0378r	Bj_0378r	Bj_0492r	Bj_0492r	Bj_0702r	Bj_0702r	Bj_0248r	Bj_0248r	Bj_0249r	Bj_0249r	Bj_0863r	Bj_0863r	Bj_0386r	Bj_0386r	Bj_0820r	Bj_0820r
16	4710388.16	257118.772	Bj_0130r	Bj_0130r	Bj_0158r	Bj_0158r	Bj_0358r	Bj_0358r	Bj_0828r	Bj_0828r	Bj_0275r	Bj_0275r	Bj_0416r	Bj_0416r	Bj_0295r	Bj_0295r	Bj_0329r	Bj_0329r
17	4769304.64	349951.787	Bj_0905r	Bj_0905r	Bj_0396r	Bj_0396r	CD_0090r	CD_0094r	CD_0094r	CD_0135r	CD_0135r	CD_0135r	CD_0113r	CD_0113r	CD_0013r	CD_0099r	CD_0099r	CD_0110r
18	4780417.15	342562.684	Bj_0170r	Bj_0170r	Bj_0182r	Bj_0182r	Bj_0182r	Bj_0031r	Bj_0031r	Bj_0031r	Bj_0187r	Bj_0187r	Bj_0117r	Bj_0117r	Bj_0117r	Bj_0174r	Bj_0174r	Bj_0512r
19	4788635.6	250298.245	Bj_0362r	Bj_0362r	Bj_0968r	Bj_0968r	Bj_0780r	Bj_0780r	Bj_0883r	Bj_0883r	Bj_0177r	Bj_0177r	Bj_0325r	Bj_0325r	Bj_0325r	Bj_0755r	Bj_0755r	Bj_0455r
20	4795179.75	390001.506	Bj_0373r	Bj_0373r	Bj_0587r	Bj_0587r	Bj_0547r	Bj_0883r	Bj_0883r	Bj_0452r	Bj_0452r	Bj_0057r	Bj_0057r	Bj_0763r	Bj_0763r	Bj_0211r	Bj_0211r	Bj_0731r
21	4817216.05	250653.478	Bj_0750r	Bj_0750r	Bj_0418r	Bj_0418r	Bj_0018r	Bj_0018r	Bj_0109r	Bj_0109r	Bj_0566r	Bj_0566r	Bj_0308r	Bj_0308r	Bj_0321r	Bj_0321r	Bj_0125r	Bj_01
22	4830277.24	263248.939	Bj_0040r	Bj_0040r	Bj_0307r	Bj_0307r	Bj_0141r	Bj_0141r	Bj_0173r	Bj_0173r	Bj_0859r	Bj_0859r	Bj_0650r	Bj_0650r	Bj_0493r	Bj_0493r	Bj_0684r	Bj_0684r
23	4854313.07	292808.255	Bj_0905r	Bj_0905r	Bj_0396r	Bj_0396r	Bj_0474r	Bj_0474r	Bj_0907r	Bj_0907r	Bj_0164r	Bj_0164r	Bj_0564r	Bj_0564r	Bj_0564r	Bj_0817r	Bj_0817r	Bj_0290r
24	4857192.28	276882.664	Bj_0362r	Bj_0362r	Bj_0968r	Bj_0968r	Bj_0780r	Bj_0780r	Bj_0883r	Bj_0883r	Bj_0177r	Bj_0177r	Bj_0325r	Bj_0325r	Bj_0325r	Bj_0755r	Bj_0755r	Bj_0455r
25	4862093.3	279550.197	Bj_0074r	Bj_0074r	Bj_0254r	Bj_0254r	Bj_0799r	Bj_0799r	Bj_0774r	Bj_0774r	Bj_0916r	Bj_0916r	Bj_0108r	Bj_0108r	Bj_0108r	Bj_0723r	Bj_0723r	Bj_0650r
26	4871256.27	256961.297	Bj_0164r	Bj_0164r	Bj_0427r	Bj_0427r	Bj_0386r	Bj_0386r	Bj_0035r	Bj_0035r	Bj_0231r	Bj_0231r	Bj_0730r	Bj_0730r	Bj_0136r	Bj_0136r	Bj_0100r	Bj_0100r
27	4875574.6	312255.885	Bj_0815r	Bj_0815r	Bj_0831r	Bj_0831r	Bj_0178r	Bj_0178r	CD_0097r	CD_0097r	CD_0064r	CD_0064r	CD_0047r	CD_0047r	CD_0016r	CD_0016r	CD_0055r	CD_C
28	4933447.0	267392.674	Bj_0453r	Bj_0453r	Bj_0131r	Bj_0131r	Bj_0680r	Bj_0680r	Bj_0416r	Bj_0416r	Bj_0416r	Bj_0178r	Bj_0178r	Bj_0136r	Bj_0136r	Bj_0500r	Bj_0500r	Bj_0704r
29	4968523.64	174498	Bj_0366r	Bj_0366r	Bj_0135r	Bj_0135r	Bj_0335r	Bj_0335r	Bj_0970r	Bj_0970r	Bj_0666r	Bj_0666r	Bj_0587r	Bj_0587r	Bj_0867r	Bj_0867r	Bj_0188r	Bj_0188r
30	4972306.35	294702.436	Bj_0698r	Bj_0698r	Bj_0158r	Bj_0158r	Bj_0563r	Bj_0563r	Bj_0125r	Bj_0125r	Bj_0228r	Bj_0228r	Bj_0706r	Bj_0706r	Bj_0942r	Bj_0942r	Bj_0619r	Bj_0619r
31	5011368.79	325418.115	Bj_0603r	Bj_0603r	Bj_0197r	Bj_0197r	Bj_0713r	Bj_0713r	Bj_0296r	Bj_0296r	Bj_0296r	Bj_0577r	Bj_0577r	Bj_0882r	Bj_0882r	Bj_0597r	Bj_0597r	Bj_0239r
32	5040983.16	347821.773	Bj_0316r	Bj_0316r	Bj_0327r	Bj_0327r	Bj_0241r	Bj_0241r	Bj_0276r	Bj_0276r	Bj_0476r	Bj_0476r	Bj_0569r	Bj_0569r	Bj_0902r	Bj_0902r	Bj_0495r	Bj_0495r
33	5049555.13	306754.684	Bj_0524r	Bj_0524r	Bj_0322r	Bj_0322r	Bj_0322r	Bj_0287r	Bj_0287r	Bj_0287r	Bj_0216r	Bj_0216r	Bj_0316r	Bj_0316r	Bj_0500r	Bj_0500r	Bj_0902r	Bj_0902r
34	5064456.11	341401.994	Bj_0236r	Bj_0236r	Bj_0188r	Bj_0188r	Bj_0389r	Bj_0389r	Bj_0744r	Bj_0744r	Bj_0256r	Bj_0256r	Bj_0411r	Bj_0411r	CD_0021r	CD_0021r	CD_0019r	CD_0019r
35	5069653.52	344132.715	Bj_0378r	Bj_0378r	Bj_0267r	Bj_0267r	Bj_0267r	Bj_0883r	Bj_0883r	Bj_0452r	Bj_0452r	Bj_0057r	Bj_0057r	Bj_0763r	Bj_0763r	Bj_0211r	Bj_0211r	Bj_0731r

Figura 4.7. Resultados del cruzamiento de la segunda generación.

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento completo se repitió 25 veces (es decir por 25 generaciones) que se observó que el óptimo tenía una variación mínima e incluso determinados trazos de las líneas de transporte se repetían, los costos generalizados de las primeras 30 mejores redes se encuentran en el Anexo 3. El tiempo de procesamiento ascendió a 30 días incluyendo los tiempos para acomodar la información y generar los mapas.

Las tablas 4.2 y 4.3 representa la evolución con los mejores resultados de costos generalizados desde la primera generación 1, hasta la generación 25, estas tablas se encuentran ordenadas en el Anexo 2. Si revisamos estas tablas en donde la primera, se puede considerar las 25 generaciones después de los 25 cruzamientos a partir del padre 1, los resultados se empiezan a parecerse a partir de la 19 aunque la mejor red se aprecia en la generación 24 con un costo generalizado de 2,142,277.549.

En la tabla 4.3, observamos los costos generalizados como resultados de los cruzamientos a partir del padre 2; los resultados se empiezan a parecerse a partir de la 19 aunque la mejor red se aprecia en la generación 25 con un costo generalizado de 2,129,787.654; esta red es la de menor costo generado con el algoritmo genético implementado en este trabajo. Las figuras de las redes de menor costo generalizado generadas a partir del padre 1 se encuentran en el Anexo 4 y del padre 2, en el Anexo 5. El termino Opt es para decir el óptimo, el termino G1 es para la generación 1 y p1, generado a partir del padre 1.

Tabla 4.2. Tabla de los costos generalizados de las 25 generaciones de la mejor red generada a partir del padre 1.

ITERACIONES	COSTO GENERALIZADO	COSTO CAMINATA
OPT G1P1	4187223.486	207653.520
OPT G2P1	3924392.326	315001.581
OPT G3P1	3752260.768	119961.000
OPT G4P1	3389903.323	257991.439
OPT G5P1	3487410.807	254821.099
OPT G6P1	3545904.757	271457.022
OPT G7P1	2923698.207	214919.354
OPT G8P1	2950143.791	258644.648
OPT G9P1	2799049.624	228616.448
OPT G10P1	2764307.846	235329.944
OPT G11P1	2538111.246	210489.385
OPT G12P1	2447561.653	223720.004
OPT G13P1	2538111.246	210489.385
OPT G14P1	2579288.501	222416.998
OPT G15P1	2533528.311	206070.539
OPT G16P1	2482567.514	229596.130
OPT G17P1	2410522.144	236953.984
OPT G18P1	2343711.639	216688.536
OPT G19P1	2179760.711	223690.114
OPT G20P1	2278680.920	209622.087
OPT G21P1	2191224.923	209860.942
OPT G22P1	2215639.780	228802.902
OPT G23P1	2143080.244	220830.578
OPT G24P1	2142277.549	224962.530
OPT G25P1	2150492.782	221442.542

Dirección General de Publicaciones UAQ

Tabla 4.3. Tabla de los costos generalizados de las 25 generaciones de la mejor red generada a partir del padre 2.

ITERACIONES	COSTO GENERALIZADO	COSTO CAMINATA
OPT G1P2	3736274.803	314449.646
OPT G2P2	3931659.170	261487.921
OPT G3P2	3372880.447	284160.984
OPT G4P2	3788147.322	166876.000
OPT G5P2	3519931.670	271847.433
OPT G6P2	2821443.201	230510.117
OPT G7P2	3268219.184	261455.176
OPT G8P2	2956432.016	242822.584
OPT G9P2	2893867.141	282913.195
OPT G10P2	2604680.672	229336.130
OPT G11P2	2591184.235	239123.816
OPT G12P2	2604680.672	229336.130
OPT G13P2	2598259.060	234742.171
OPT G14P2	2537153.024	227563.776
OPT G15P2	2571500.493	221878.470
OPT G16P2	2537153.024	227563.776
OPT G17P2	2327816.982	211560.634
OPT G18P2	2357246.495	255664.287
OPT G19P2	2286632.617	254826.342
OPT G20P2	2176292.112	250851.290
OPT G21P2	2205804.782	235812.385
OPT G22P2	2176510.369	251096.381
OPT G23P2	2152655.939	251852.072
OPT G24P2	2137724.435	235461.141
OPT G25P2	2129787.654	236883.416

La figura 4.8 representa la evolución de los resultados de los cruzamientos. Los costos generalizados se van estabilizando a medida que se realizan más cruzamientos; se puede observar que los resultados se empiezan a converger hacia un mismo punto.

Evolución del costo generalizado por generación

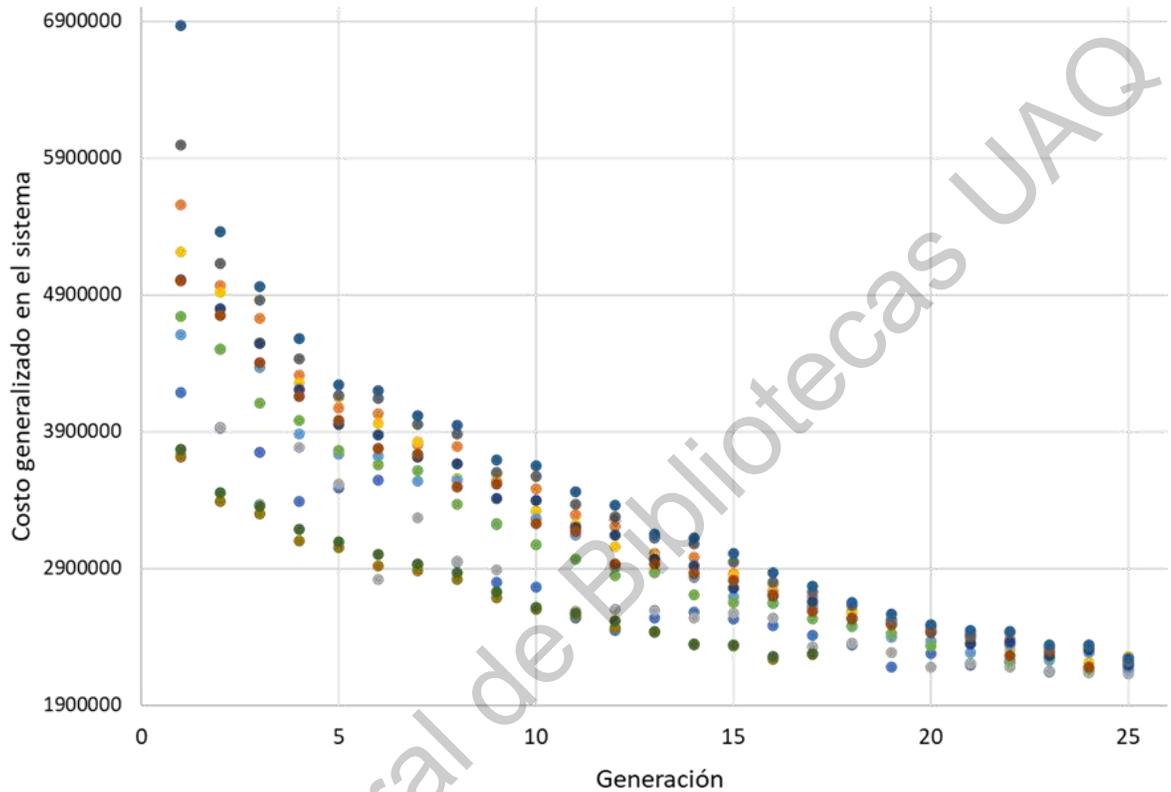


Figura 4.8. Evolución del costo generalizado por generación.

Las líneas de autobuses de transporte público generadas, que hacen parte de las redes con menor costo generalizado, a partir de los padres 1 y 2, son mostradas respectivamente en las figuras 4.9 y 4.10, la red de menor costo generalizado. Los resultados de las líneas de transporte de Ceder y Wilson fueron mejor que la de Baaj y Mahmassani pero estos dos algoritmos presentaron redes que ofrecieron casi la misma cobertura.

El algoritmo sugerido tuvo resultado más razonable en comparación con otros modelos para el siguiente parámetro: costo generalizado; Los resultados conseguidos en la primera etapa de creación de líneas, los cuales son mostrados en la tabla 4.4. El menor costo generalizado fue alcanzado con la metodología propuesta.

Los algoritmos genéticos ofrecieron mejores resultados. La distancia de recorrido está relacionada con el tiempo de viaje y la velocidad promedio con la que transitan los autobuses. Al igual, resaltamos la importancia del tiempo de recorrido en el costo generalizado, tomando como referencia la ecuación 3.1 de la función objetivo utilizada.

Tabla 4.4. Tabla de resumen.

	Costo generalizado	% de reducción
Opt g24p1	2,142,277.55	60.97%
Opt g25p2	2,129,787.65	61.20%
Opt g1p2	3736274.803	31.93%
Opt g1p1	4187223.486	23.71%
Red IQT Actual	5,488,511.11	

Dirección General de Bibliotecas UAG

Capítulo 5. Conclusiones

La incertidumbre que existe al momento de planear y proyectar el sistema de transporte de la zona metropolitana de Querétaro se ve como un dilema muy complicado que tiene solución si se le considera desde el punto de vista de problemas de varias disciplinas.

La generalidad de cualquier metodología de solución para este conflicto siempre está en duda. Concretamente, los autores Baaj y Mahmassani aportaron un algoritmo que trata de encontrar todas las soluciones posibles mencionando cual es la óptima. Este algoritmo crea caminos más cortos entre dos puntos de alta solicitud de viajes; aumenta la posibilidad de la unión y la fragmentación de los caminos, pero no considera todos los parámetros del sistema. El algoritmo de Ceder y Wilson genera una cobertura establecida, mejora la búsqueda local con la prevención del ciclo. La creación de los primeros elementos no está sujeta al tipo de operación, ni de la cantidad de caminos, ni de las veces que se aplica el algoritmo para crear rutas. Los resultados obtenidos muestran que los dos algoritmos alcanzan resultados diferentes.

En este proyecto, se trata de encontrar un grupo de soluciones con el uso de los algoritmos genéticos. Se logra abordar el problema desde cero; con solo la matriz Origen-Destino y la estructura de la red, diseña sus rutas y luego selecciona la configuración final de la red. El arreglo obtenido con el método propuesto da mejores resultados en lo que respecta a la duración total y promedio, y la distancia total y promedio de recorrido; que los elementos del sistema que existe en la zona. Esta afirmación ayuda en la comprobación de lo mencionado en el objetivo de este estudio, el uso del instrumento digital de algoritmos genéticos para la planificación y la mejora del sistema con la finalidad de reducir el recorrido y de aumentar la accesibilidad y la funcionalidad del sistema. Para el usuario, la optimización, que se logra en esta investigación, basándose en la función de condición física de la ruta, significa una disminución en la distancia de recorrido, el

tiempo de recorrido, el tiempo de espera, el tiempo dentro de los autobuses, el costo del viaje, entre otros.

Los grupos de elementos considerados como padres para este estudio son creados a partir de la utilización de las heurísticas de Baaj y Mahmassani y Ceder y Wilson, y después, se hace uso del cruzamiento. Se sugiere en futuros trabajos científicos utilizar el sistema de la zona en estudio como un grupo de padres las rutas con el propósito de analizar los resultados producidos con las diversas combinaciones.

Dirección General de Bibliotecas UNQ

Referencias bibliográficas

- Achterberg, T., 2009. SCIP: Solving Constraint Integer Programs. *Mathematical Programming Computation*, 1 (1), 1–41.
- Ahmed, L., Mumford, C., Kheiri, A. (2018). Solving urban transit route design problem using selection hyper-heuristics. *European Journal of Operational Research*, 274 (2), 545-559.
- Allen, J., Muñoz, J. C., Ortúzar J. D. (2018). Modelling service-specific and global transit satisfaction under travel and user heterogeneity. *Transportation Research Part A*, 113, 509–528.
- An, K., Lo, H. K. (2016). Two-phases to chaotic program for transit network design under demand uncertainty. *Transportation Research Part B*, 84, 157-181.
- Arbex, R. O., da Cunha, C. B. (2015). Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B*, 81, 355-376.
- Baaj, M. H., Mahmassani, H. S. (1991). An AI-based approach for transit route system planning and design. *Journal of Advanced Transportation*, 25, 187–209.
- Baaj, M. H., Mahmassani (1995). Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3, 31–50.
- Barreno, M., Nelson, B., Joseph, A. D., Tygar, J. D. (2010). The security of machine learning. *Machine Learning*, 81(2), 121-148.
- Bayliss, D., Fox, H., 2000. Competition in urban public transport. *Urban Transport Strategy Review* 4, 26–39.

- Berrebi, S. J., Watkins, K. E., Laval, J. A. (2015). A real-time bus dispatching policy to minimize passenger wait on a high frequency route. *Transportation Research Part B*, 81(2), 377-389.
- Bie, J., Lo, H.K., 2010. Stability and attraction domains of traffic equilibria in a day-to-day dynamical system formulation. *Transportation Research Part B*, 44 (1), 90–107.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., (1999). *Swarm intelligence from natural to artificial systems*. Ed. New York: Oxford University Press.
- Boyles, S. D., Tang, S., Unnikrishnan, A. (2015). Parking search equilibrium on a network. *Transportation Research Part B*, 81(2), 390-409.
- Buba, A. T., Lee, L. S. (2018). A differential evolution for simultaneous transit network design and frequency setting problems. *Expert Systems with Applications*, 106, 277-289.
- Buehler, R., Pucker, J. (2012). Demand for public transport in Germany and the USA: an analysis of rider characteristics. *Transport Reviews*, 32 (5), 541–567.
- Bhushan, S., Jha, J. K., Kumar, M. (2019). A multi-objective meta-heuristic approach for transit network design and frequency setting problem in a bus transit system. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 166-186.
- Bonsall, P., Kelly, C. (2005). Road user charging and social exclusion: The impact of congestion charges on at risk groups. *Transport Policy*, 12(5), 406–418.
- Cameron, I., Lyonsa, J., Kenworthy, R. (2004). Trends in vehicle kilometers of travel in world cities 1960-1990 underlying drivers and policy responses. *Transport Policy*, 11, 287-298.
- Chan, N. D. and S. A. Shaheen (2012). Ridesharing in North America: Past, present, and future. *Transport Reviews*, 32 (1), 93–112.
- Chen, W., Lin, C., (2000). A hybrid heuristic to solve a task allocation problem. *Computers & Operations Research*, 27 (3), 287–303.

- Cherchi, E., Cinzia, C., Ortúzar, J. D. (2017). Modelling correlation patterns in mode choice models estimated on multiday travel data. *Transportation Research Part A*, 96, 146–153.
- Chu, J. C. (2018). Mixed-integer programming model and branch-and-price-and-cut algorithm for urban bus network design and timetabling. *Transportation Research Part B*, 108, 188-216.
- Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M. (2012). Transit network design: A procedure and an application to a large urban structure. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1), 3-14.
- Cordera, R., Canales, C., dell’Olio, L., Ibeas, A. (2015). Public transport demand elasticities during the recessionary phases of economic cycles. *Transportation Policy*, 42, 173–179.
- Dell’Olio, L., Ibeas, A., Cecín, P. (2010). Modeling user perception of bus transit quality. *Transportation Policy*, 17, 388–397.
- Delgado M. L., Sánchez M. A., Gómez A., (2014). Financiación del servicio público de transporte urbano: un estudio empírico en las empresas españolas. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 20 (3), 151-162.
- De Pablos, C., Perez, L. J., Montes, J. L. (2012). Impacto de los sistemas de apoyo a la explotación (SAE) en la mejora de los servicios de transporte público urbano. *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa*, 15, 12–24.
- Desaulniers, G., Hickman, M. D. (2007). Chapter 2 public transit. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 14, 69–127.
- Di Natale, M., Stankovic, J. A., 1995. Applicability of simulated annealing methods to real-time scheduling and jitter control. *In: Proceedings of the 16th IEEE Real-Time Systems Symposium*. 190–199.

- Djavadian, S., Chow, J. Y. J. (2017). An agent-based day-to-day adjustment process for modeling Mobility as a Service with a two-sided flexible transport market. *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 36-57.
- Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, 229, 281–302.
- Fan, w., Mei, Y., Gu, W. (2018). Optimal design of intersecting bimodal transit networks in a grid city. *Transportation Research Part B.*, 111, 203-226.
- Fieldbaum, A., Jara, D., Gschwender, A. (2016). Optimal public transport networks for a general urban structure. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 298-313.
- Furuhata, M., M. Dessouky, F. Ordoñez, M.-E. Brunet, X. Wang, and S. Koenig (2013). Ridesharing: The state-of-the-art and future directions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 57, 28–46.
- Glover F., (1986): Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, 13, 533-549.
- Gómez, E. L., Guerrero, H. A. (2013). Los Algoritmos Genéticos en el Modelo de Cournot. *Economía Informa*, 378, 37-50.
- Goss, S., Aron, S., Deneubourg, J. L., y Pasteels, J. M., (1989): Self-organized shortcuts in the argentine ant. *Naturwissenschaften*, 76, 579-581
- Gurevich, Y., (1999). The sequential ASM thesis. *Bulletin of European Association for Theoretical Computer Science*, 67, 93-124.
- Gutierrez, J. J., Harbour, M. G. 1995. Optimized priority assignment for tasks and messages in distributed hard real-time systems. In: *Proceedings of the 3rd Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems*. 124–132.
- Hamann, A., Jersak, M., Richter, K., Ernst, R. (2006). A framework for modular analysis and exploration of heterogeneous embedded systems. *Real-Time Systems*, 33 (1), 101–137.

- Hansen, P., (1986): The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming. In: *the Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization*, Capri, Italy.
- Ibarra, O.J., Delgado, F., Giesen, R., Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation and control of bus transport systems: A literatura review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38-75.
- Jha, S. B., Jha, J. K., Tiwari, M. K. (2019). A multi-objective meta-heuristic approach for transit network design and frequency setting problem in a bus transit system. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 166-186.
- Kelly, K. L. (2007). Casual carpooling-enhanced. *Journal of Public Transportation*, 10 (4), 6.
- Kennedy, J., Eberhart, R. C., Shi, Y., (2001). *Swarm intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Kiliç, F., Gök, M. (2013). A Public Transit Network Route Generation Algorithm. *Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications*, 1, 162-166.
- Li, L., Baib, Y., Song, Z., Chen, A., Wu, B. (2018). Public transportation competitiveness analysis based on current passenger loyalty. *Transportation Research Part A*, 113, 213–226.
- López, F., Codina, E., Marín, A., Guarnaschelli, A. Integrated approach to network design and frequency setting problem in railway rapid transit systems. *Computers and Operations Research*, 80, 128–146.
- Luyando, J. R., Tapia, G. J., Pérez, C. V. (2014). Transporte de pasajeros en el Área Metropolitana de Monterrey. *Economía Informa*, 387, 76-87.
- Metzner, A., Herde, C., 2006. RTSAT - An optimal and efficient approach to the task allocation problem in distributed architectures. In: Proceedings of the 27th IEEE Real-Time Systems Symposium. 147–158.
- Morency, C. (2007). The ambivalence of ridesharing. *Transportation*, 34 (2), 239–253.

- Moreno, J. M. y Moreno, J. A., (1999). *Heurísticas en Optimización*. Ed. Consejería de Educación, Cultura y Deportes. Gobierno de Canarias.
- Muñoz, J. P., Simón, C., García, A. E. (2014). Disponibilidad y accesibilidad en el transporte público madrileño como garantía de equidad social ante la aplicación de un peaje urbano para la ciudad de Madrid. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa* 20, 47-54.
- Murata, M., Campos, J. D., Lastra, M. S. (2017). ¿Por qué la gente no usa el Metro? Efectos del transporte en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, 93, 158-176.
- Nayeem, M. A., Rahman, M. K., Rahman S. (2014). Transit network design by genetic algorithm with elitism. *Transportation Research Part C*, 46, 30-45.
- Nesmachnow, S., Massobrio, R., Arreche, E., Mumford, C., Olivera, A. C., Vidal, P. J., Tchernykh, A. (2019). Traffic lights synchronization for Bus Rapid Transit using a parallel evolutionary algorithm. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8, 53–67.
- Obregón, S. A., Betanzo E. (2015). Análisis de la movilidad urbana de una ciudad media mexicana, caso de estudio: Santiago de Querétaro. *Economía, Sociedad y Territorio*, 15(47), 61-98.
- Owais, M., Osman, M. K. (2018). Complete hierarchical multi-objective genetic algorithm for transit network design problem. *Expert Systems With Applications*, 114, 143-154.
- Porto, S., Ribeiro, C., 1995. A tabu search approach to task scheduling on heterogeneous processors under precedence constraints. *International Journal of High Speed Computing*, 7 (1), 45–71.
- Prieto, J. D. (2015) Optimización de las Líneas de Transporte Público en la Zona Metropolitana de Querétaro. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, 537 páginas.
- Ríos Insua, S., (1996): *Investigación operativa. Programación lineal y aplicaciones*. Ed. Centro de Estudios Ramón Areces.

- Rodriguez, F. A., Monedero, B. D., Ureba, S. F. (2014). Situación actual del transporte público urbano: la visión de las empresas operadoras. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 20, 16-22.
- Román, C., Martín, J.C., Espino, R. (2014). Using stated preferences to analyze the service quality of public transport. *International Journal Sustainable Transportation*, 8 (1), 28–46.
- Rasulkhani, S., Chow, Y. J., (2019). Route-cost-assignment with joint user and operator behavior as a many-to-one stable matching assignment game. *Transportation Research Part B*, 124, 60-81.
- Sarzynski, A., Wolman, H., Galster, G., Hanson, R. (2006). Testing the Conventional Wisdom about Land Use and Traffic Congestion: The More We Sprawl, the Less We Move? *Urban Studies*, 43, 601-626.
- Schoonderwoerd, R., (1996). Ant-based load balancing in telecommunications networks. *Adaptive Behavior*, 2, 169-207.
- Shang, L., Dick, R., Jha, N., 2007. SLOPES: Hardware-software cosynthesis of low-power real-time distributed embedded systems with dynamically reconfigurable FPGAs. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 26 (3), 508–526.
- Shih, M.-C., & Mahmassani, H. S. (1994). A design methodology for bus transit networks with coordinated operations.
- Ubbels, M., Verhoef, E. T. (2004). Barriers to transport pricing. In P. Rietveld, & R. Stough (Eds.), *Barriers to sustainable transport* (pp. 69–93). London: Spon Press
- Woxenius, J. (2007). Generic Framework for transport Network Designs: Applications and Treatment in Intermodal Freight Transport Literature. *Transport A transnational Transdisciplinary Journal*, 27(6), 733-749.
- Ying, J.Q., Yang, H., 2005. Sensitivity analysis of stochastic user equilibrium flows in a bi-modal network with application to optimal pricing. *Transportation Research Part B*, 39 (9), 769–795

- Yang, H., Leung, C.W., Wong, S.C., Bell, M.G., 2010. Equilibria of bilateral taxi–customer searching and meeting on networks. *Transportation Research Part B*, 44 (8), 1067–1083.
- Zhao, F. (2006). Large-scale transit network optimization by minimizing transfers and user cost. *Journal of Public Transportation*, 9, 107–129.
- Zhao, H., Xu, W. A., Jiang, R. (2014). The Memetic algorithm for the optimization of urban transit network. *Expert Systems with Applications*, 42(7), 3760-3773.
- Zha, L. , Yin, Y. , Yang, H. , 2016. Economic analysis of ride-sourcing markets. *Transportation Research Part C*, 71, 249-266.
- Zhou, J., Lam, W.H., Heydecker, B.G., 2005. The generalized Nash equilibrium model for oligopolistic transit market with elastic demand. *Transportation Research Part B*, 39 (6), 519-544.
- Zhu, Q., Yang, Y., Scholte, E., Di Natale, M., Sangiovanni-Vincentelli, A., (2009). Optimizing extensibility in hard real-time distributed systems. In: Proceedings of the 15th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. 275–284.

Anexos

Anexo 1. Tiempos de marcha para las líneas de la zona metropolitana.

Numero de ruta	Origen	Destino	Vehículos asignados	Longitud (Km)	Tiempo de recorrido (min)
5	HERCULES	FRACC. SANTUARIOS	10	33.592	167
7	BOULEVARES DEL CIMATARIO	FRACC. VISTANA	25	35.967	146
9	CHEDRAHUI	FRACC. VISTANA	21	37.754	118
10	BOULEVARES DEL CIMATARIO	FRACC. LOS JUNCOS	14	55.989	174
12	CHEDRAHUI	AZUCENAS	21	46.289	184
13	MENCHACA II	I.M.S.S.	4	21.312	75
14	SAN PABLO	EL PÓRTICO	16	32.475	131
17	SAN JOSÉ EL ALTO	SOCAVÓN	21	46.375	159
19	TERMINAL DE AUTOBUSES	COL. FRAY JUNIPERO SERRA	12	39.817	147
20	LOS OLVERA	P.G.J.	16	40.142	145
21	BOSQUES DEL	LA LOMA	21	46.631	186

CIMATARIO					
24	LA PRADERA	BOULEVARES DEL CIMATARIO	18	44.468	148
27	PASEOS DE SAN MIGUEL	FRACC. VISTANA	22	52.097	256
28	BOULEVARES DEL CIMATARIO	JARDINES DE SAN JOSÉ	19	45.879	149
29	COL. TENOCHTILÁN	MERCADO LA CRUZ	14	32.534	124

Numero de ruta	Origen	Destino	Vehículos asignados	Longitud (Km)	Tiempo de recorrido (min)
31	PASEOS DE SAN MIGUEL	PLAZA DE LAS AMÉRICAS	17	42.913	140
33	BOLAÑOS II	ALAMEDA	3	17.636	79
36	DESARROLLO FAMILIAR	TERMINAL DE AUTOBUSES	21	38.889	145
37	LOS OLVERA	LA CAÑADA	22	40.046	156
38	SANTA MARÍA MAGDALENA	RANCHO SAN ANTONIO	12	31.605	124
40	COL. CHE GUEVARA	CENTRO CIVICO	22	46.479	182
41	VISTA AZUL	PASEOS DEL PEDREGAL	23	38.164	145
43	COL. SERGIO VILLASEÑOR	COL. CANDILES	17	45.472	156
44	TERMINAL DE AUTOBUSES	PASEOS DEL PEDREGAL	10	34.775	126
45	LA LOMA	TERMINAL DE AUTOBUSES	17	40.974	135
50 "A"	COL. 10 DE ABRIL	MERCADO LA CRUZ	23	49.948	167
51 "B"	BOULEVARES DEL CIMATARIO	RANCHO SAN PEDRO	24	54.547	162

53 "D"	LA PRADERA	SAN JOSÉ DE LOS OLVERA	18	51.843	158
54 "E"	BOULEVARES DEL CIMATARIO	EL TINTERO	18	32.207	120
55 "F"	SOCAVÓN	RANCHO BUENAVISTA	18	37.086	145
56 "I"	COL. PRADERAS DEL SOL	SANTA MARÍA MAGDALENA	12	30.64	115
58 "K"	BOULEVARES DEL CIMATARIO	LAS TERESAS	16	28.748	135
59 "L"	COL. PRADERAS DEL SOL	FRACC. VISTANA	24	46.263	159
61 "N"	BOLAÑOS	LA LOMA	11	35.448	143
62	LOS OLVERA	U.T.E.Q.	17	40.859	144

Numero de ruta	Origen	Destino	Vehículos asignados	Longitud (Km)	Tiempo de recorrido (min)
65	LOMAS DE LA CRUZ	TERMINAL DE AUTOBUSES	16	45.325	167
66	JURIQUILLA (KM. 15)	ALAMEDA	9	47.177	136
67	EL NABO	ALAMEDA	10	39.008	112
69	COL. SAN PEDRO	SANTA BARBARA	17	36.64	102
70	LAS TERESAS	LOMAS DEL MARQUES	9	27.725	65
72 "H"	COL. 10 DE ABRIL	TERMINAL DE AUTOBUSES	20	49.093	146
75	LOURDES	PLAZA DE LAS AMÉRICAS	10	35.269	121
76	LAS FLORES	SAN JOSÉ EL ALTO	18	53.082	178
77	COL. 20 DE ENERO	PLAZA DE LAS AMÉRICAS	15	41.62	141
78	EL POZO	MERCADO ESCOBEDO	3	30.542	83
79	CENTRAL PARK	LOS ANGELES	5	44.769	129
80	LAS AMÉRICAS	LAZARO CARDENAS	12	31.801	118

81	CIUDAD DEL SOL	LAZARO CARDENAS	21	57.65	164
83	COL. SERGIO VILLASEÑOR	RANCHO BELLAVISTA	11	34.558	119
84	PASEOS DE SAN MIGUEL	SAN PEDRITO PEÑUELAS	18	39.591	140
85	TERMINAL DE AUTOBUSES	EL PUEBLITO (CAM)	12	38.36	136
87	LOS OLVERA	TERMINAL DE AUTOBUSES	13	31.986	128
88	TERMINAL DE AUTOBUSES	SAN PEDRITO PEÑUELAS	14	29.598	78
92 "S"	BOULEVARES DEL CIMATARIO	FRACC. VISTANA	19	40.824	150
94	FRACC. PIRAMIDES	PLAZA DE LAS AMÉRICAS	4	29.242	65

Numero de ruta	Origen	Destino	Vehículos asignados	Longitud (Km)	Tiempo de recorrido (min)
98	BOULEVARES DEL CIMATARIO	CERRITO COLORADO	33	44.763	144
105	EL SALITRE	ALAMEDA	8	36.836	87
110 "X"	CIUDAD DEL SOL	MERCADO LA CRUZ	27	43.174	116
121	TERMINAL DE AUTOBUSES	PARQUE BICENTENARIO	21	55.919	163
122	EJIDO MODELO	UNIVERSIDAD POLITECNICA	14	58.997	145
123	EJIDO MODELO	EL COLORADO	12	50.921	134
125	TERMINAL DE AUTOBUSES	SANTA BARBARA	8	38.62	97
130	CIRC.ESCOLAR AV. DE LA LUZ	VISTANA	12	35.85	108
131	CIRC.ESCOLAR AV. DE LA LUZ	VISTANA	12	33.847	101
132	AV. DE LA LUZ	ALAMEDA	20	40.056	120
133	LA PRADERA	PLAZA SENDERO	15	44.923	135
134	LOMA BONITA	PLAZA DE LAS AMÉRICAS	12	34.518	118

135	EMETERIO GONZALEZ	I.M.S.S.	6	15.913	50
136	PUERTAS DE SAN MIGUEL	TERMINAL DE AUTOBUSES	14	41.975	130
137	MENCHACA II	ALAMEDA	10	26.421	90
L-4	FRACC. SANTUARIOS	PENAL	20	55.301	148
L-7	TERMINAL DE AUTOBUSES	EDUARDO LOARCA CASTILLO	20	45.9	151
L-8	TERMINAL DE AUTOBUSES	CERRITO COLORADO	9	42.673	131
74			TOTAL, DE VEHÍCULOS		1146

Anexo 2. costos generalizados de las 25 generaciones.

Tabla ordenada de los costos generalizados de las 25 generaciones para el padre 1.

ITERACIONES	COSTO GENERALIZADO	COSTO CAMINATA
OPT G24P1	2142277.549	224962.530
OPT G23P1	2143080.244	220830.578
OPT G25P1	2150492.782	221442.542
OPT G19P1	2179760.711	223690.114
OPT G21P1	2191224.923	209860.942
OPT G22P1	2215639.780	228802.902
OPT G20P1	2278680.920	209622.087
OPT G18P1	2343711.639	216688.536
OPT G17P1	2410522.144	236953.984
OPT G12P1	2447561.653	223720.004
OPT G16P1	2482567.514	229596.130
OPT G15P1	2533528.311	206070.539
OPT G11P1	2538111.246	210489.385

OPT G13P1	2538111.246	210489.385
OPT G14P1	2579288.501	222416.998
OPT G10P1	2764307.846	235329.944
OPT G9P1	2799049.624	228616.448
OPT G7P1	2923698.207	214919.354
OPT G8P1	2950143.791	258644.648
OPT G4P1	3389903.323	257991.439
OPT G5P1	3487410.807	254821.099
OPT G6P1	3545904.757	271457.022
OPT G3P1	3752260.768	119961.000
OPT G2P1	3924392.326	315001.581
OPT G1P1	4187223.486	207653.520

Tabla ordenada de los costos generalizados de las 25 generaciones para el padre 2.

ITERACIONES	COSTO GENERALIZADO	COSTO CAMINATA
OPT G25P2	2129787.654	236883.416
OPT G24P2	2137724.435	235461.141
OPT G23P2	2152655.939	251852.072
OPT G20P2	2176292.112	250851.290
OPT G22P2	2176510.369	251096.381
OPT G21P2	2205804.782	235812.385
OPT G19P2	2286632.617	254826.342
OPT G17P2	2327816.982	211560.634
OPT G18P2	2357246.495	255664.287
OPT G14P2	2537153.024	227563.776
OPT G16P2	2537153.024	227563.776

OPT G15P2	2571500.493	221878.470
OPT G11P2	2591184.235	239123.816
OPT G13P2	2598259.060	234742.171
OPT G10P2	2604680.672	229336.130
OPT G12P2	2604680.672	229336.130
OPT G6P2	2821443.201	230510.117
OPT G9P2	2893867.141	282913.195
OPT G8P2	2956432.016	242822.584
OPT G7P2	3268219.184	261455.176
OPT G3P2	3372880.447	284160.984
OPT G5P2	3519931.670	271847.433
OPT G1P2	3736274.803	314449.646

Anexo 3. Cotos generalizados de las primeras 30 mejores redes para cada generación

g1p1	g2p1	g3p1	g4p1	g5p1	g6p1	g7p1	g8p1
4187223.49	3924392.33	3752260.77	3389903.32	3487410.81	3545904.76	2923698.21	2950143.79
4291029.87	4020783.85	3901937.08	3458865.89	3500809.12	3593771.54	3109823.84	3159603.78
4389679.14	4069380.47	3921187.57	3676334.15	3517372.79	3618790.27	3241666.18	3214112.17
4472653.21	4121175.79	3991757.07	3694770.73	3599977.54	3636460.05	3266440.51	3389903.32
4478490.39	4154042.15	4193726.82	3727806.16	3602266.36	3667865.72	3440699.23	3441542.6
4552019.45	4194122.56	4241266.46	3827582.62	3658406.28	3677427.5	3473558.17	3447200.71
4553389.54	4323562.23	4277445.27	3838995.87	3685738.2	3709181.12	3486198.06	3509731.23
4586909.06	4454968.87	4339113.65	3855192.14	3724456.69	3711053.81	3508000.32	3513736.12
4610205.66	4499556.25	4372439.31	3884816.99	3734226.21	3720789.13	3538435.59	3545904.76
4622715.1	4504745.33	4374628.3	3892214.13	3781251.58	3737280.62	3608971.96	3571866.81
4678932.71	4545904.77	4411489.22	3892910.1	3818234.51	3756967.05	3627861.05	3578782.61
4710645.28	4622129.24	4470728.09	3922197.22	3862449.99	3792368.01	3638729.37	3581536.13
4746637.55	4635458.45	4489180.34	3942964.62	3879909.52	3808515.15	3639181.03	3598340.79
4756979.26	4672102.77	4509302.97	4009498.03	3887940.11	3813453.45	3642589.09	3636460.05
4824914.41	4730288.16	4527264.06	4027890.76	3915054.28	3817911.72	3686412.62	3636743.75
4889238.73	4769304.64	4538034.56	4030370.46	3931190.9	3825054.6	3690239.9	3638041.79

4905168.7	4780417.15	4540161.08	4108681.96	3932157.22	3828359.24	3693385.34	3641444.08
4975918.18	4788635.6	4548098.62	4126479.9	3954702.39	3852398.04	3705364.86	3649678.57
5006621.64	4795179.75	4548098.62	4207474.75	3957089.91	3874103.79	3711111.9	3661784.97
5026879.34	4817216.05	4560363.37	4213846.99	3985559.59	3876891.54	3728165.93	3676846.95
5030690.06	4830577.24	4605470.67	4215056.36	3987138.71	3911907.09	3728593.22	3693972.5
5092669.37	4854311.57	4622715.1	4227387.97	3991117.24	3936065.31	3742298.21	3694770.73
5115276.59	4857192.26	4638701.44	4229341.48	4014489.74	3949750.87	3754452.61	3738456.48
5191564.42	4862093.3	4642608.39	4271102.03	4017870.59	3965918.06	3760525.01	3744360.26
5279521.9	4871256.27	4643125.4	4274315.18	4041944.34	3975245.9	3764831.03	3749107.75
5413833.53	4879574.6	4646557.15	4287954.1	4045269.85	4001179.23	3779134.24	3754009.15
5440892.17	4933447.9	4673520.54	4306969.67	4061842.01	4025298.21	3800035.78	3785747.57
5558532.83	4968523.64	4729178	4309853.22	4072443.47	4031770.92	3806284.78	3789924.09
5576997.47	4972036.35	4731048.42	4318522.77	4096127.13	4040217.09	3807350.28	3793970.3
5577332.77	5011368.79	4754877.52	4319827.81	4117634.25	4044404.07	3817121.51	3803417.41

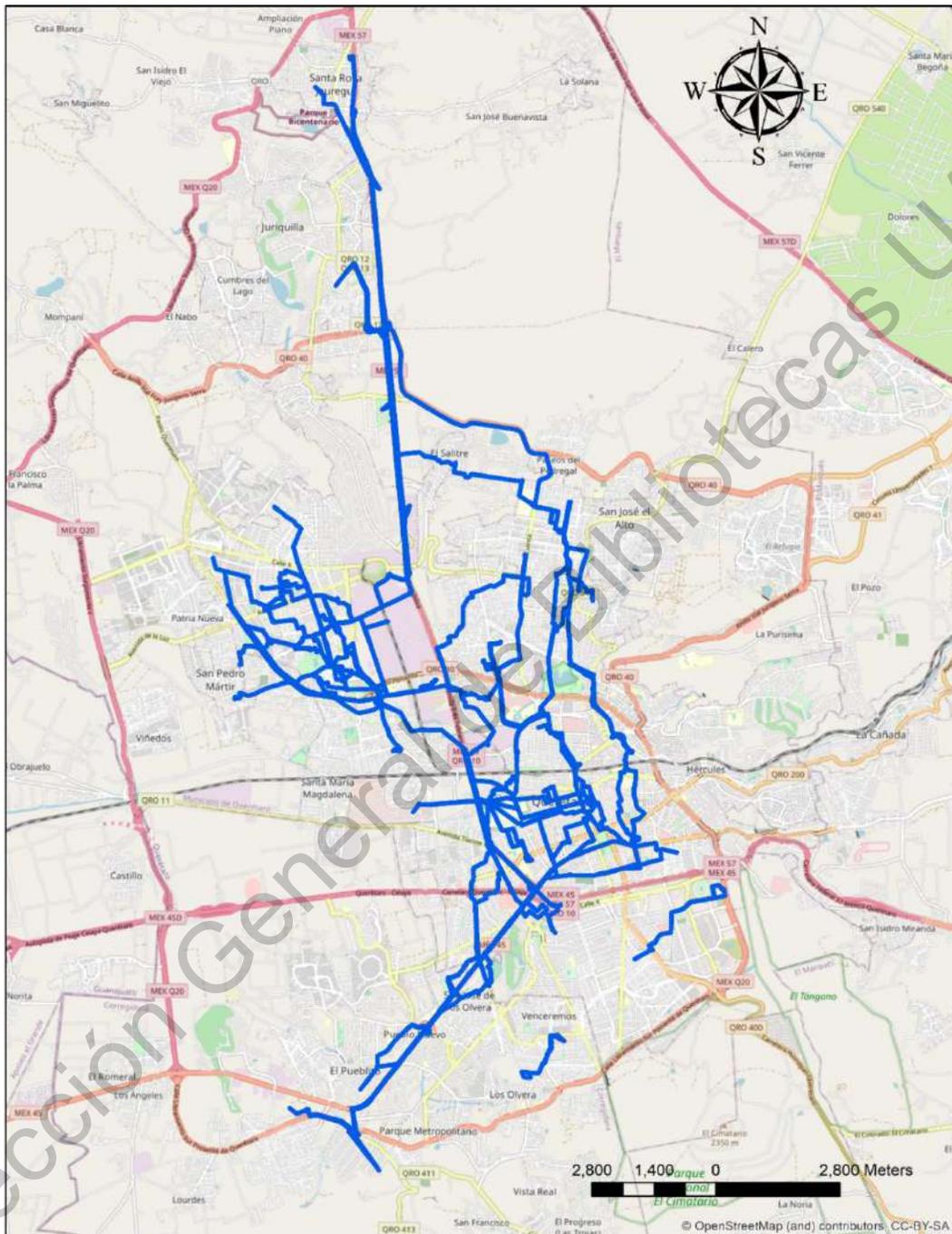
g9p1	g10p1	g11p1	g12p1	g13p1	g14p1	g15p1	g16p1
2799049.62	2764307.85	2538111.25	2447561.65	2538111.25	2579288.5	2533528.31	2482567.51
2845517.36	3089862.7	2777371.64	2476119.78	2540812.97	2671729.87	2592605.1	2488811.8
2845517.36	3099898.87	2932942.62	2504818	2573355.99	2700287.1	2601497.74	2519613.78
2896796	3143621.17	2948954.88	2764514.73	2603329.44	2742080.62	2601937.67	2544768.07
2993155.56	3180735.55	2993155.56	2809975.15	2620005.2	2794042.46	2619085.7	2604643
3066361.78	3240946.91	3048748.08	2875396.81	2756829.51	2817597.57	2639293.76	2604730.86
3088681.78	3243798.95	3049333.45	2890408.42	2782115.04	2818805.1	2658753.67	2629354.71
3179974.13	3246979.38	3126335.16	2904713.42	2850057.27	2831539.6	2689206.6	2637749.3
3220933.69	3260761.93	3142977.3	2914924.73	2873397.27	2832694.99	2691596.94	2641941.42
3229996.49	3263487.11	3146159.32	2938276.9	2888923.66	2844286.63	2699167.2	2658573.17
3262058.69	3281945.14	3149031.05	2940591.66	2892196.68	2862830.83	2704500.25	2662730.52
3293872.55	3297725.19	3151311.84	2951846.62	2892980.63	2869799.85	2706499.71	2674824.84
3311572.83	3344636.93	3168034.22	2951846.62	2908670.59	2882851.14	2707559.16	2679413.88
3320759.13	3348203.05	3174785.68	3092471.03	2912024.81	2888481.93	2725107.65	2684012.04
3321756.76	3360803.68	3179974.13	3101400.74	2916184.62	2888538.43	2726983.7	2686622.56
3335236.03	3387468.93	3179974.13	3110820.9	2924339.02	2890408.42	2726983.7	2688298.15

3370428.32	3387468.93	3186979.39	3116139.71	2930407.2	2895216.87	2743727.4	2693179.19
3404009.2	3393482.11	3191874.43	3138897.28	2956411.92	2902877.09	2746329.26	2694459.31
3411810.8	3396257.97	3198799.05	3140818.99	2964688.02	2918586.73	2756829.51	2699421.77
3434169.1	3418283.33	3224485.14	3145182	2983653.27	2930429.92	2770109.78	2700287.1
3448973.63	3442518.06	3229996.49	3148930.09	2983653.27	2943545.06	2774081.51	2704351.36
3472064	3451598.14	3229996.49	3159618.08	2983653.27	2943720.36	2774087.13	2711569.66
3487410.81	3462672.89	3237940.05	3174669.59	2985355.77	2951846.62	2784358.31	2716308.45
3488074.02	3463109.36	3243485.52	3176120.32	2991945.69	2951846.62	2812040.24	2717198.86
3496472.22	3465532.04	3247407.1	3178213.59	2996936.44	2951846.62	2812934.09	2720694.22
3497719.07	3480241.61	3262594.24	3188876.74	3005155.47	2953477.52	2820247.01	2720710.93
3529973.96	3481856.21	3268231.26	3195775.47	3005155.47	2968913.59	2842292.45	2725300.82
3535489.86	3484396.66	3292686.83	3206023.45	3009567.46	2982923.61	2859172.58	2732558.45
3538848.49	3501860.57	3303473.61	3218260.59	3013317.97	2984255	2867014.28	2732558.45
3541088.99	3507864	3304957.56	3220848.37	3051331.78	2984355.28	2868917.5	2741612.94

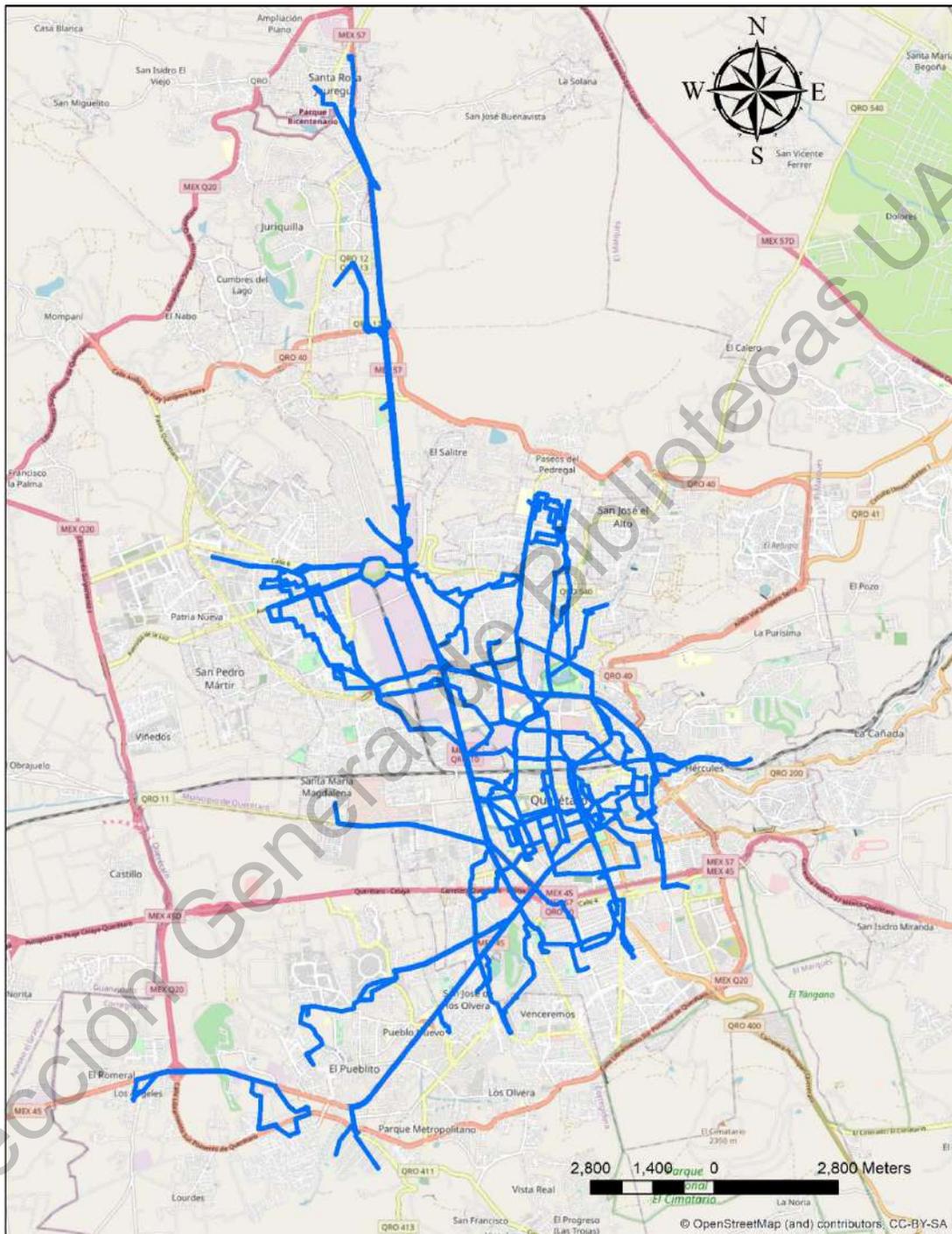
g17p1	g18p1	g19p1	g20p1	g21p1	g22p1	g23p1	g24p1	g25p1
2410522.14	2343711.64	2179760.71	2278680.92	2191224.92	2215639.78	2143080.24	2142277.55	2150492.78
2483105.66	2345095.89	2179760.71	2323570.83	2217571.46	2295899.09	2150492.78	2235492.92	2150492.78
2488094.24	2348817.88	2263850.32	2334008.87	2242152.08	2296839.4	2152998.19	2248729.39	2150492.78
2497190.17	2368769.27	2263850.32	2343711.64	2245205.11	2311969.63	2175258.94	2248955.16	2152998.19
2533528.31	2462714.08	2334075.42	2345095.89	2256139.43	2330297.04	2183682.83	2248955.16	2156023.39
2584092.57	2475803.87	2360851.1	2356072.26	2260393.4	2333805.5	2206890.62	2250963.91	2164300.23
2601231.22	2475803.87	2368506.78	2368769.27	2263850.32	2333805.5	2208093.93	2265258.27	2164566.57
2615380.24	2476119.78	2378307.6	2369875.67	2263850.32	2340114.95	2214664.47	2279108.28	2168199.46
2620005.2	2479624.54	2395152.09	2370773.43	2287520.27	2340114.95	2231485.67	2282109	2171894.13
2629150.11	2479624.54	2410522.14	2371212.33	2287520.27	2342349.82	2232498.82	2282109	2171971.25
2637623.25	2482163.98	2427869.44	2371212.33	2298202.29	2343711.64	2234851.93	2282121.36	2175258.94
2646126.32	2482567.51	2455955.95	2378033.18	2314064.71	2345095.89	2240649.87	2286290.74	2182050.14
2647374.6	2488214.54	2490405.85	2382050.75	2322342.84	2347350.74	2242152.08	2291027.06	2183682.83
2648843.85	2501207.33	2490447.6	2382067.23	2330549.31	2347666.75	2242152.08	2291474.76	2183682.83
2649337.66	2501207.33	2492316.28	2403301.49	2333839.5	2353266.27	2245205.11	2294253.08	2184359.31
2653067.27	2515370.14	2492881.17	2406946.84	2333839.5	2356614.31	2253074.66	2299302.58	2187879.59
2656684.18	2519138.83	2493485.46	2429726.4	2334955.19	2363864.63	2260393.4	2305911.43	2191710.48
2660726.16	2520360.15	2493842.23	2429726.4	2345310.92	2364063.66	2260393.4	2306175.48	2191710.48
2661517.25	2529872.3	2493842.23	2434553.23	2345771.58	2364063.66	2263570.4	2307123.15	2192185.49
2663224.73	2531155.89	2493842.23	2435184.87	2346770.21	2364791.08	2263850.32	2311603.92	2196820.88
2664288.93	2538573.49	2494490.01	2435184.87	2347081.47	2365890.61	2263850.32	2313319.78	2198114.55

2671201.06	2558132.87	2497190.17	2435426.4	2349129.92	2367221.72	2275504.56	2314178.52	2198585.33
2671940.56	2568190.62	2497190.17	2437121.95	2355054.4	2368092.38	2276961.21	2314989.04	2200234.13
2672629.73	2584163.87	2497858.77	2451559.89	2356027.21	2371212.33	2276961.21	2316188.5	2204656.27
2680795.63	2584642.36	2499975.91	2452142.73	2370825.14	2378033.18	2276961.21	2316967.73	2205196.54
2688587.65	2584642.36	2500047.66	2452142.73	2370825.14	2381513.1	2283795.55	2318457.72	2206597.57
2688662.29	2585130.8	2500696.29	2465864.31	2375807.78	2381513.1	2287070.93	2319273.56	2206600.04
2690108.42	2586651.59	2500696.29	2466314.45	2385217.43	2382067.23	2287520.27	2319819.12	2208000.65
2691596.94	2602261.87	2500824.28	2470099.23	2386956.28	2385721.59	2287520.27	2322281.62	2210689.8
2694698.33	2604529.84	2503250.91	2470099.23	2388885.32	2396372.97	2298202.29	2323570.83	2210689.8

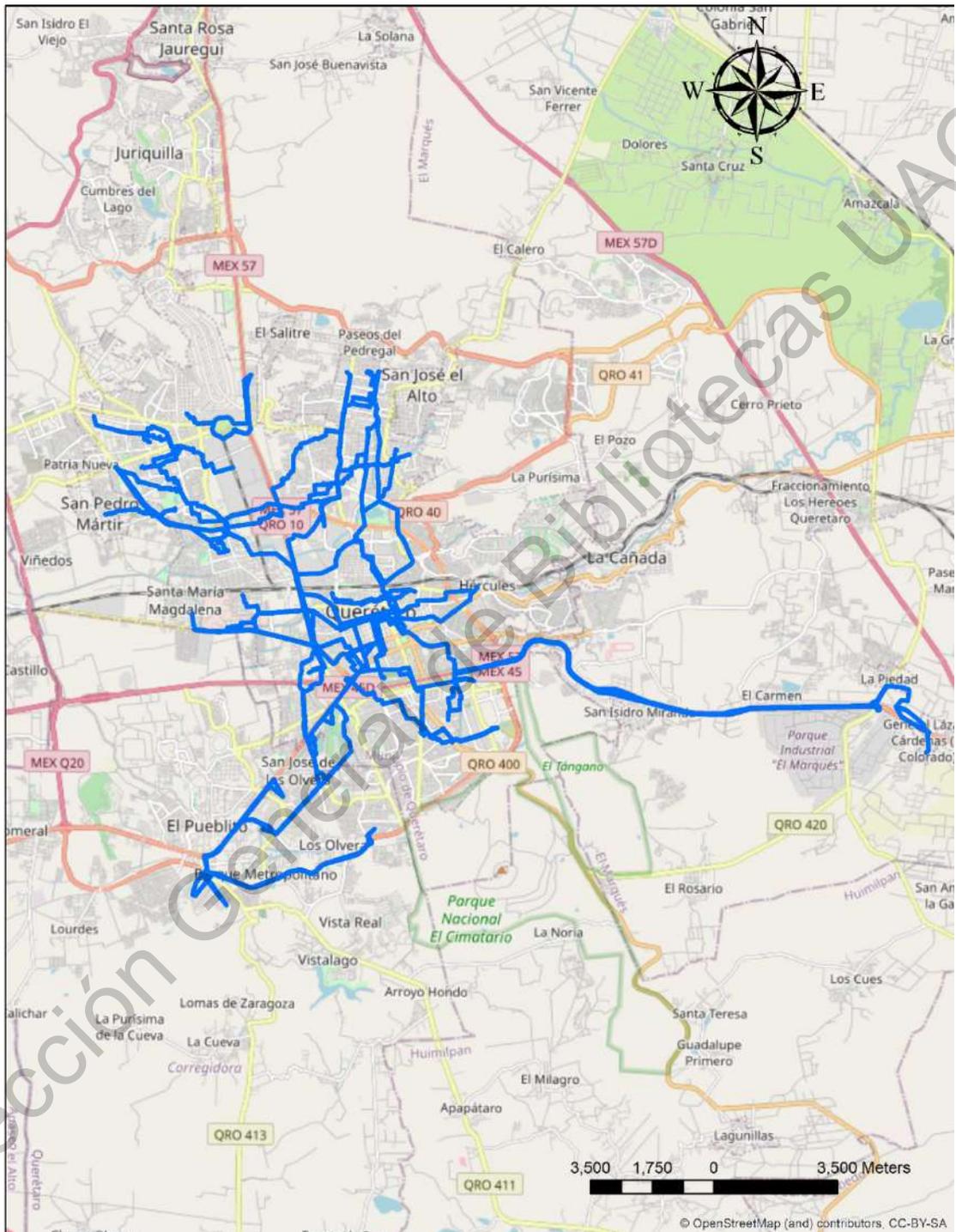
Anexo 4. Mapas de las redes de menor costo de las 25 generaciones generadas a partir del padre 1.



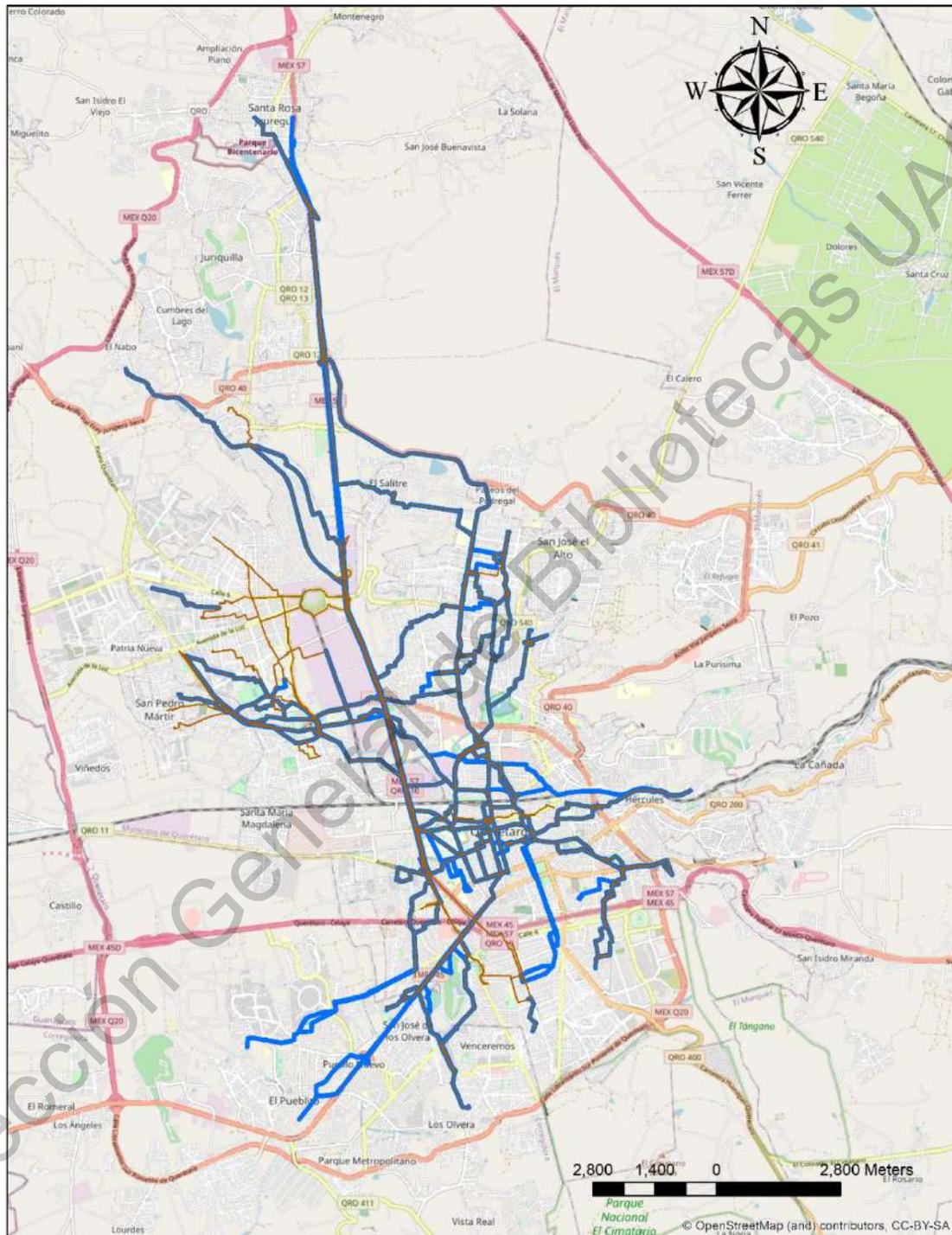
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 1.



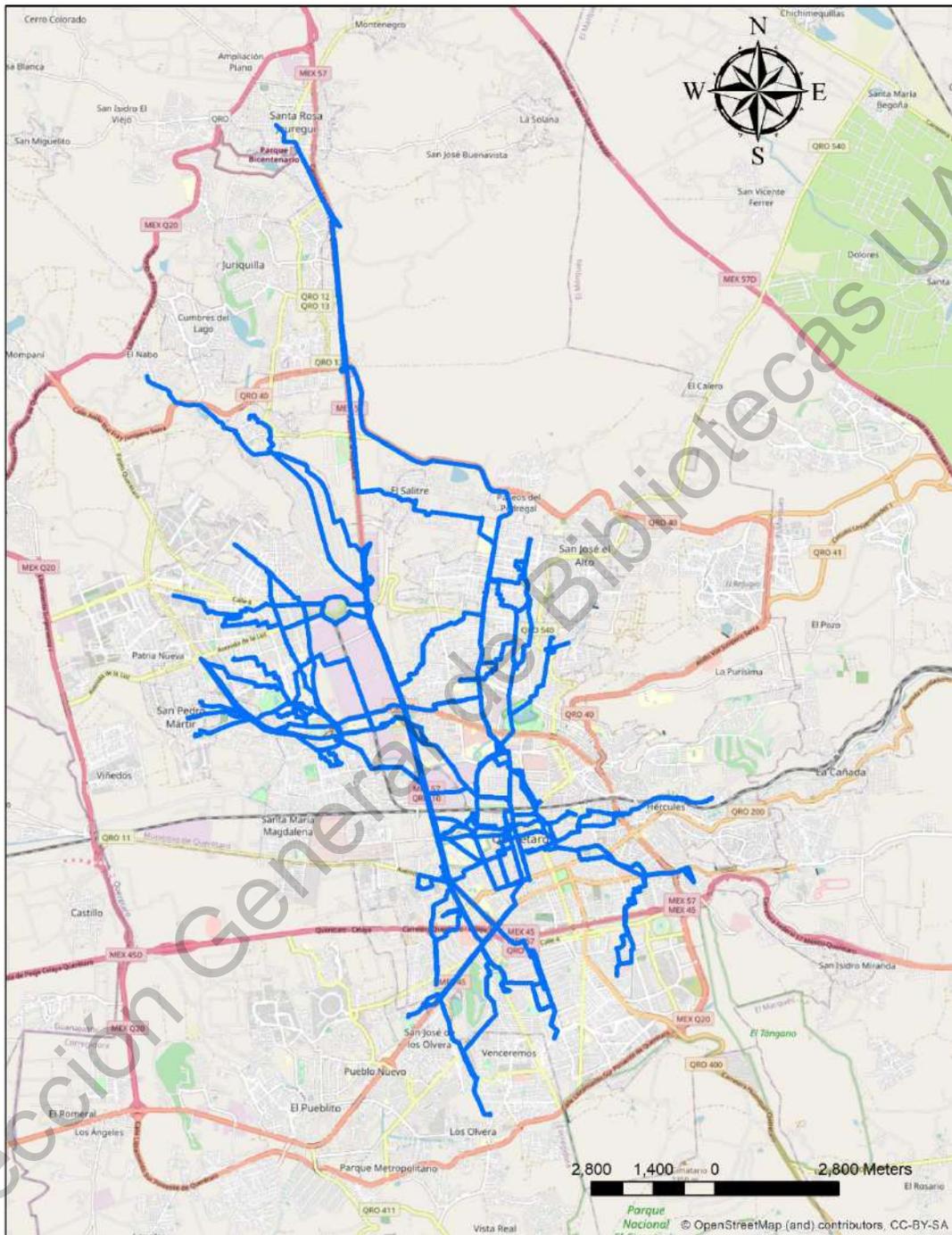
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 2.



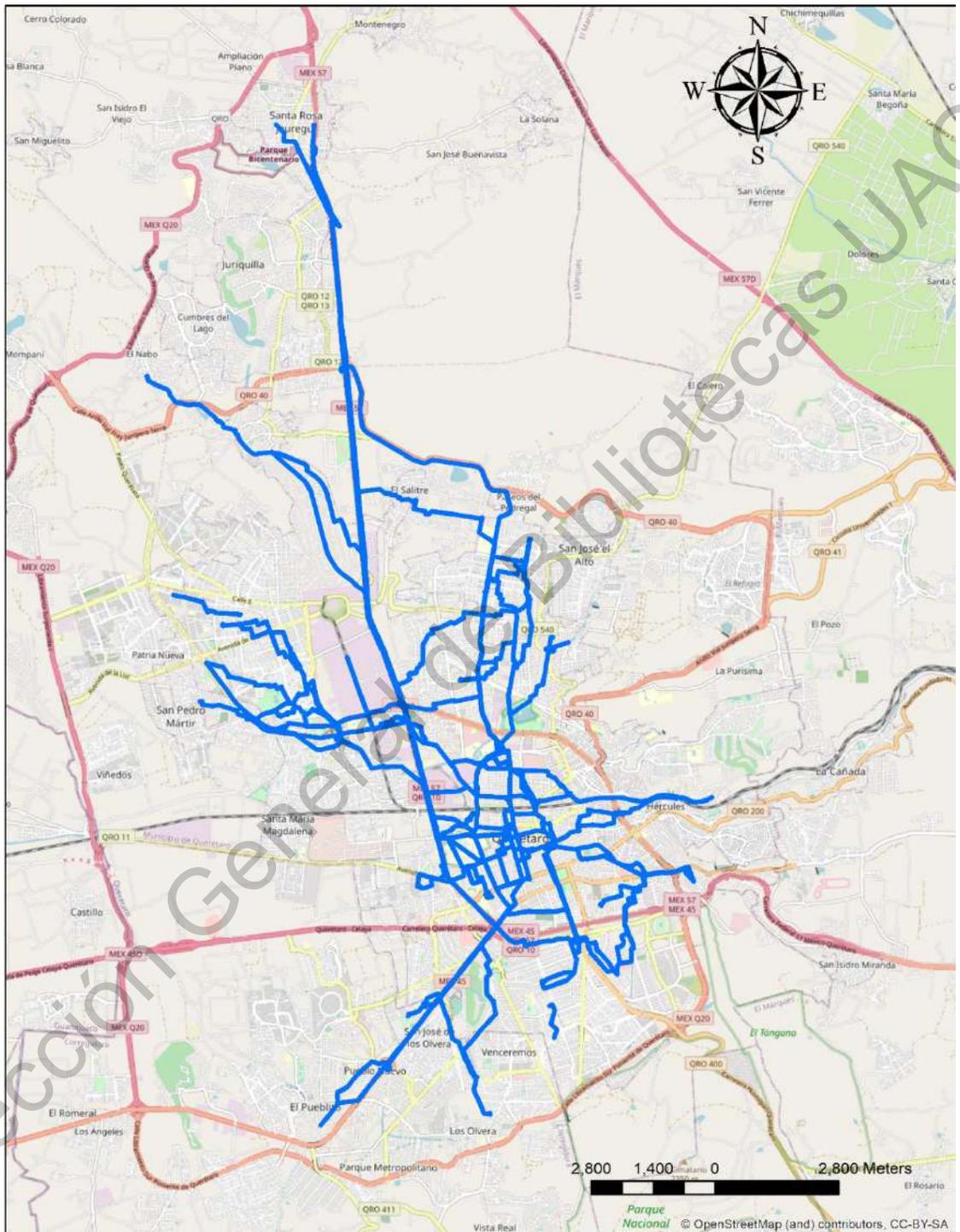
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 3.



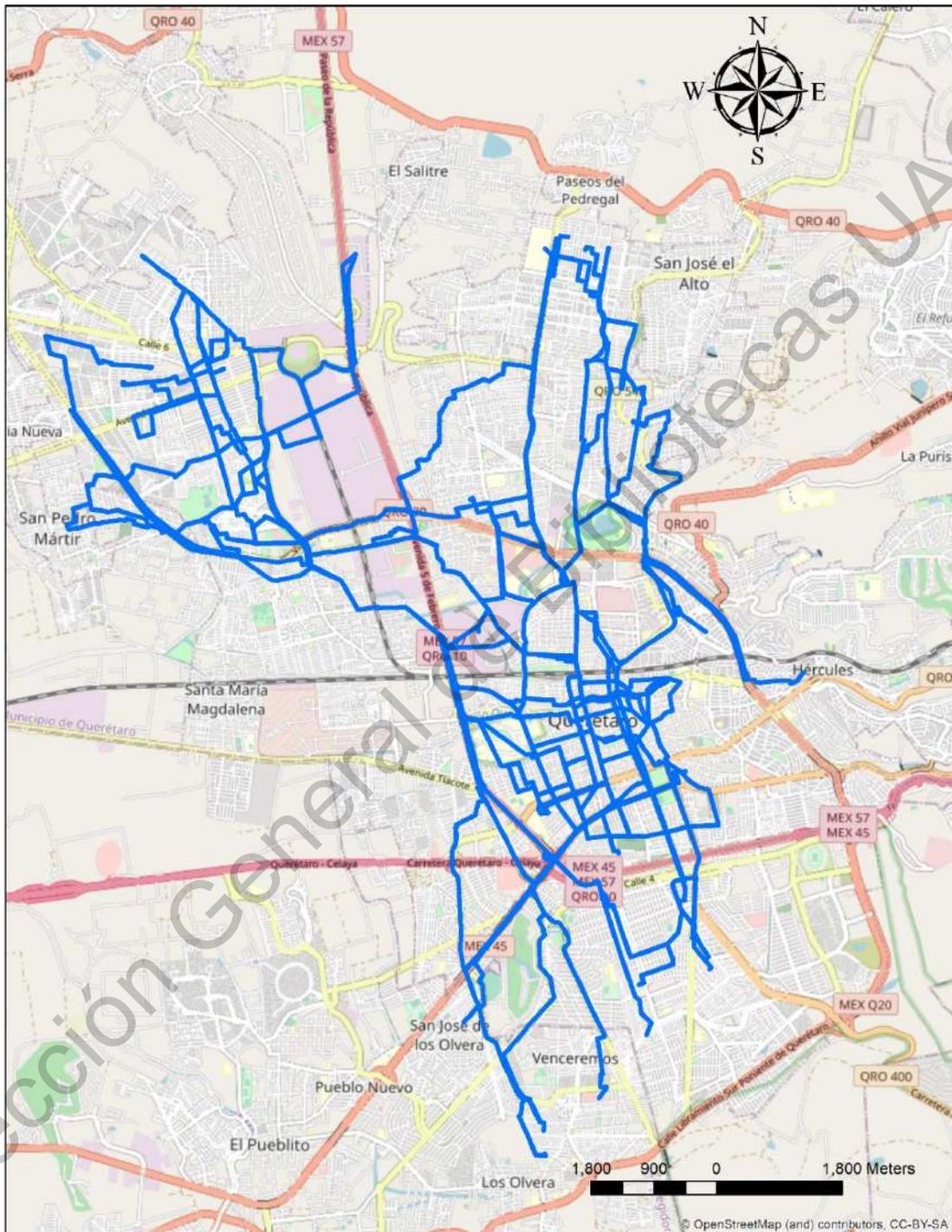
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 4.



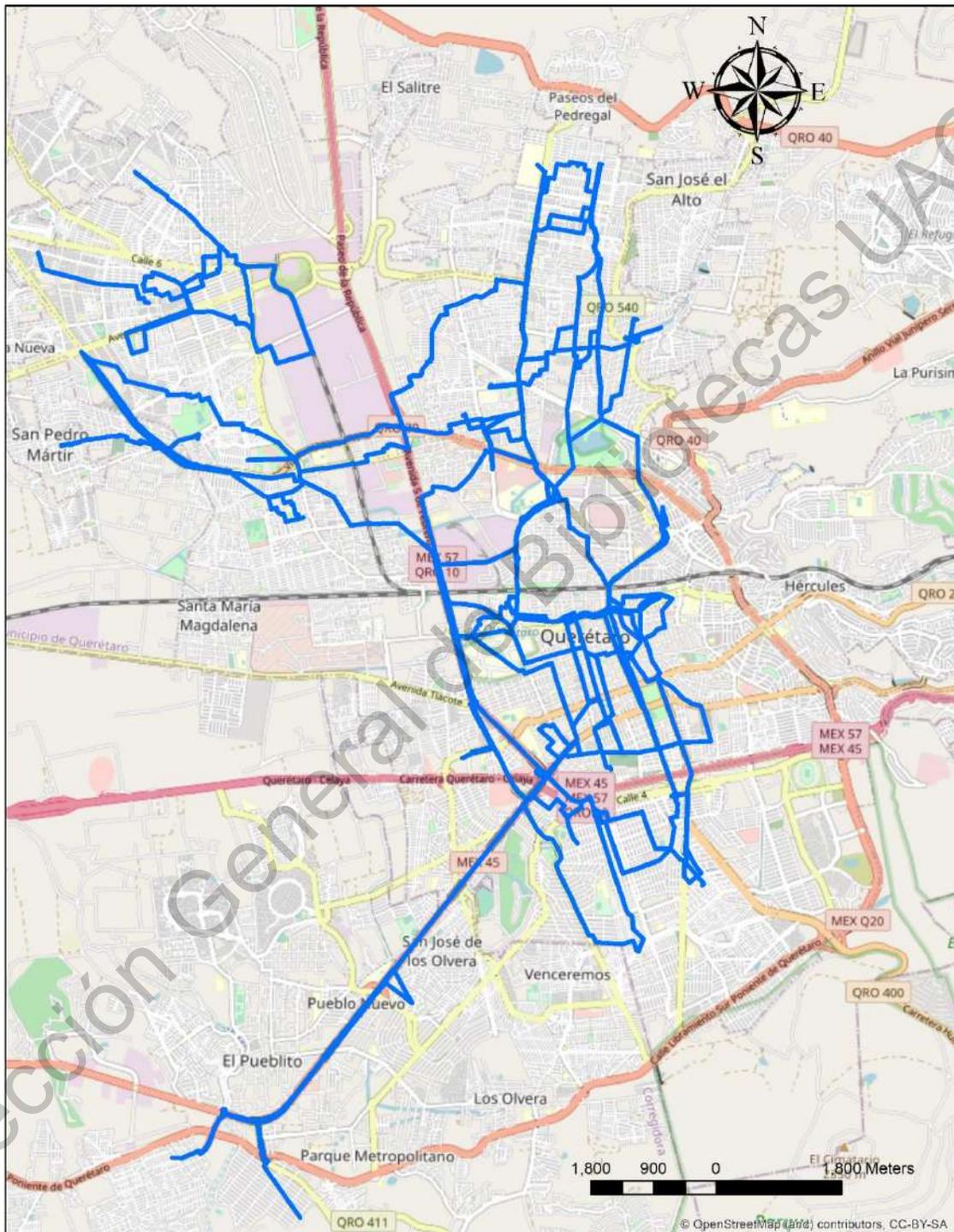
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 5.



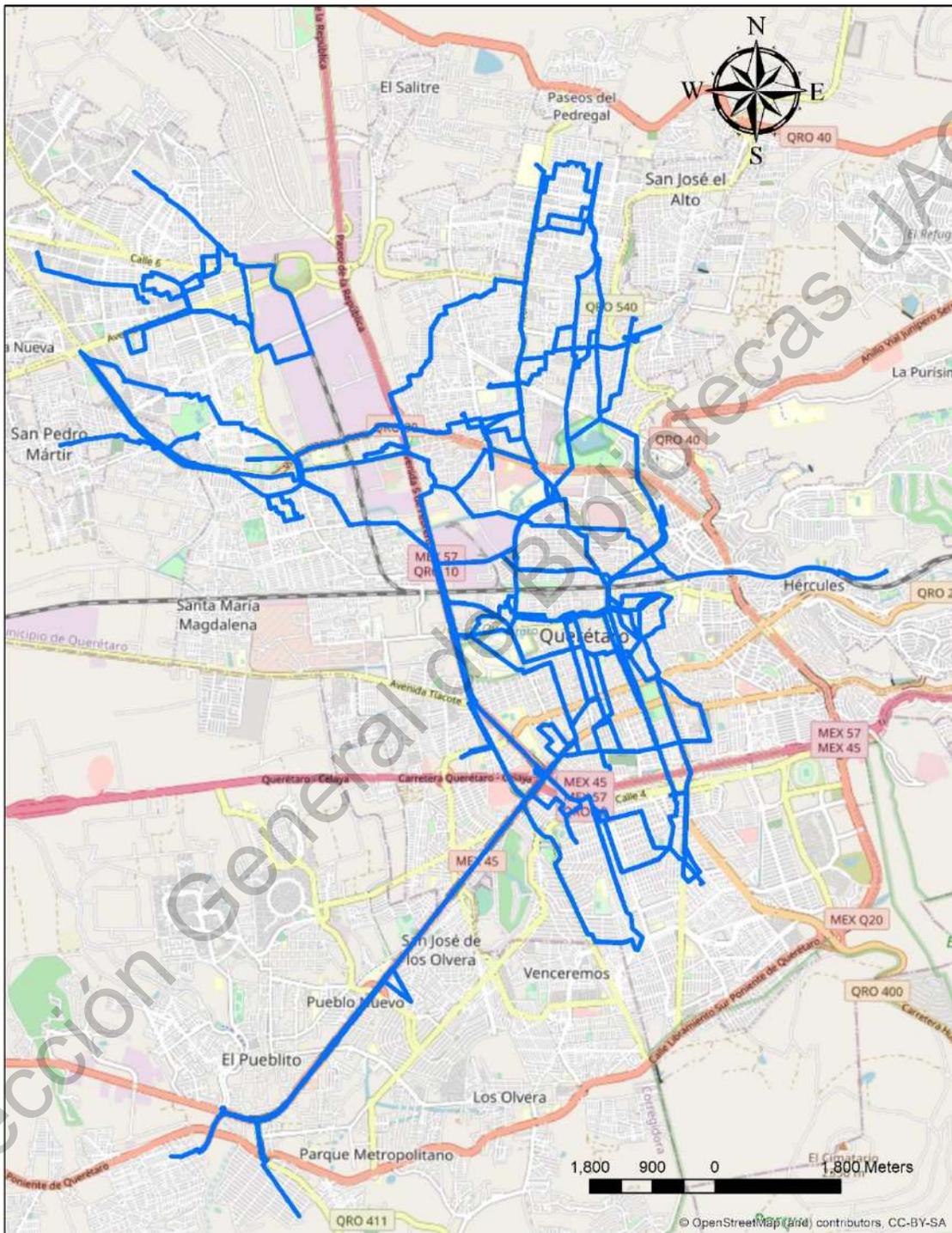
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 6.



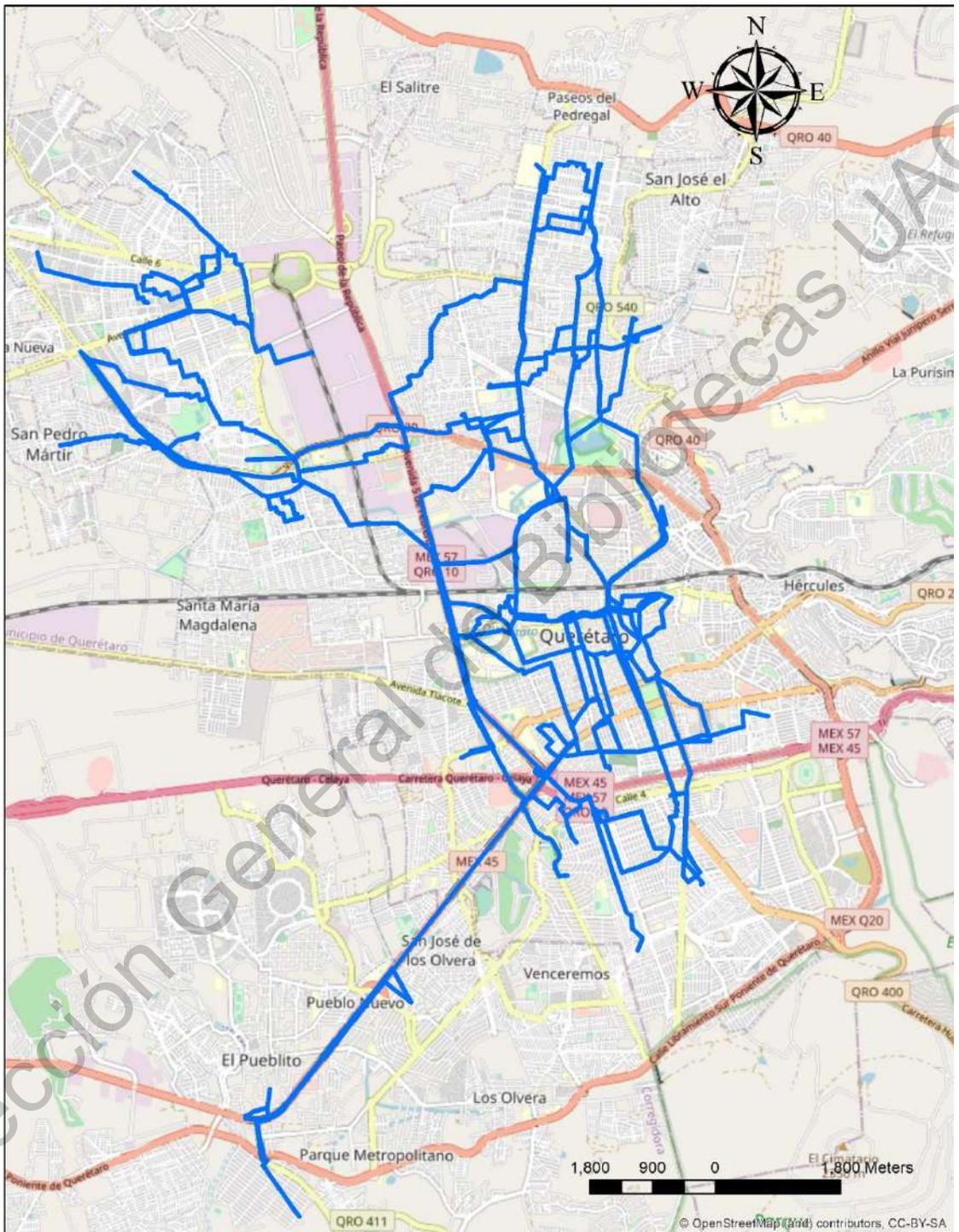
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 8.



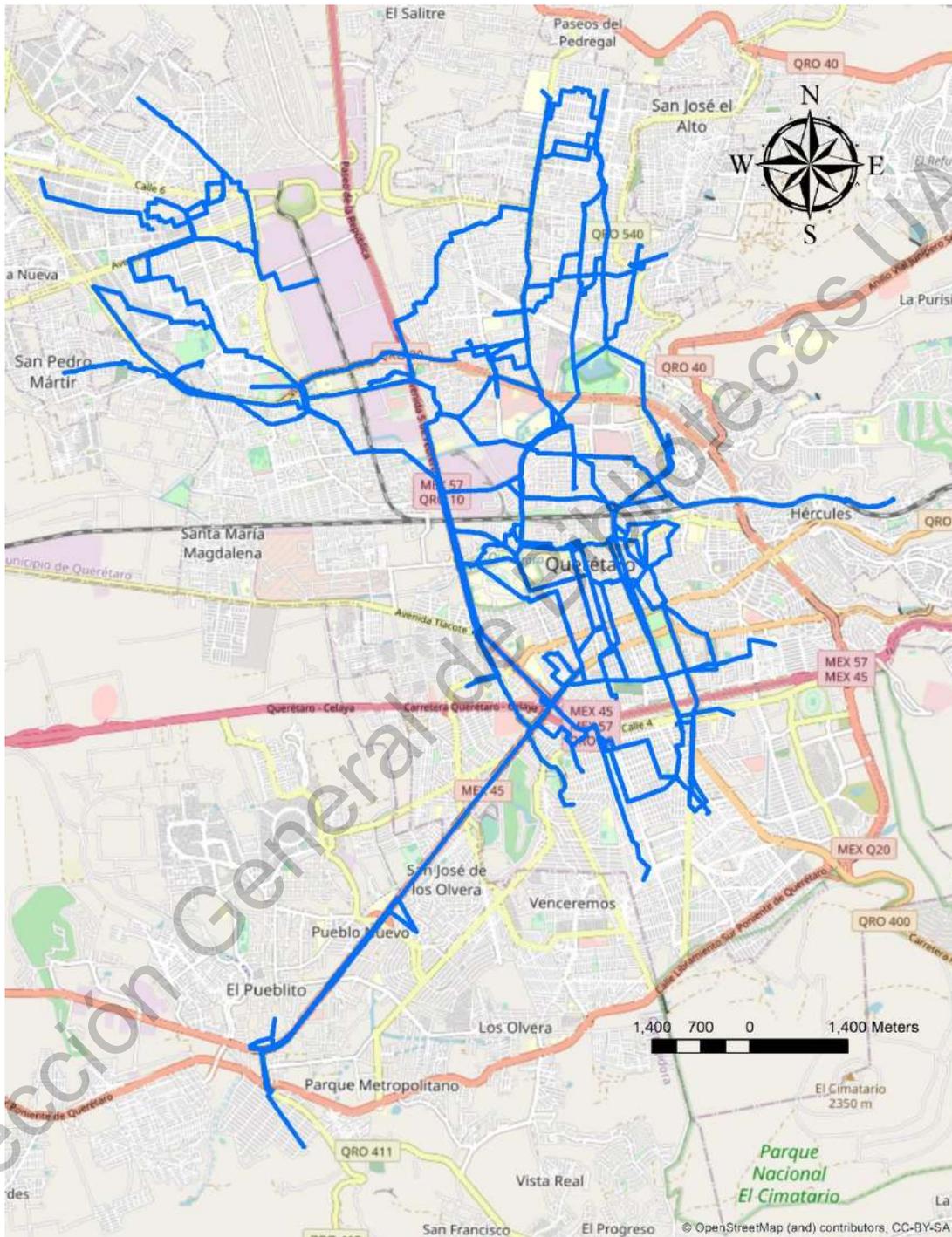
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 9.



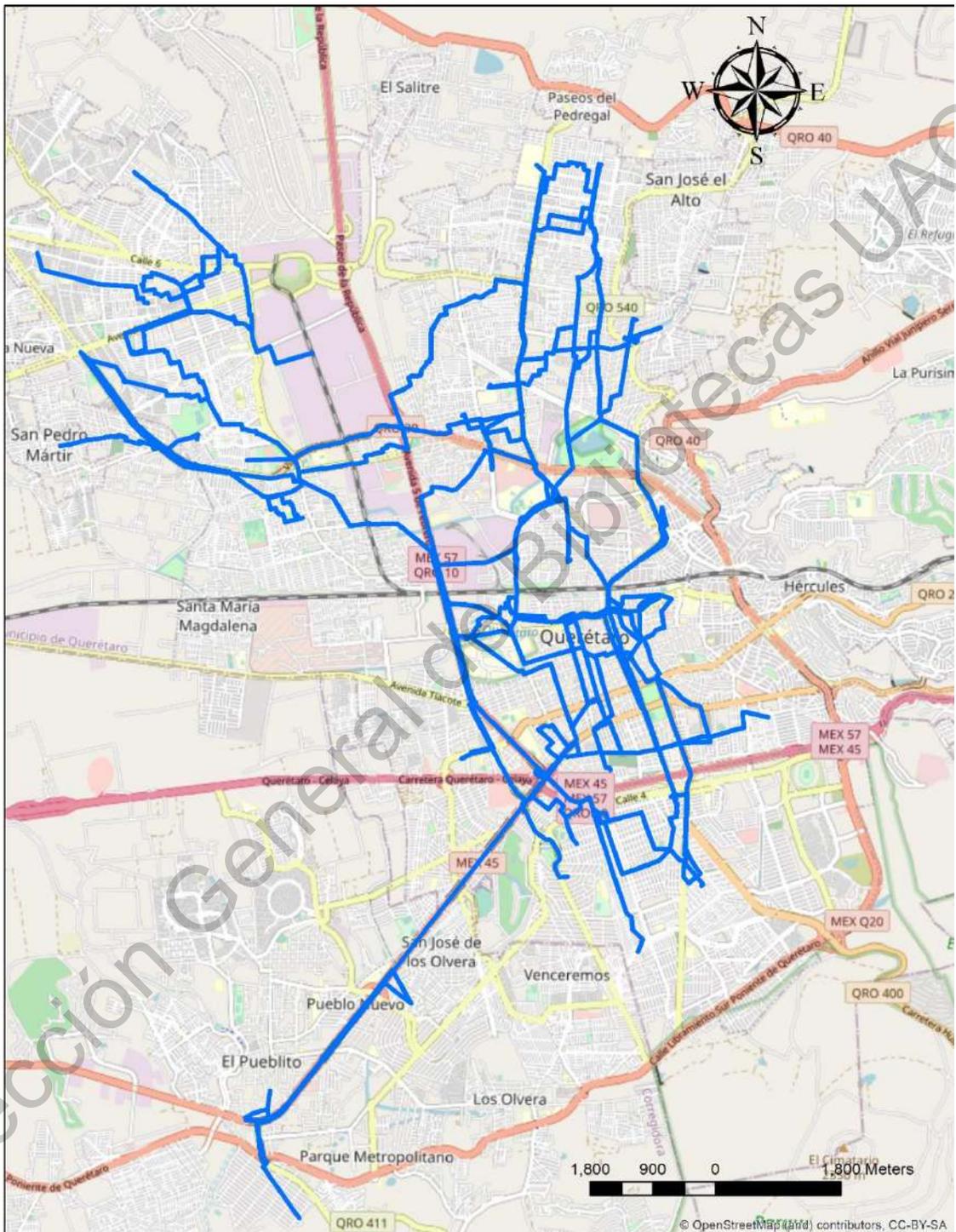
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 10.



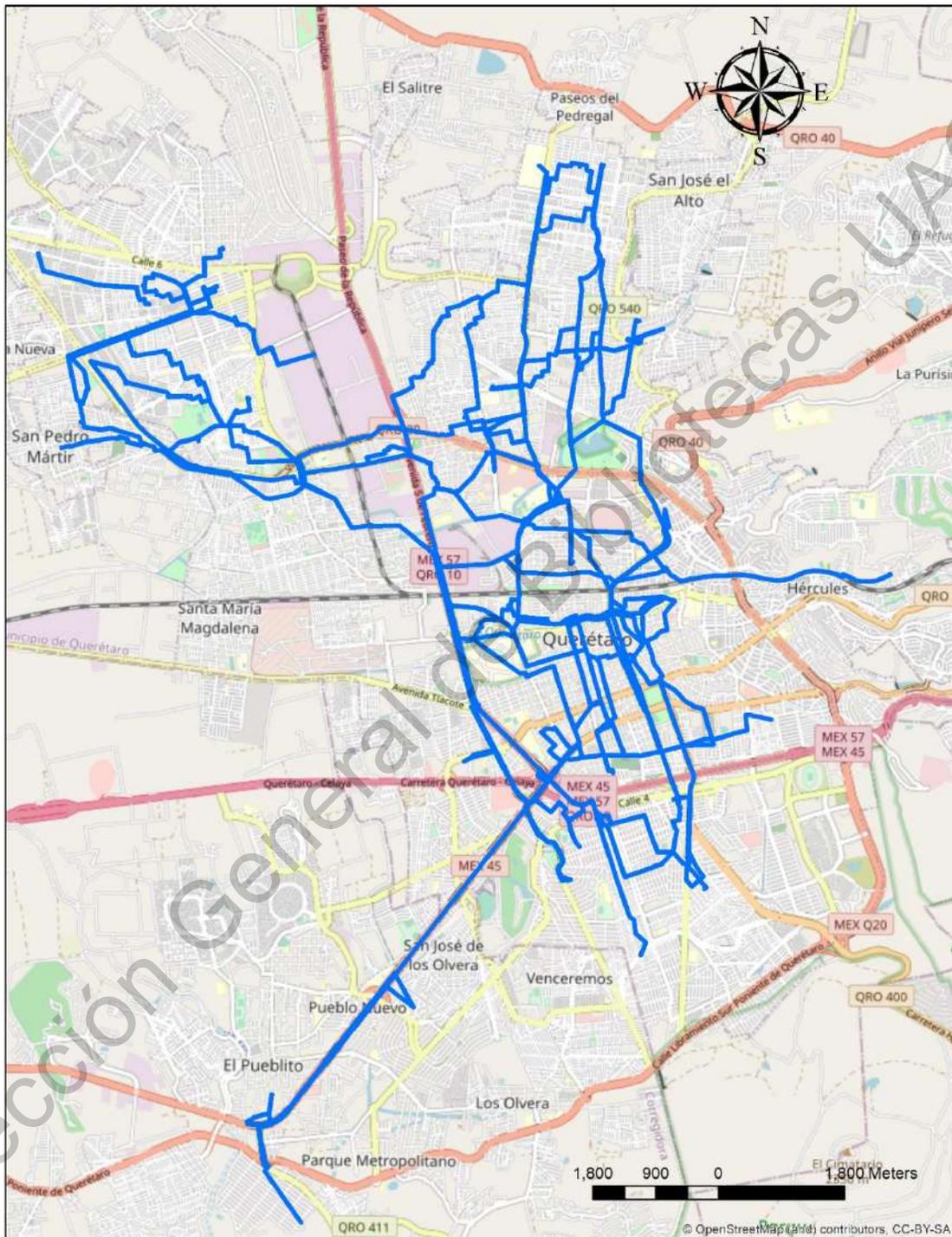
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 11.



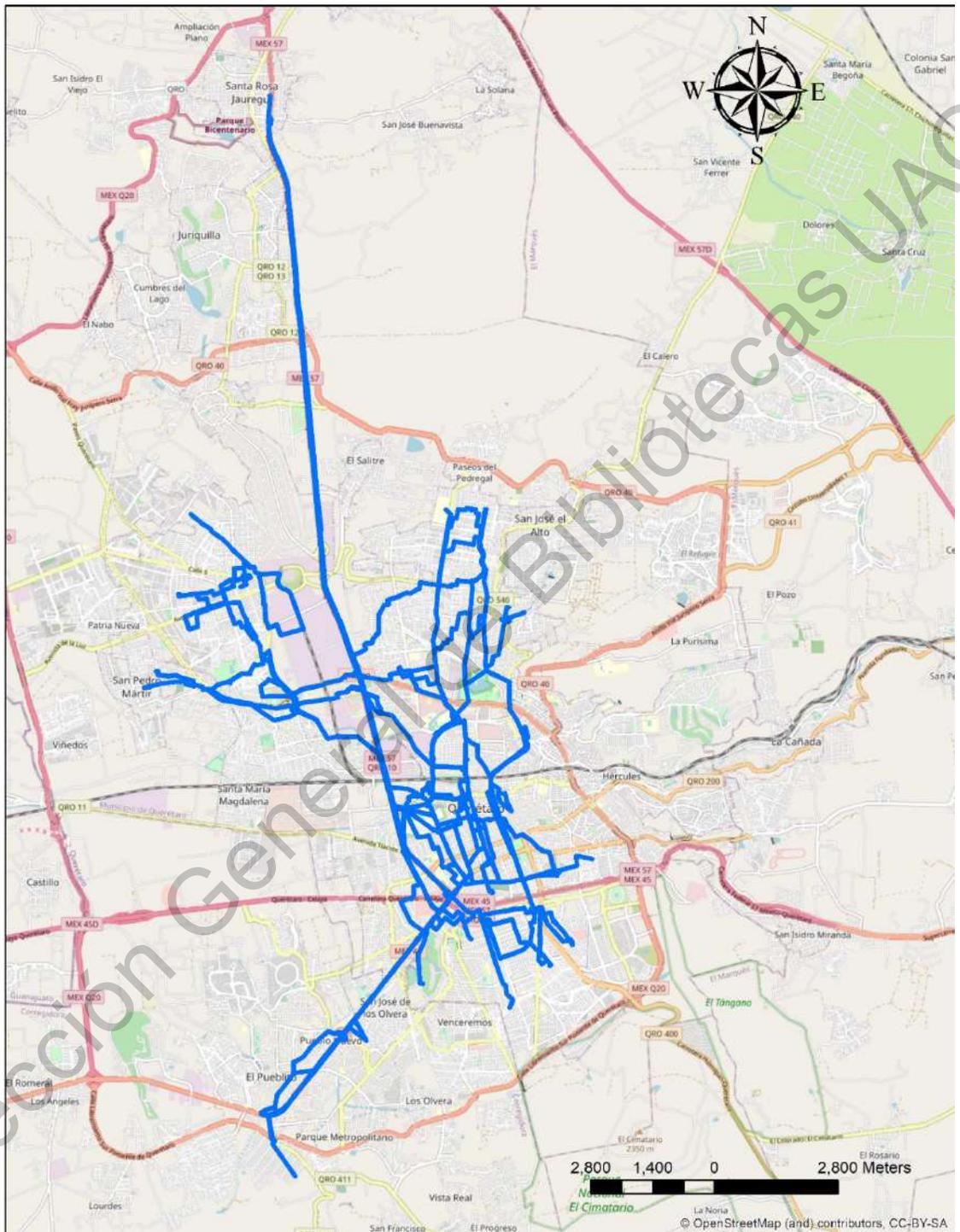
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 12.



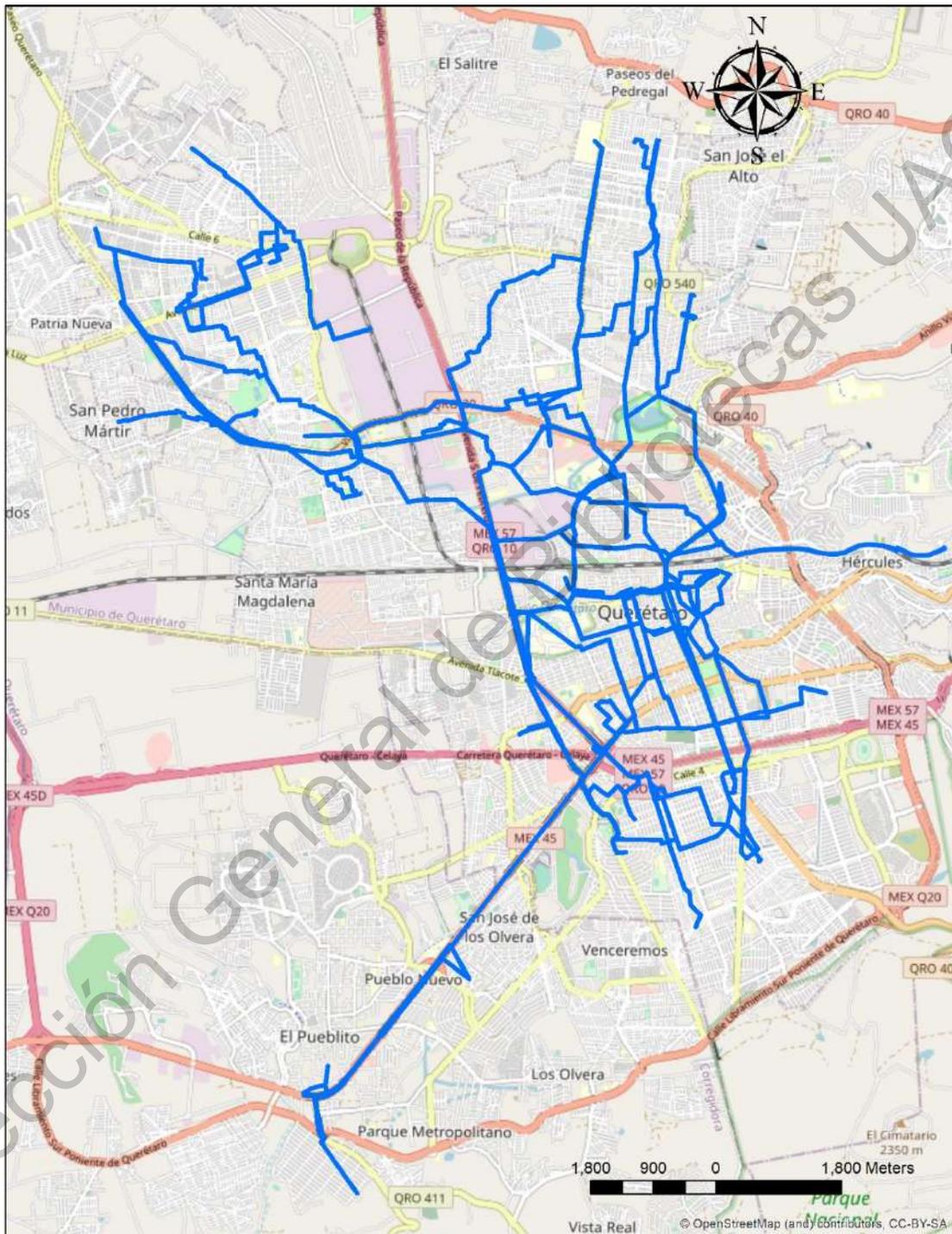
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 13.



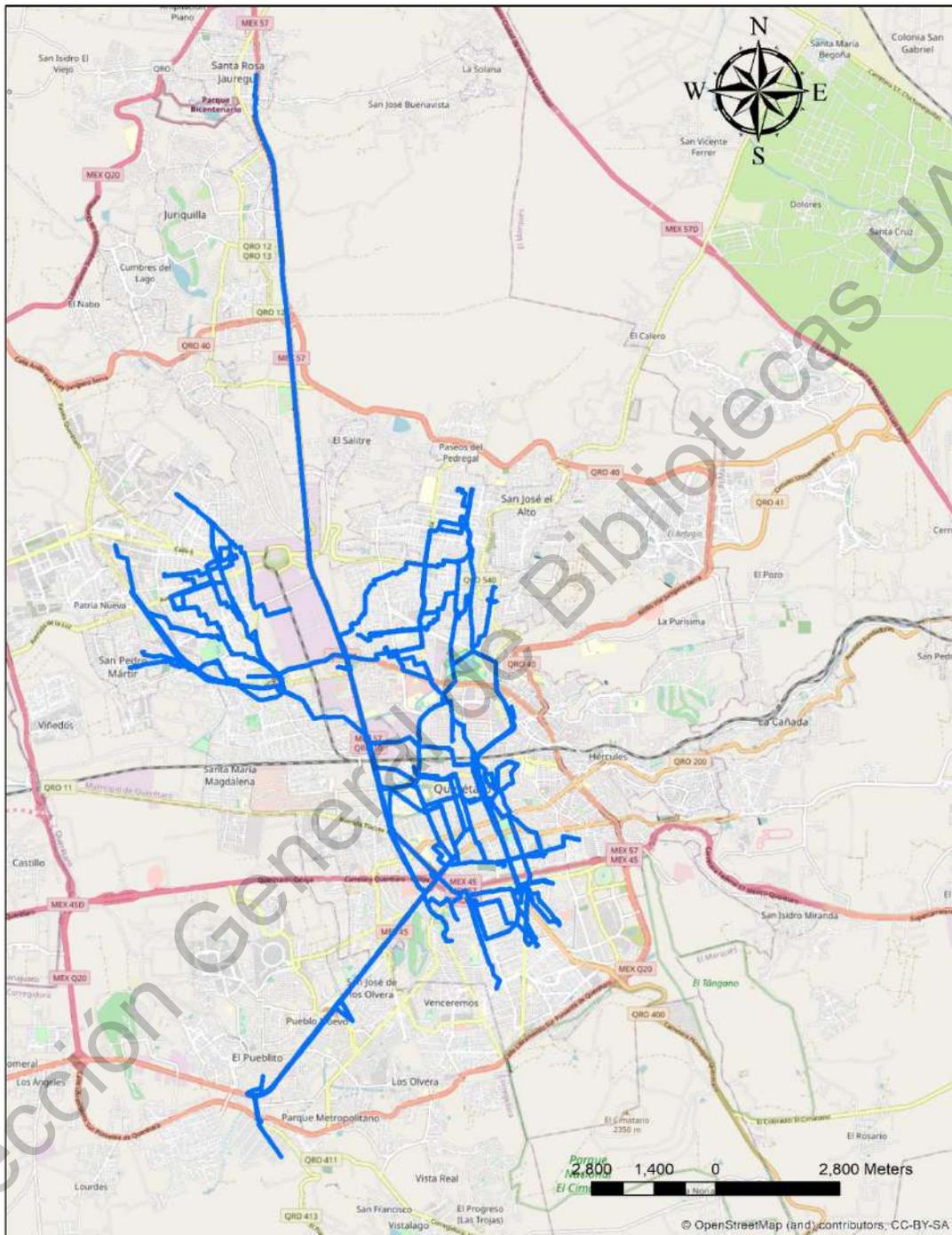
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 14.



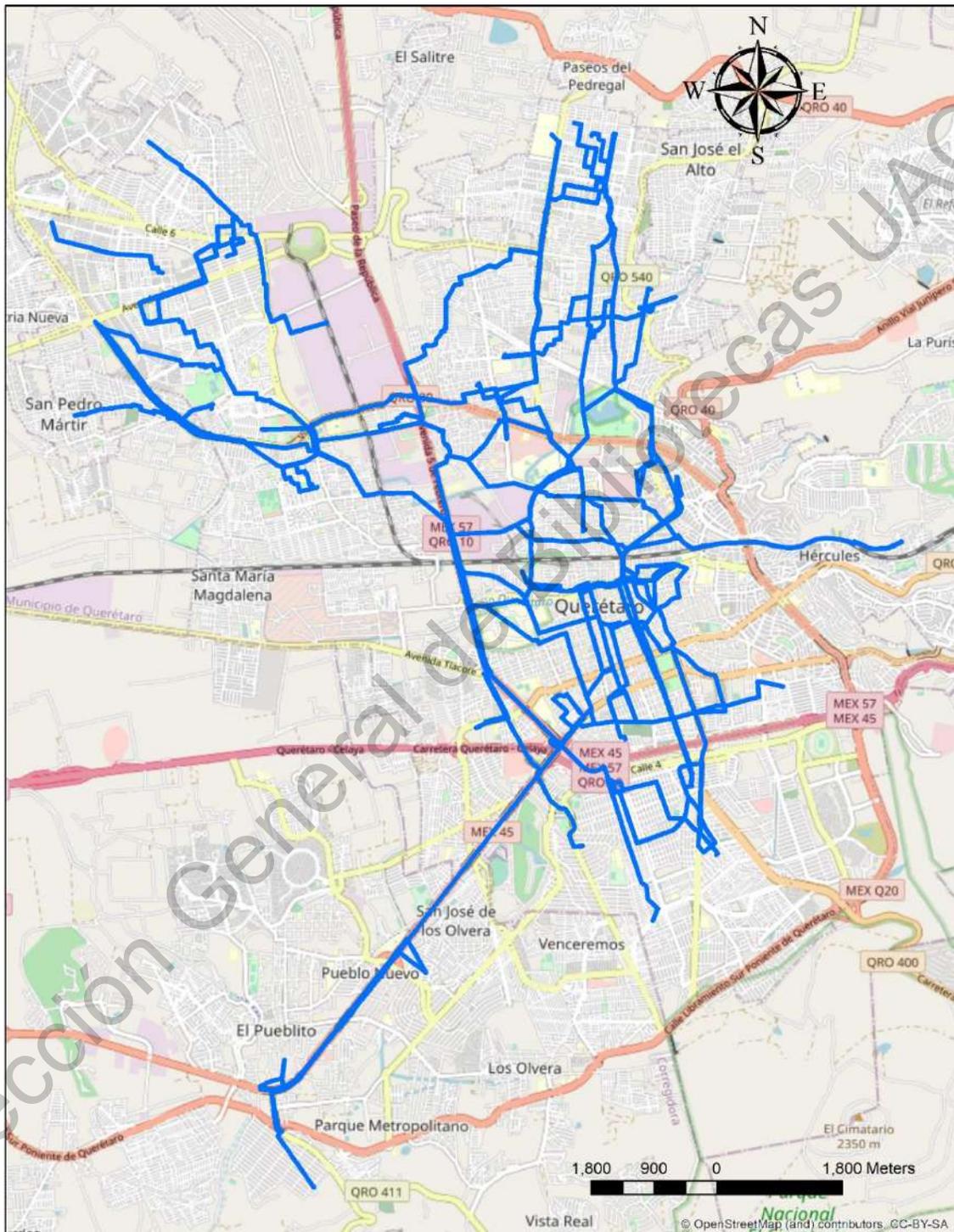
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 15.



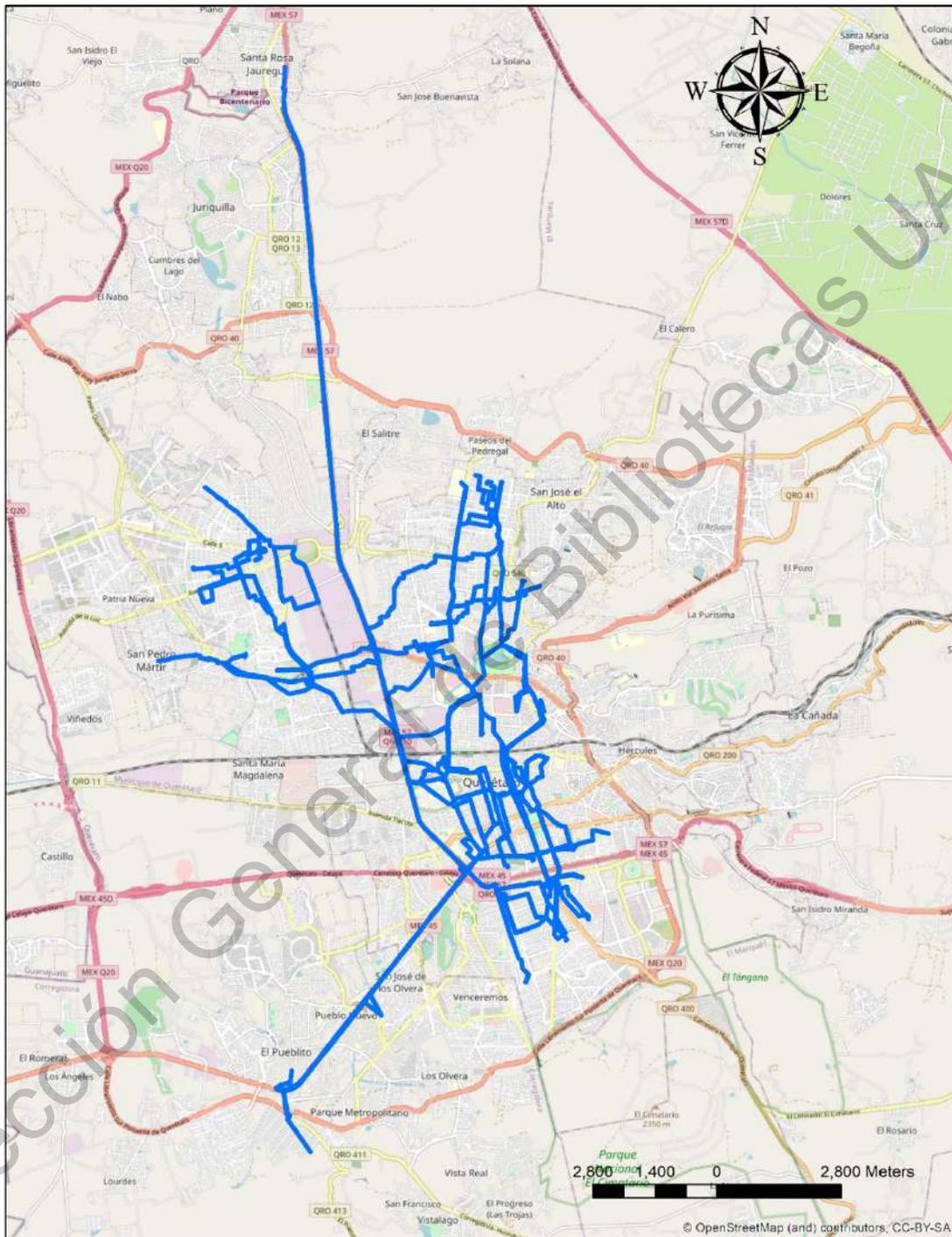
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 16.



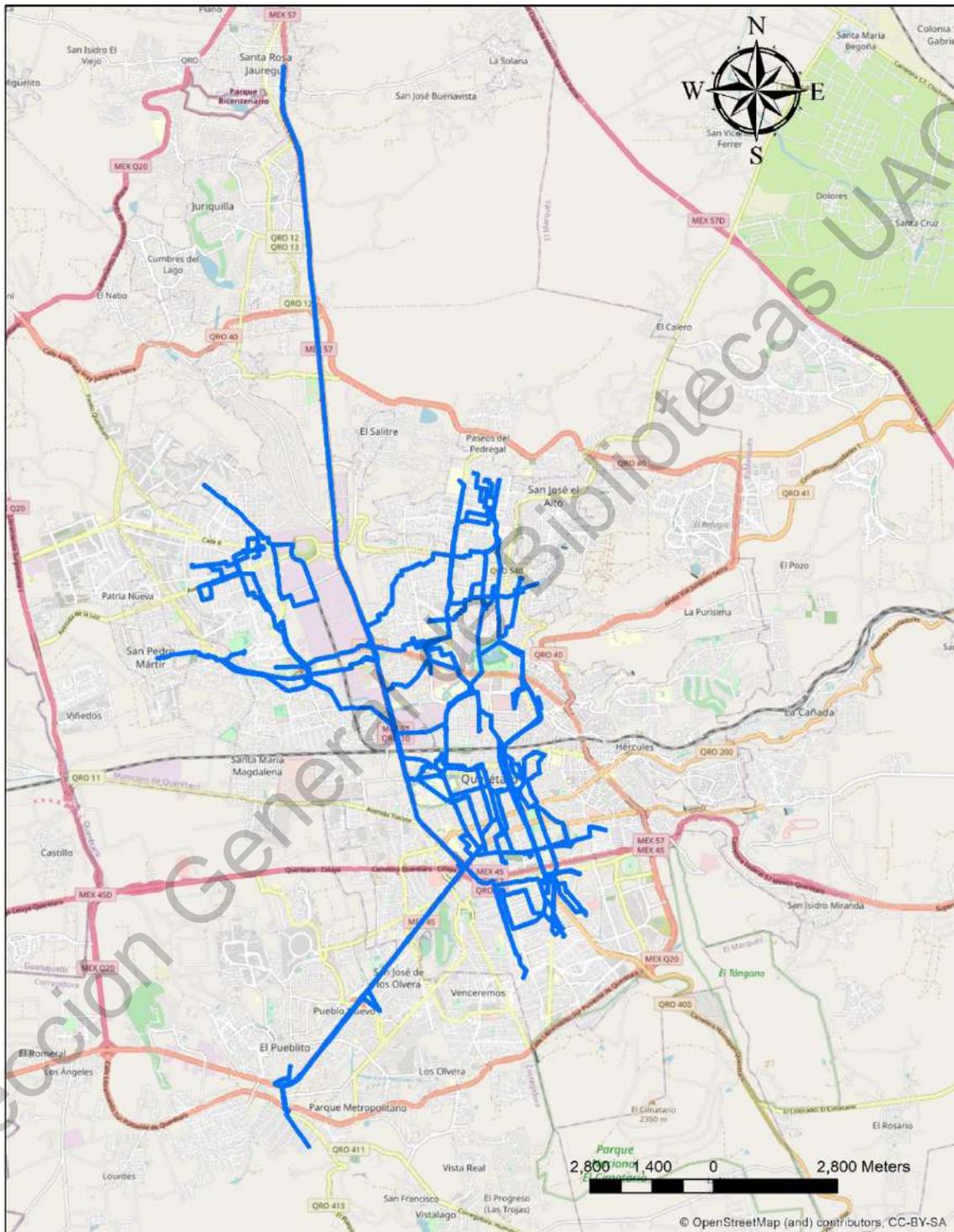
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 17.



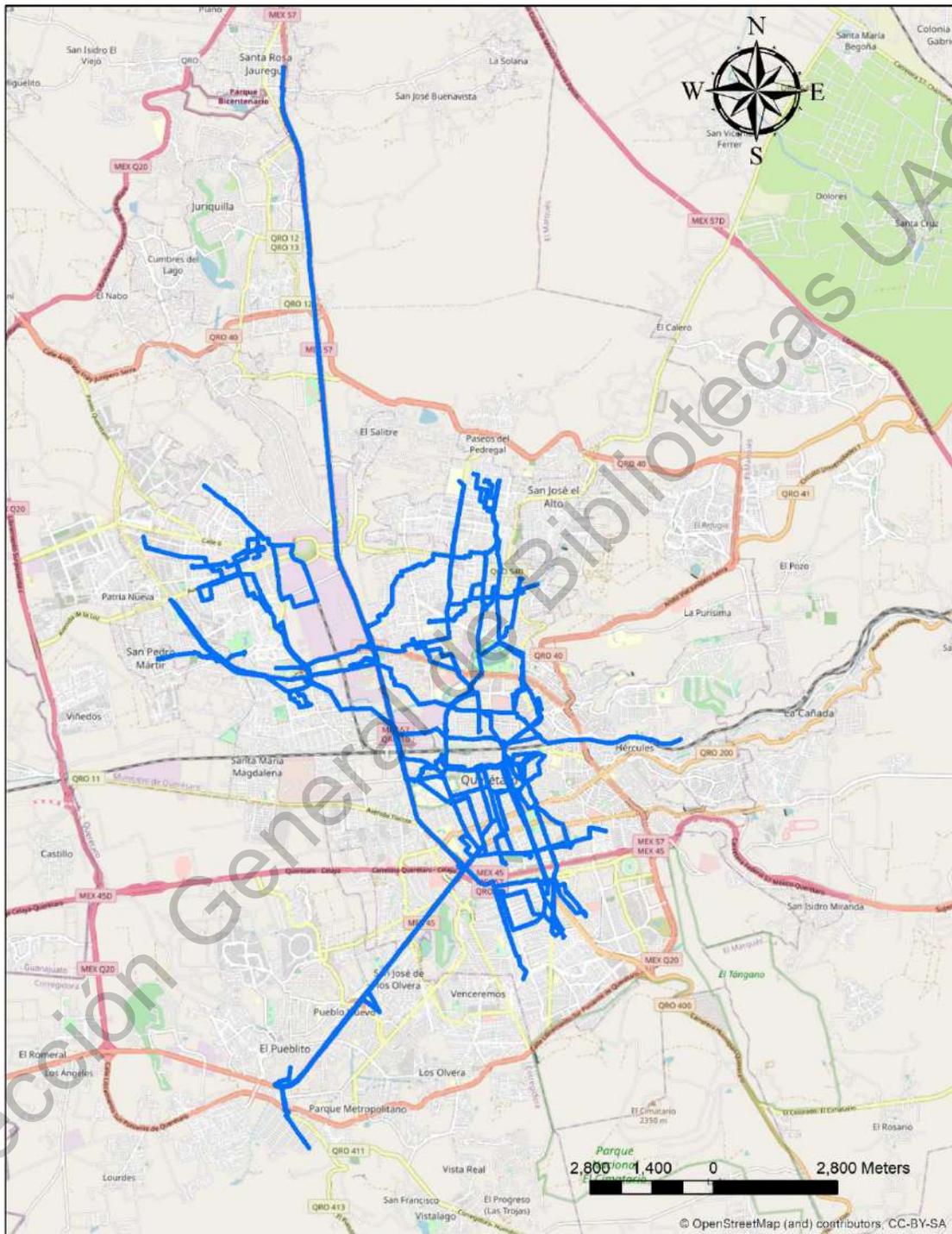
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 18.



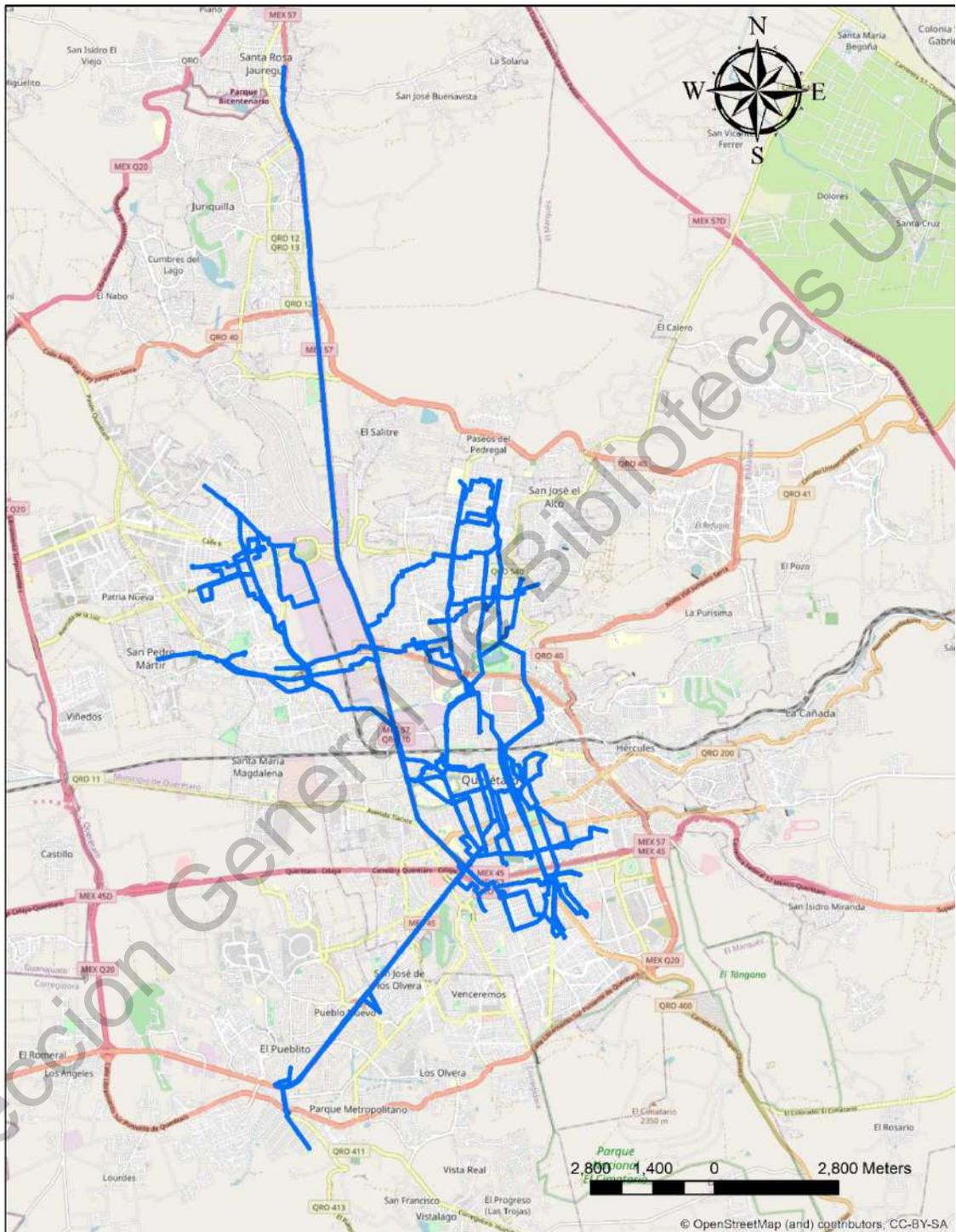
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 19.



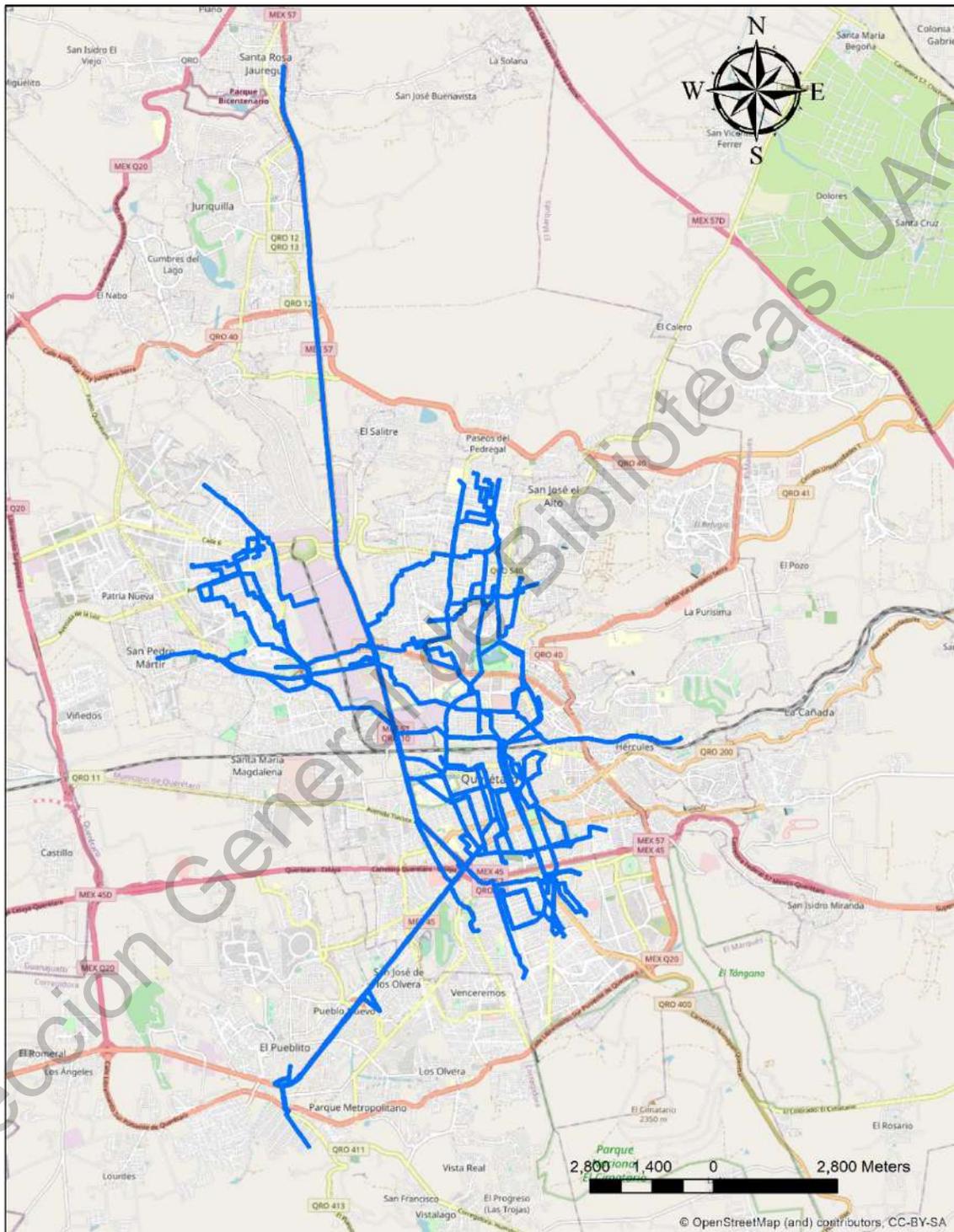
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 20.



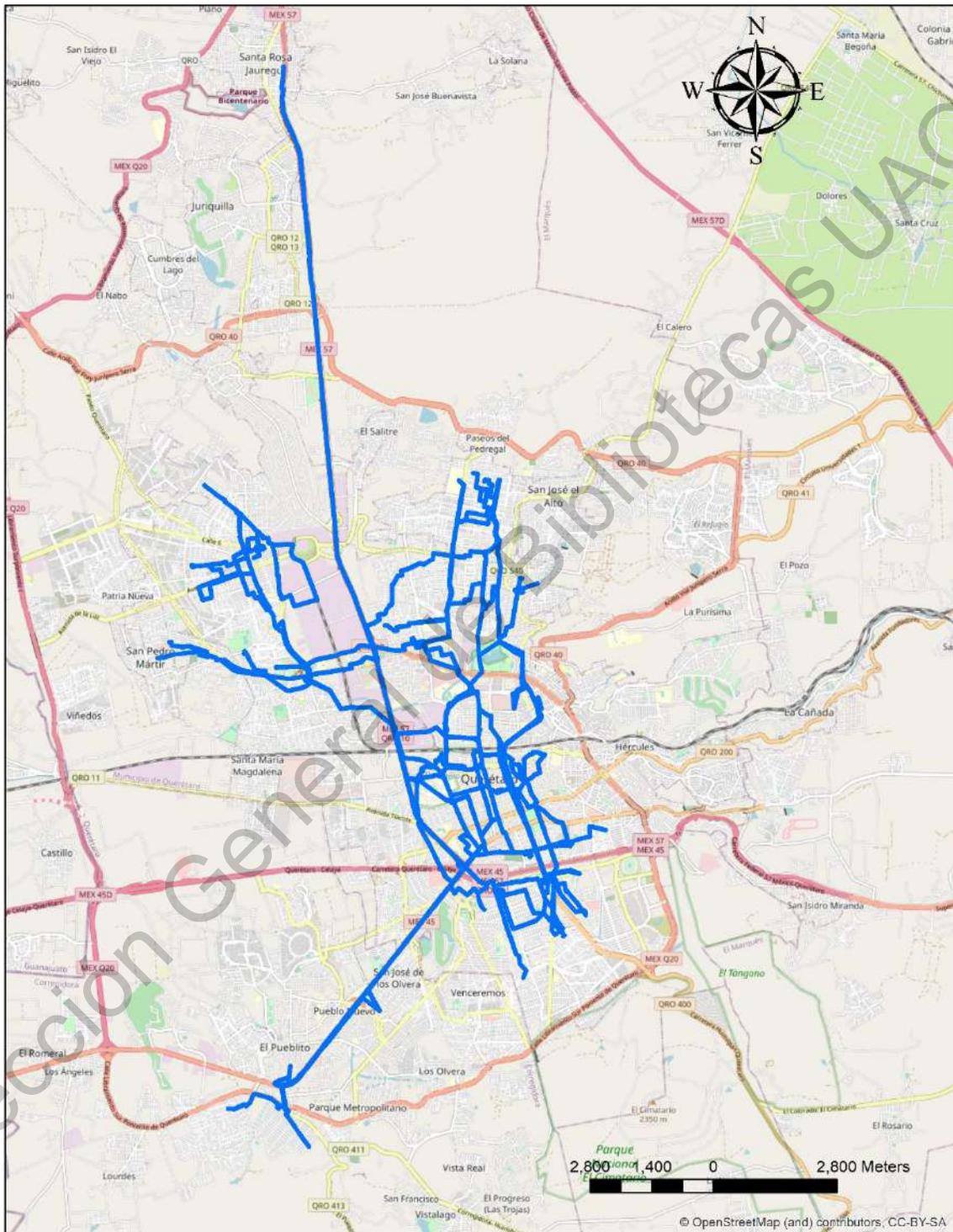
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 21.



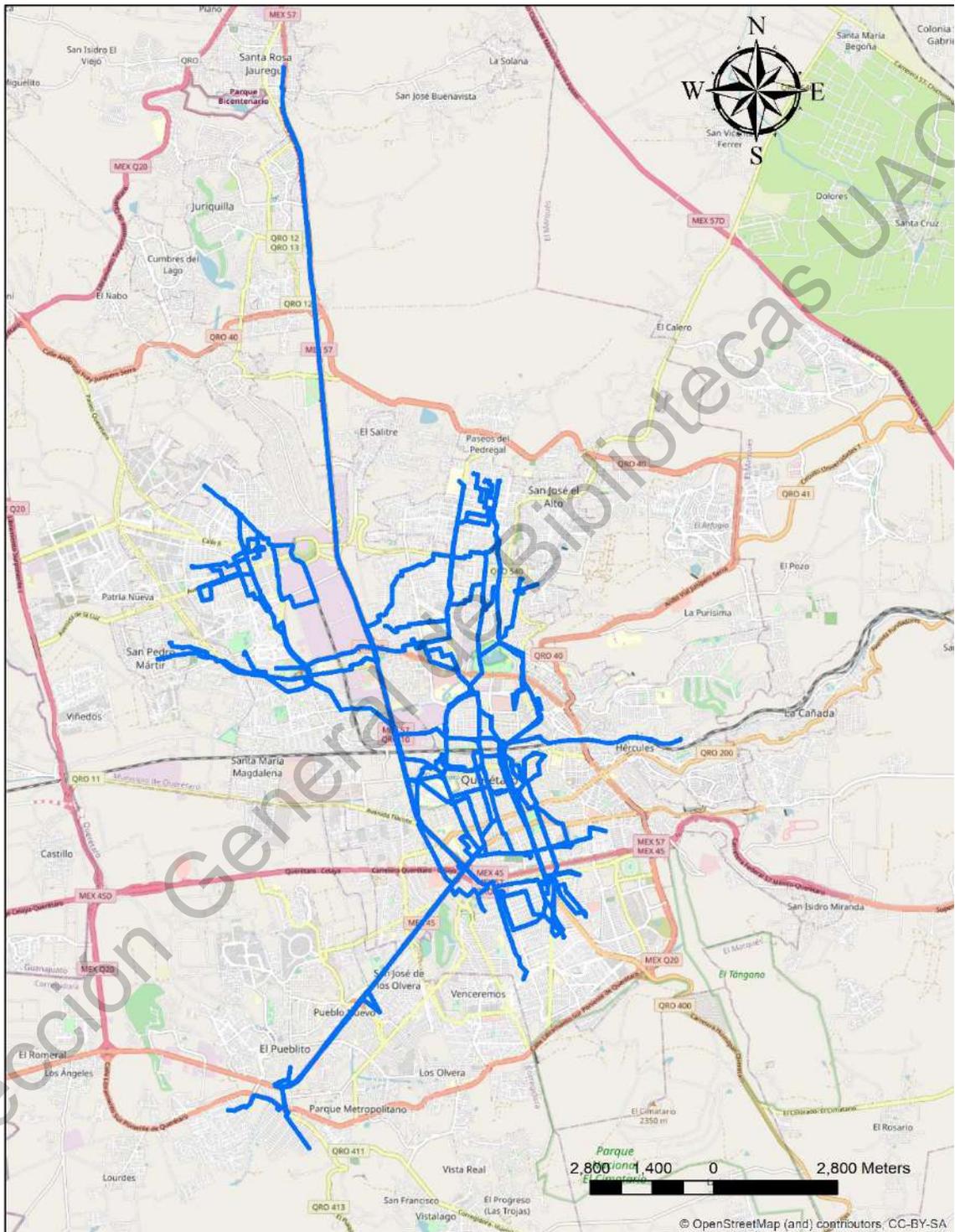
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 22.



Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 23.

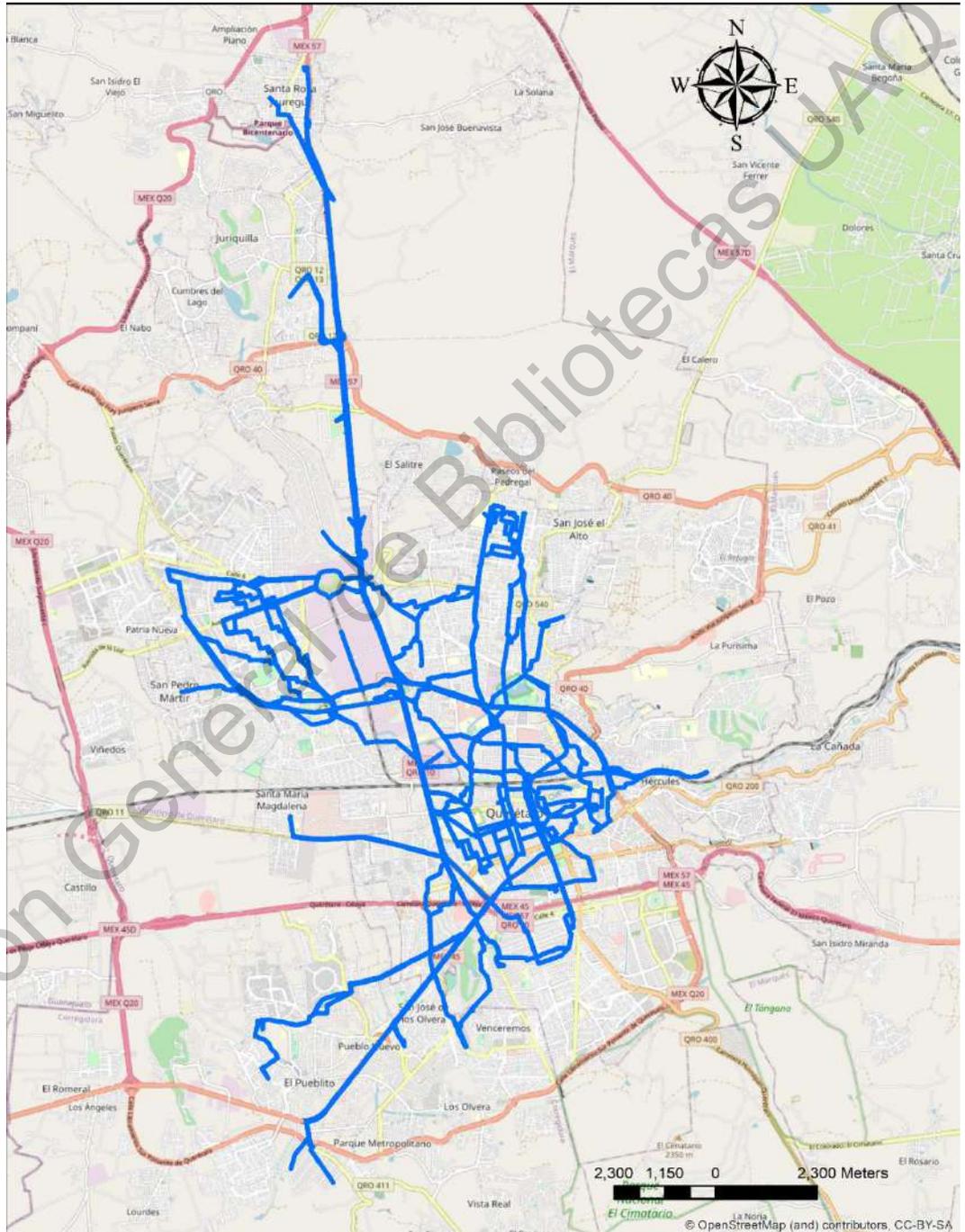


Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 24.

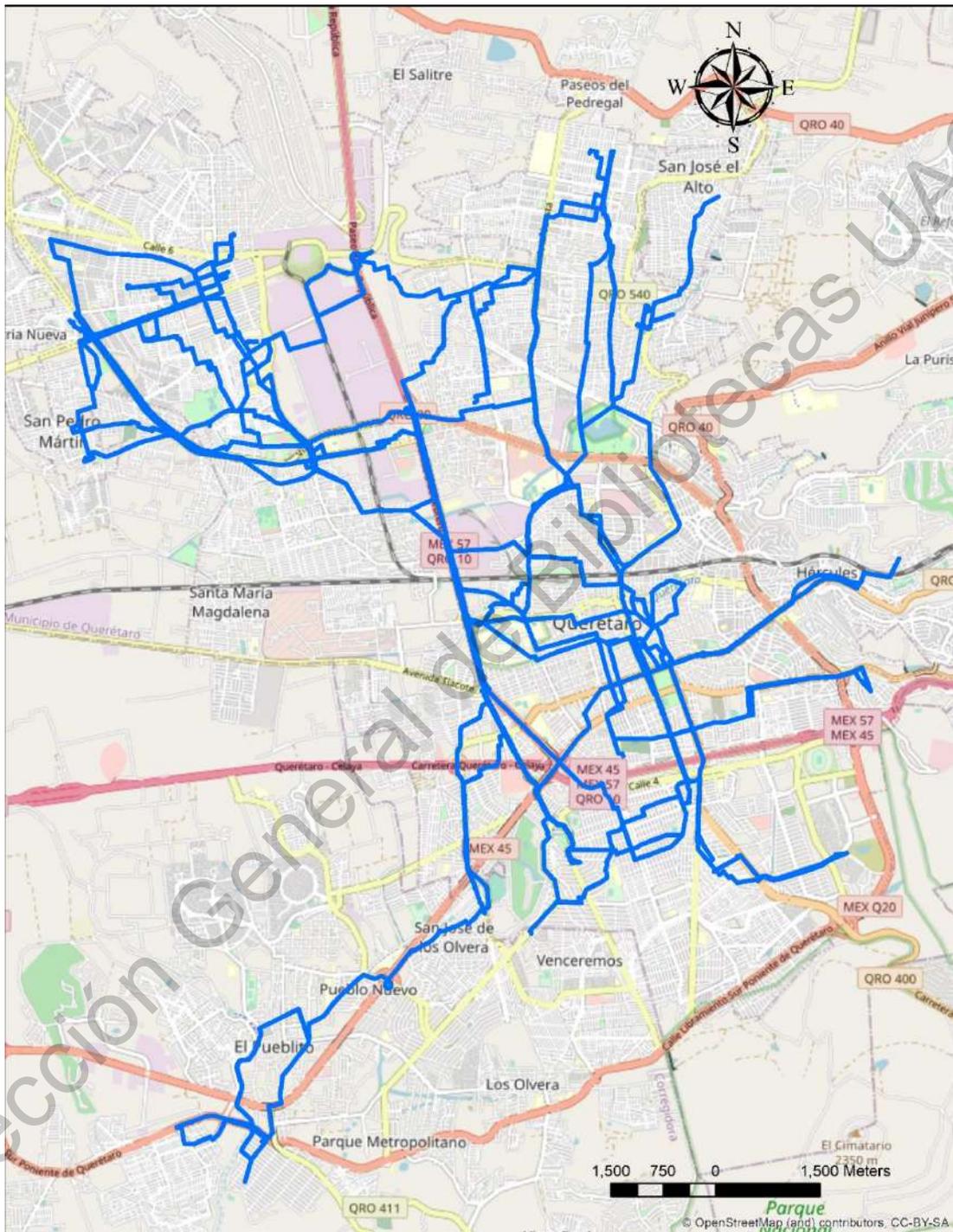


Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 1 de la generación 25.

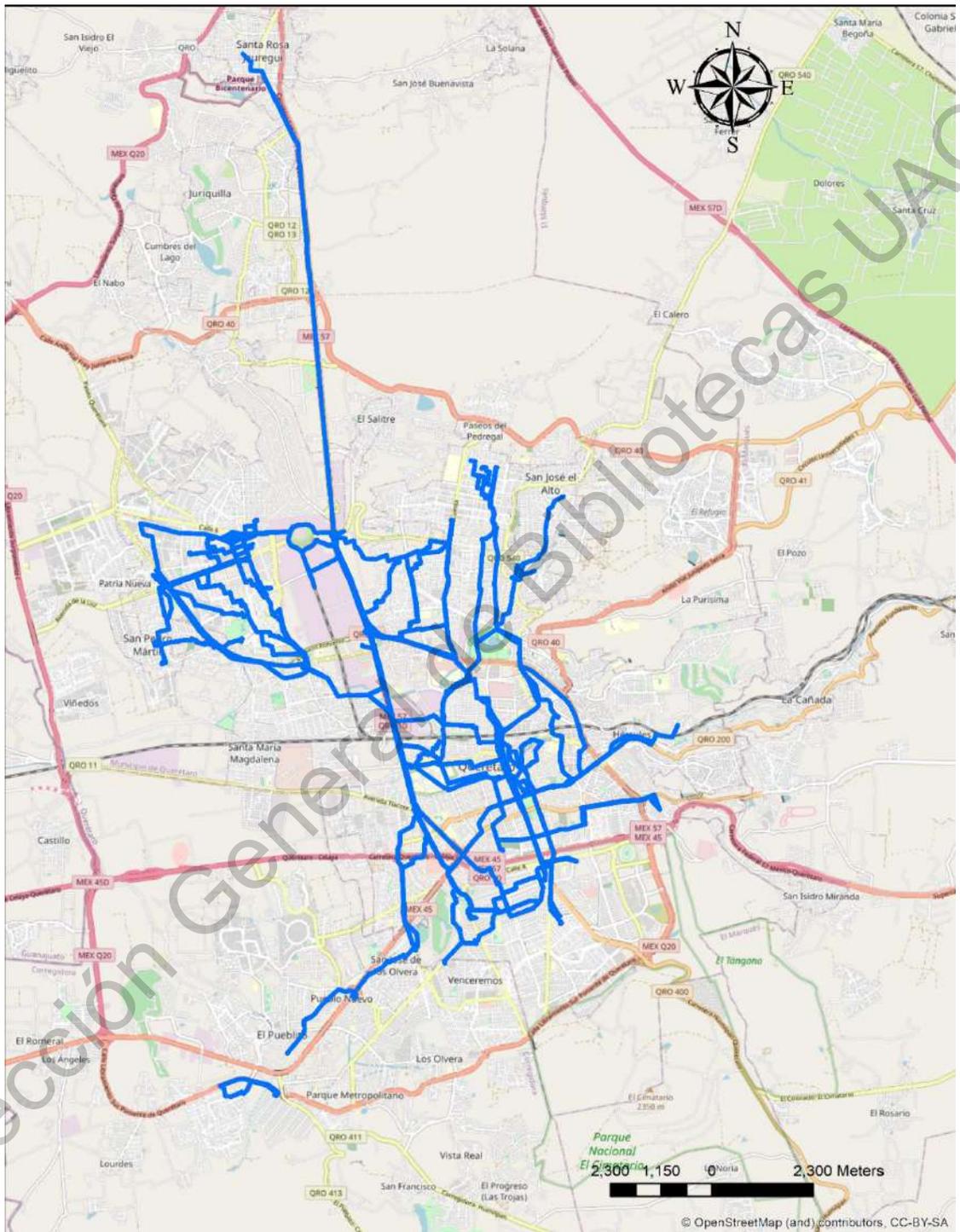
Anexo 5. Mapas de las redes de menor costo de las 25 generaciones generadas a partir del padre 2.



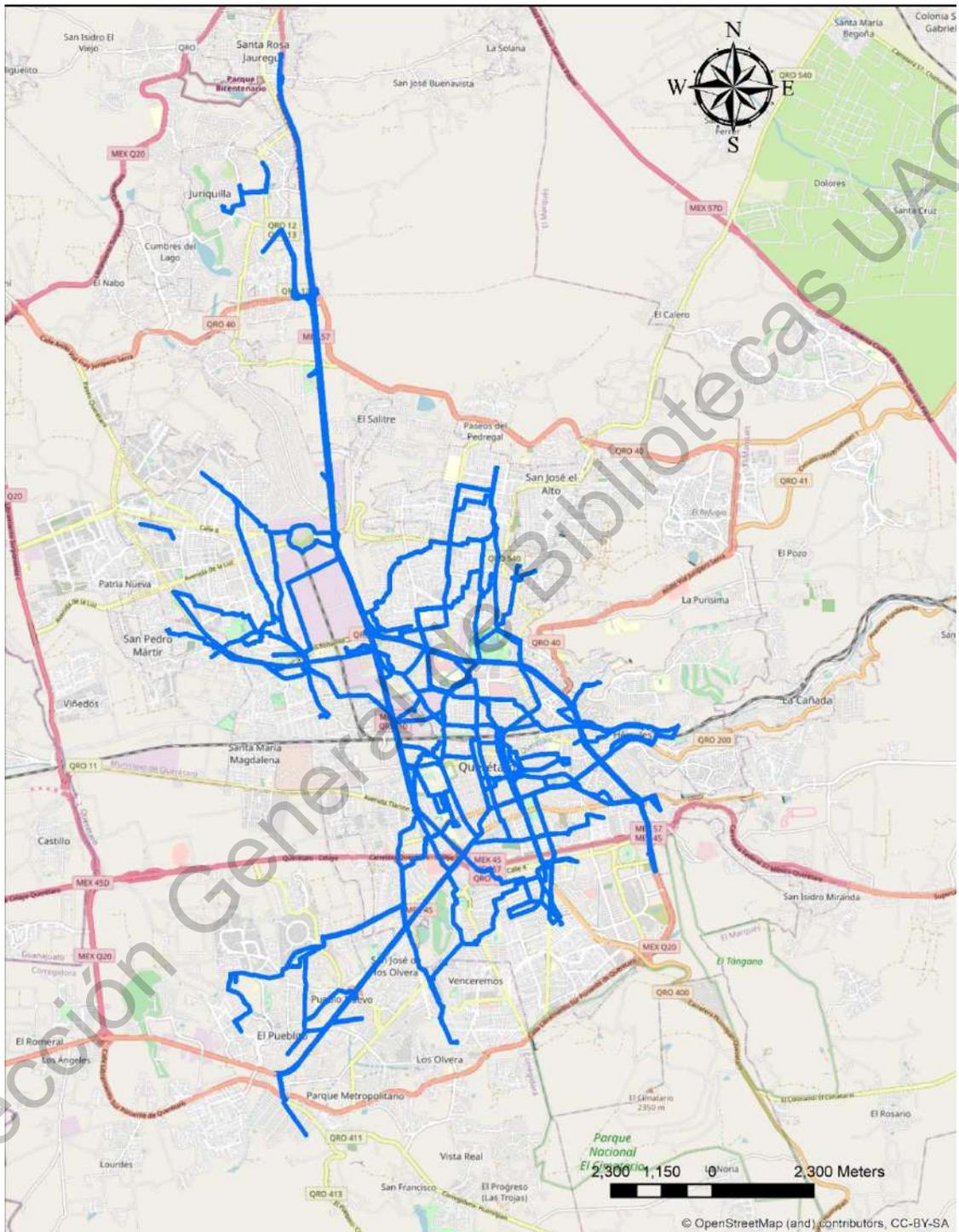
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 1.



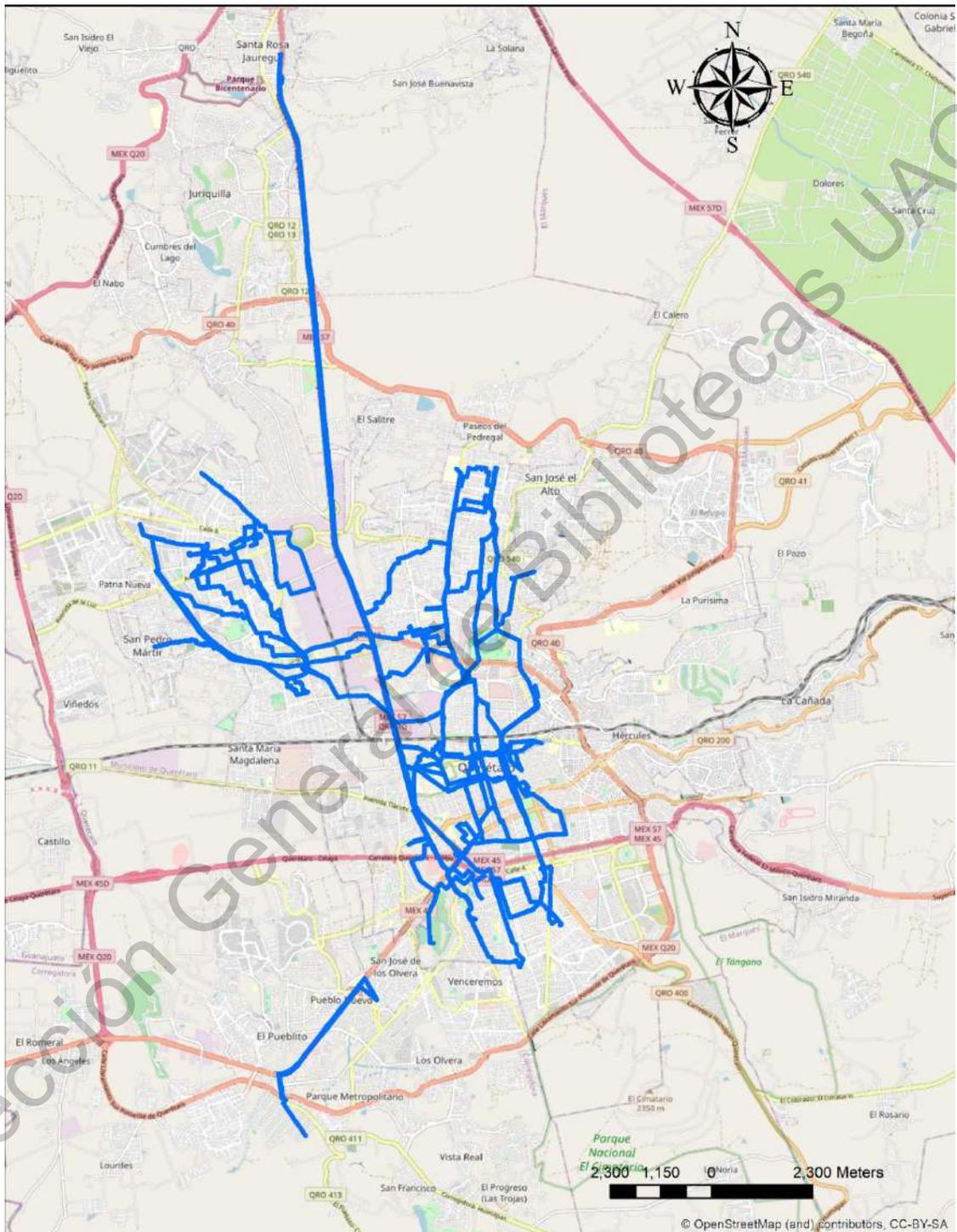
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 2.



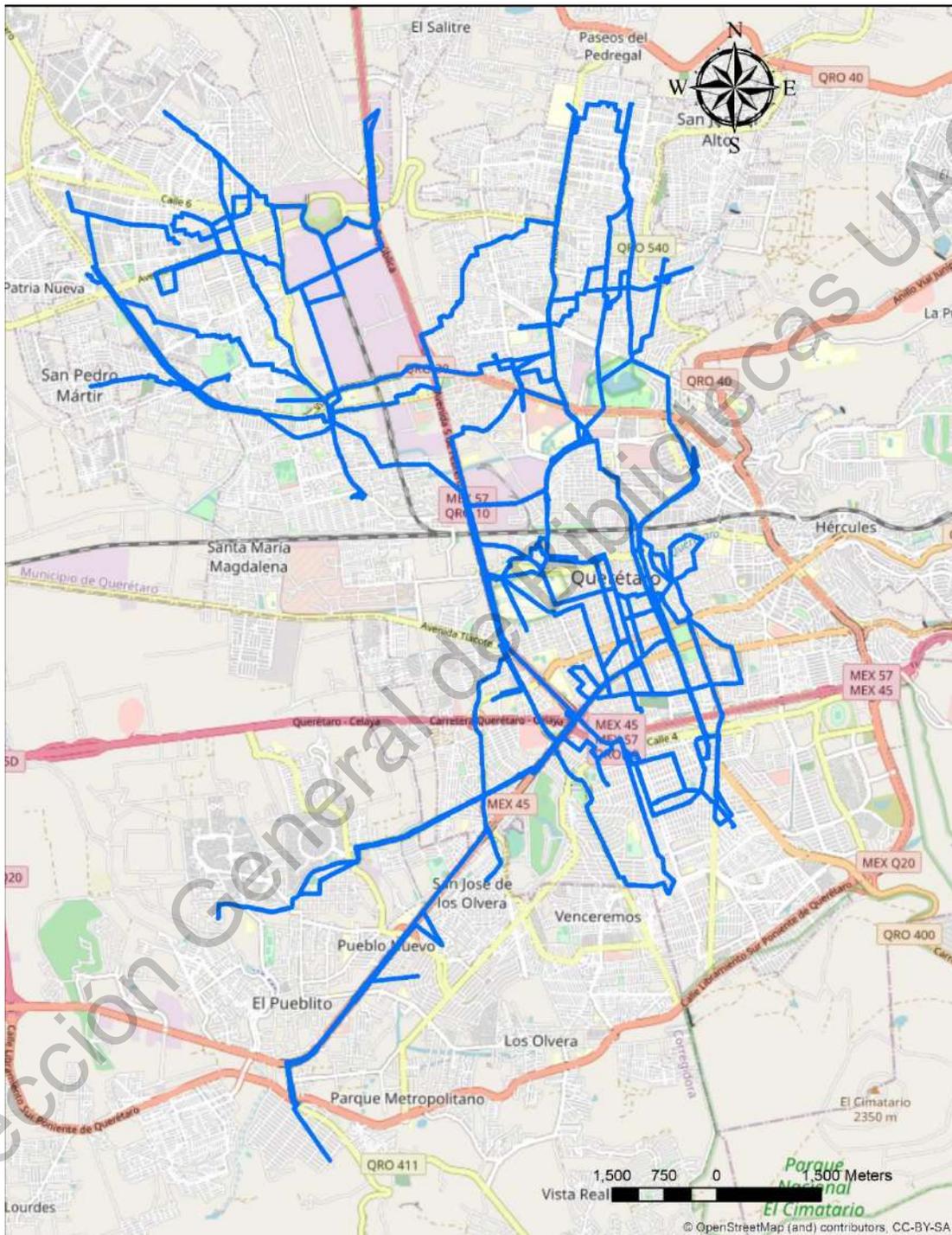
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 3.



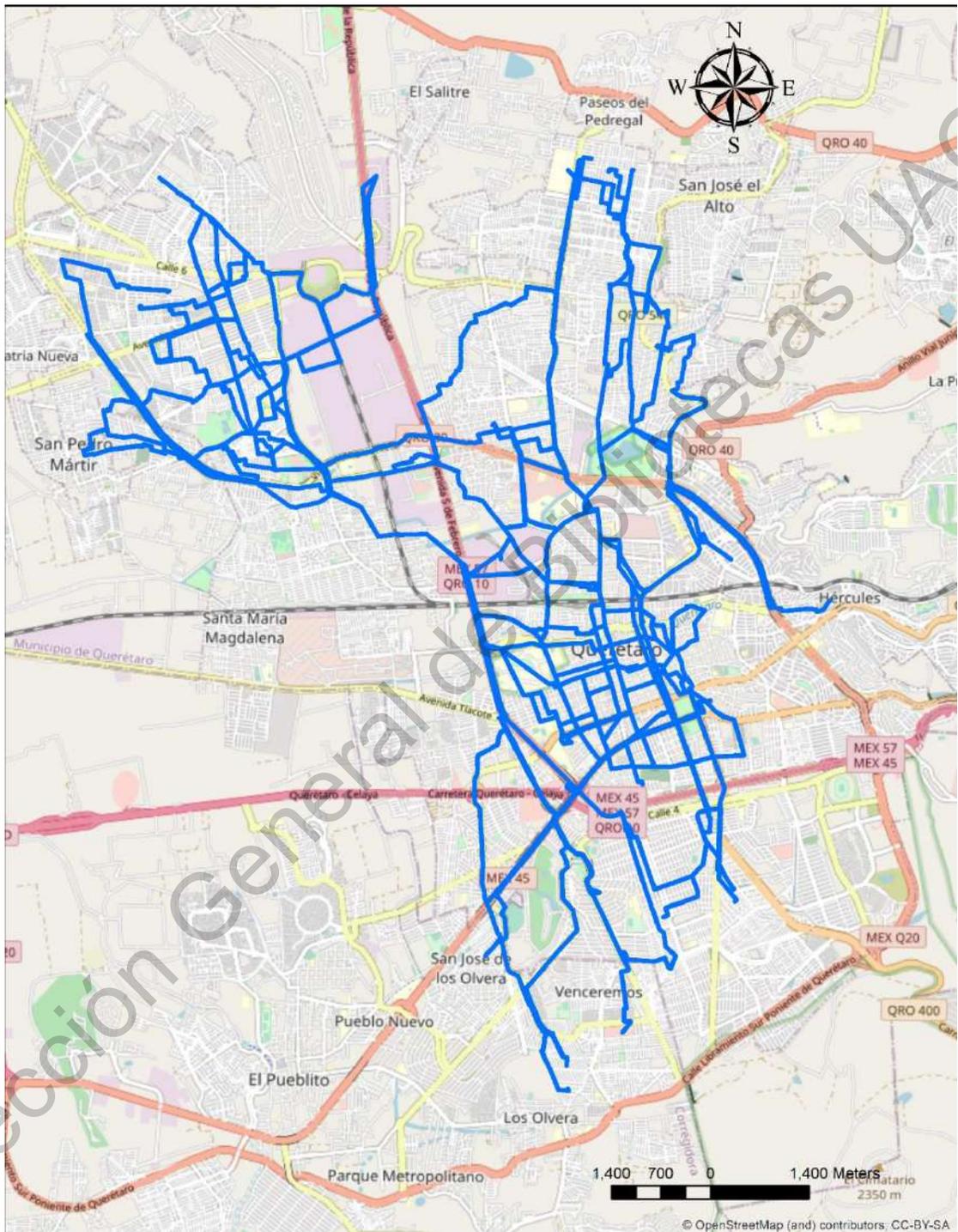
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 5.



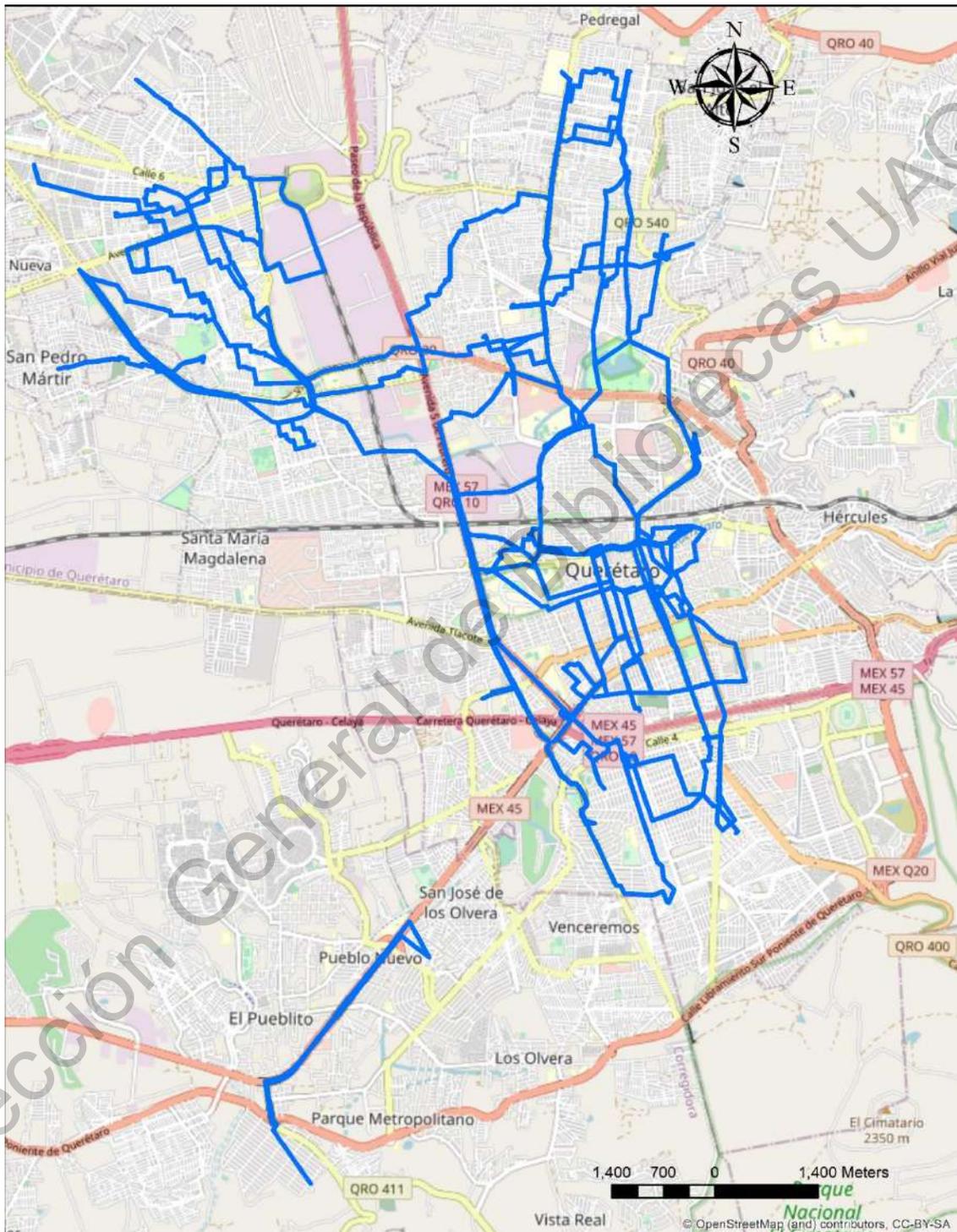
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 6.



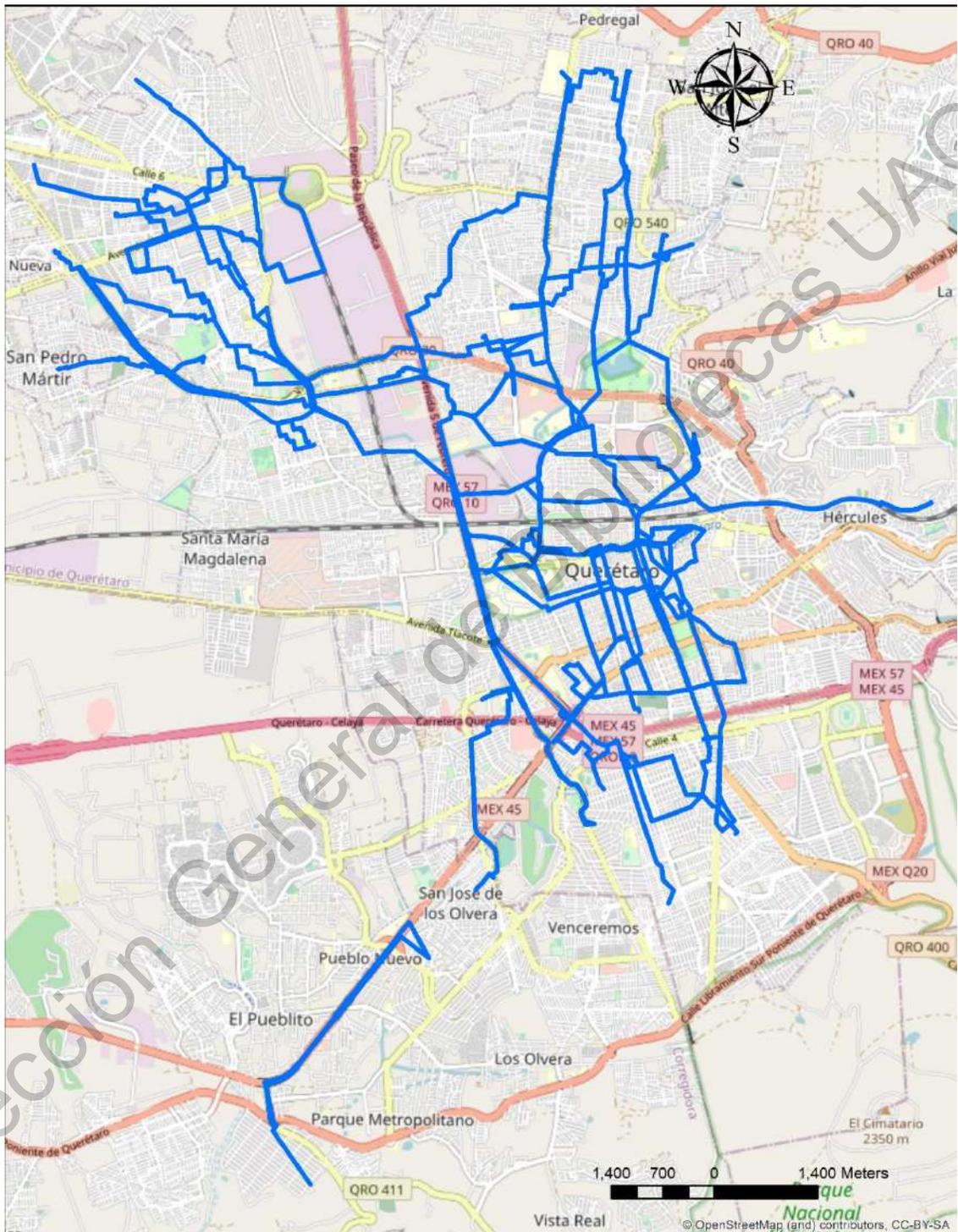
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 7.



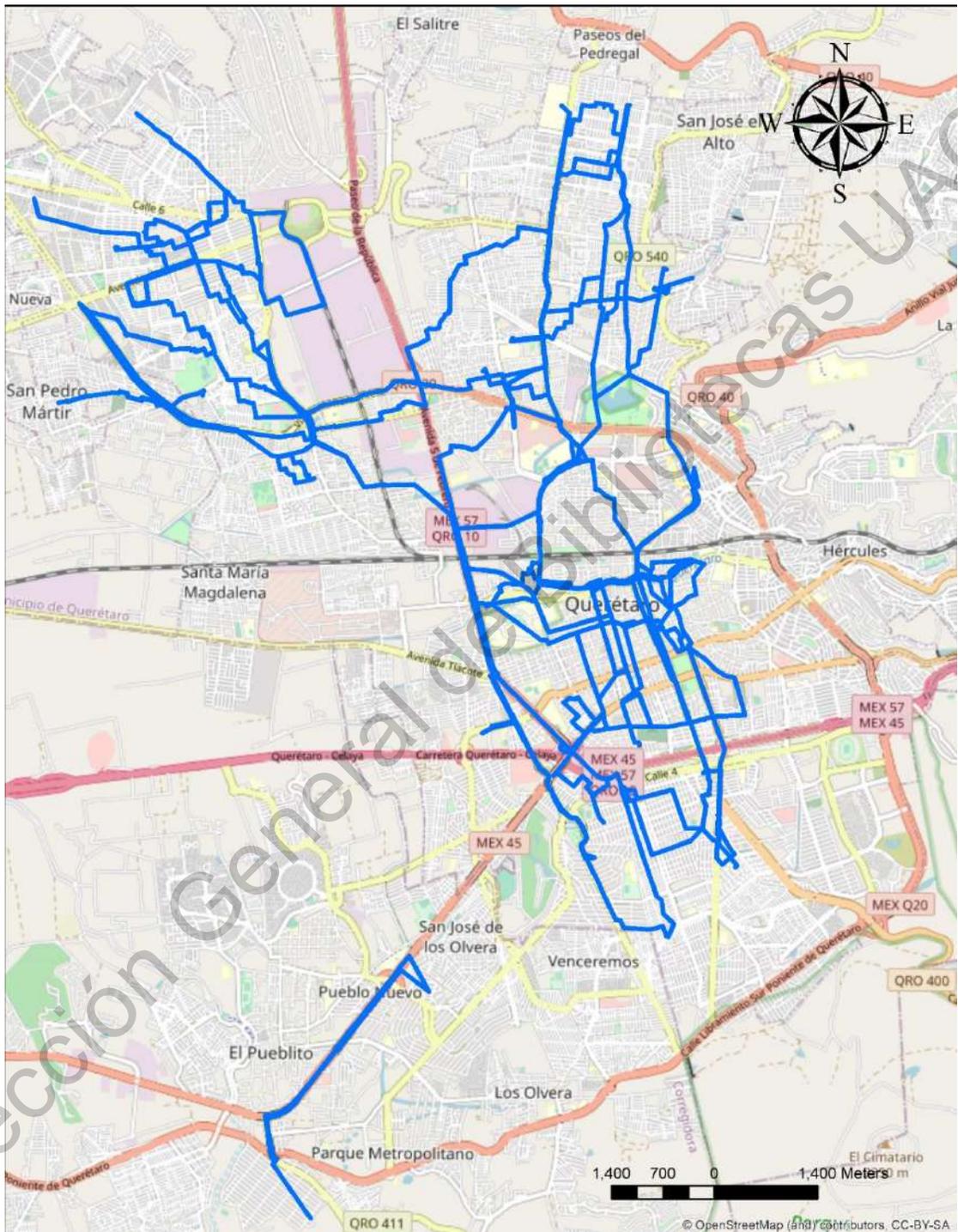
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 9.



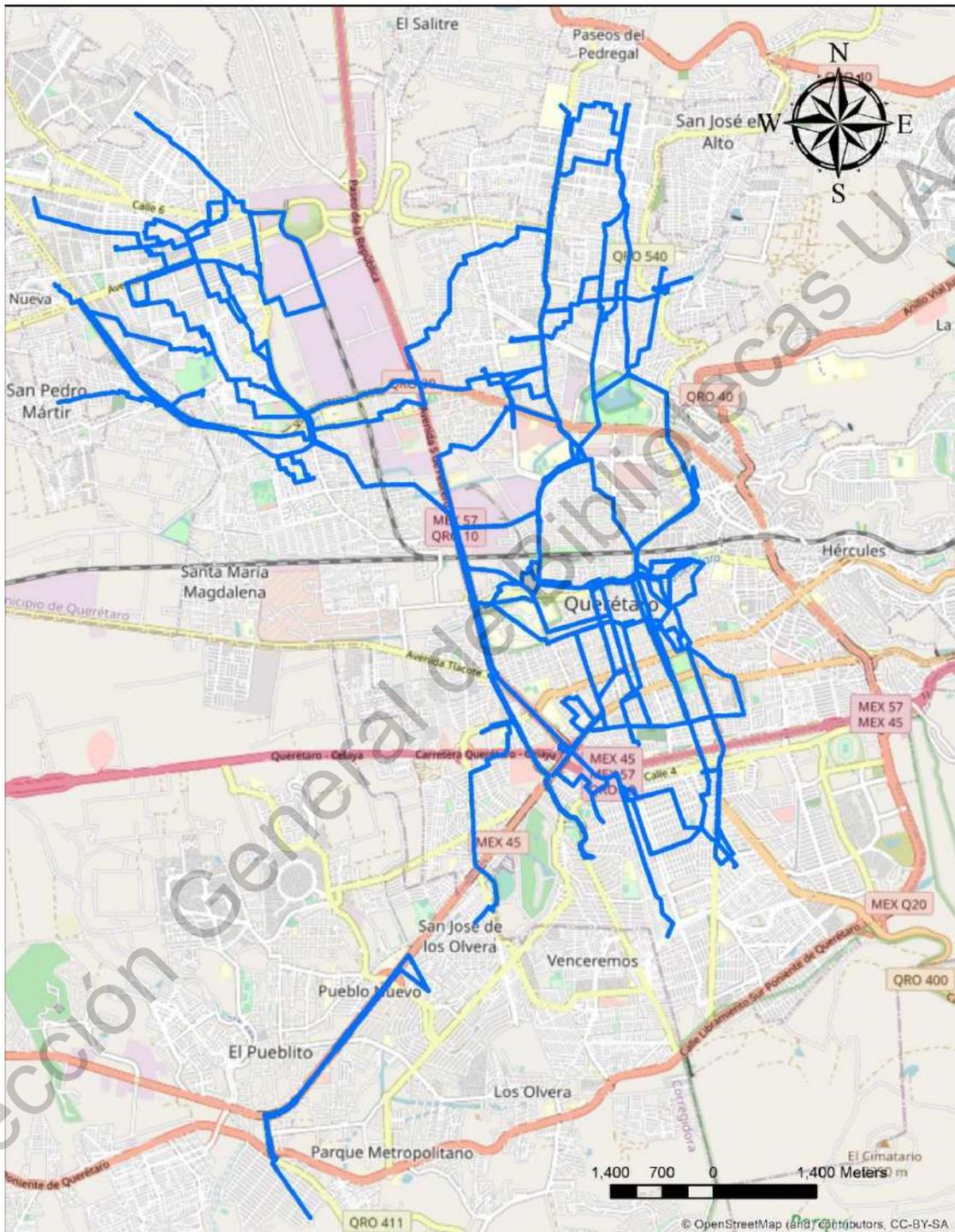
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 10.



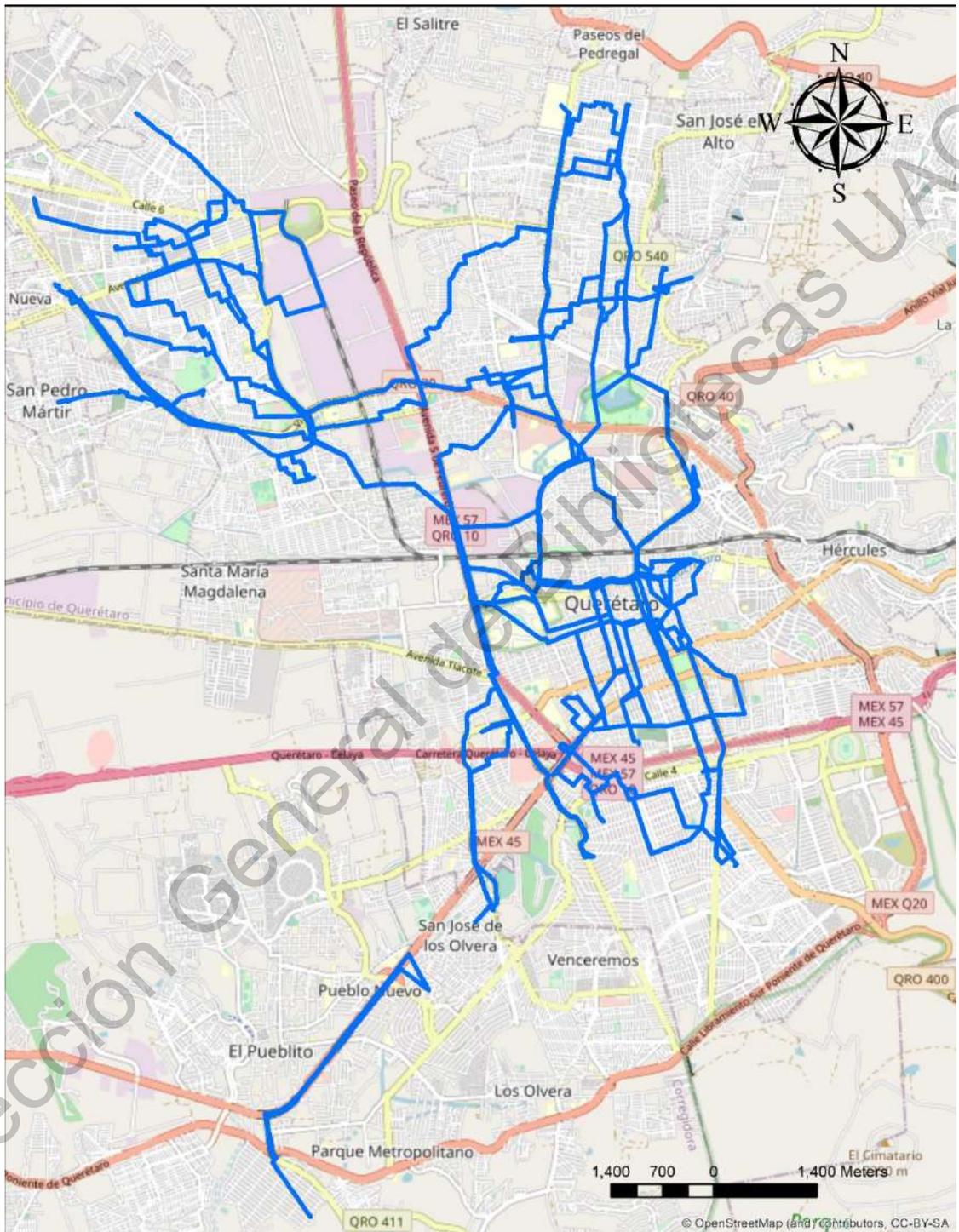
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 11.



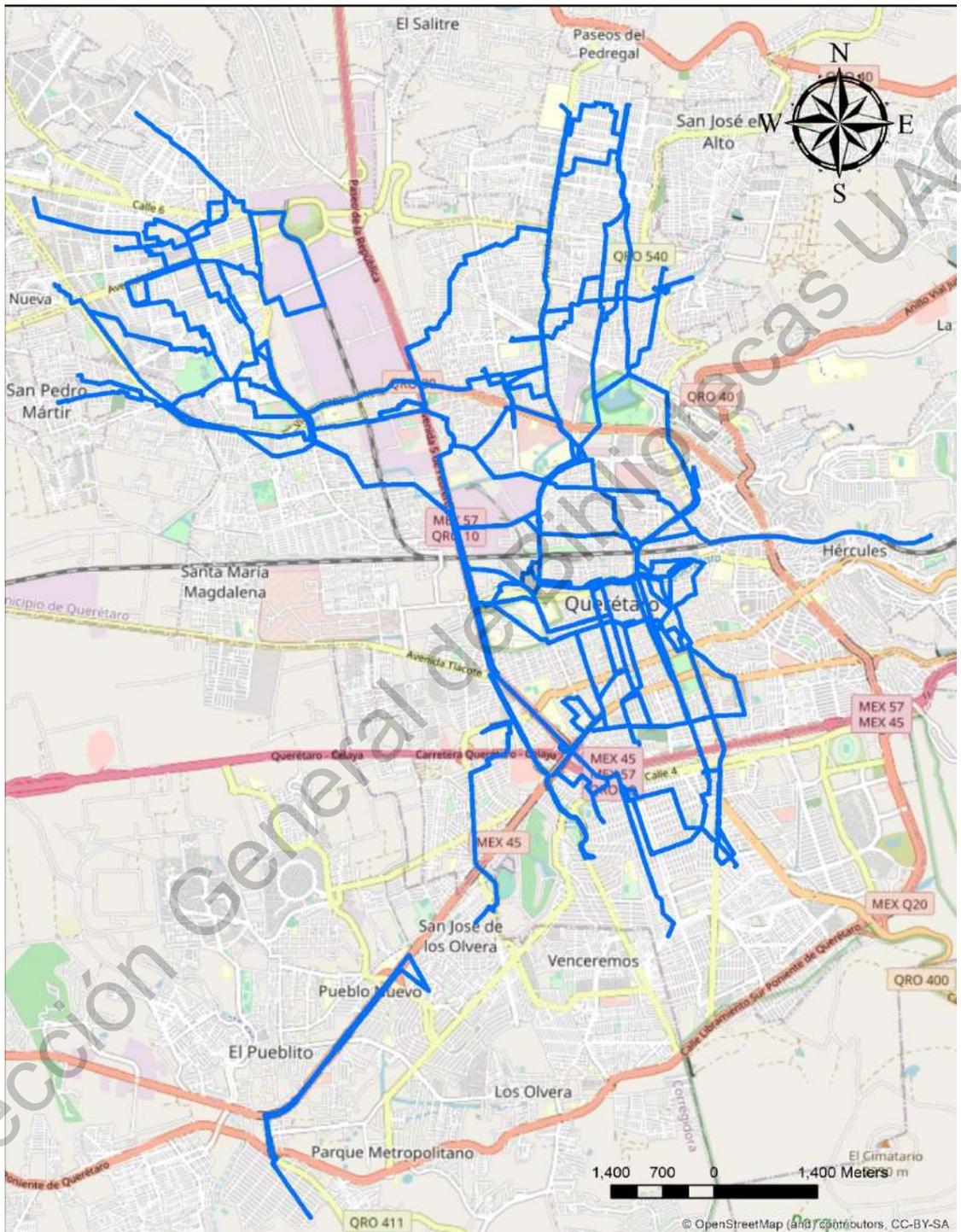
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 12.



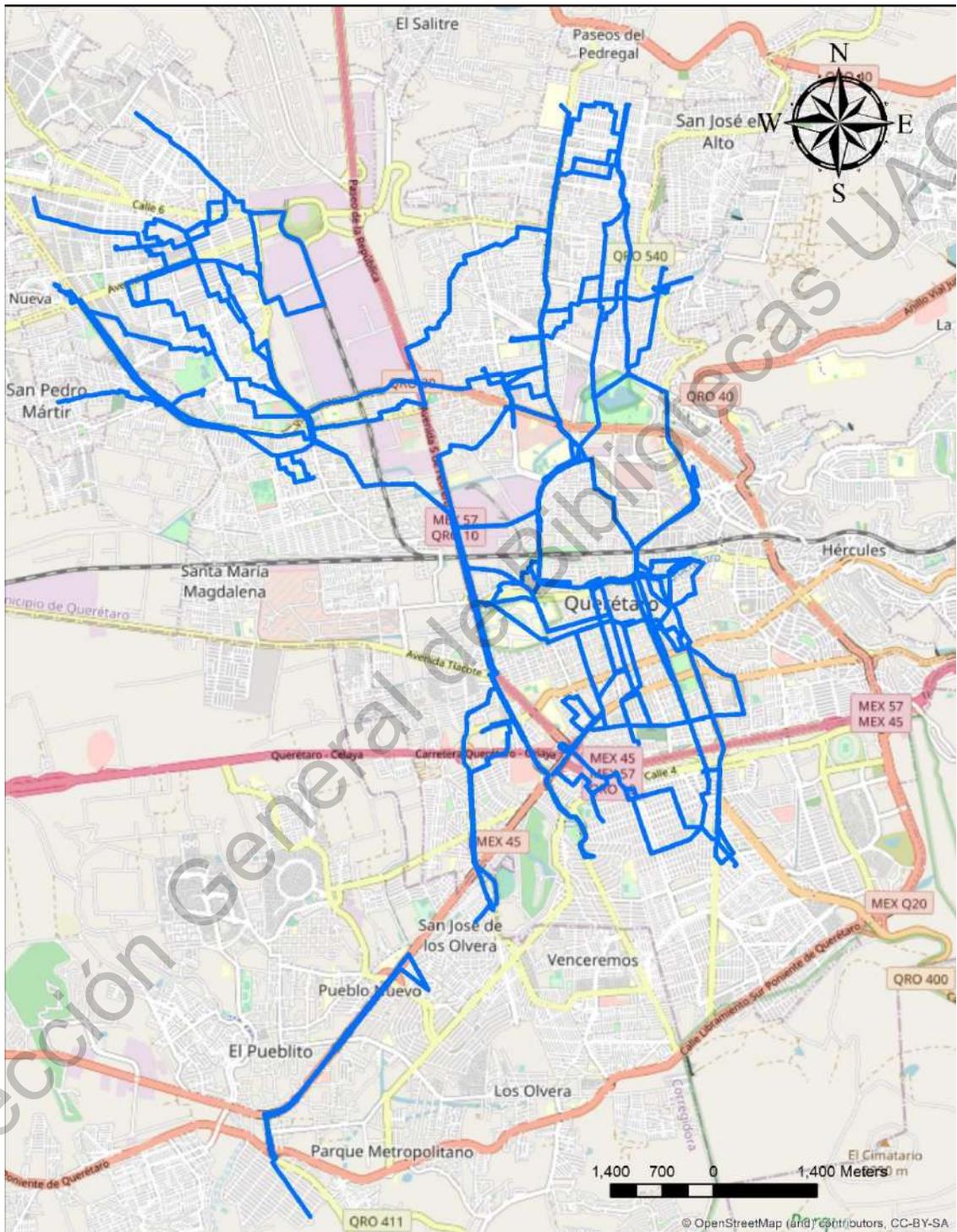
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 13.



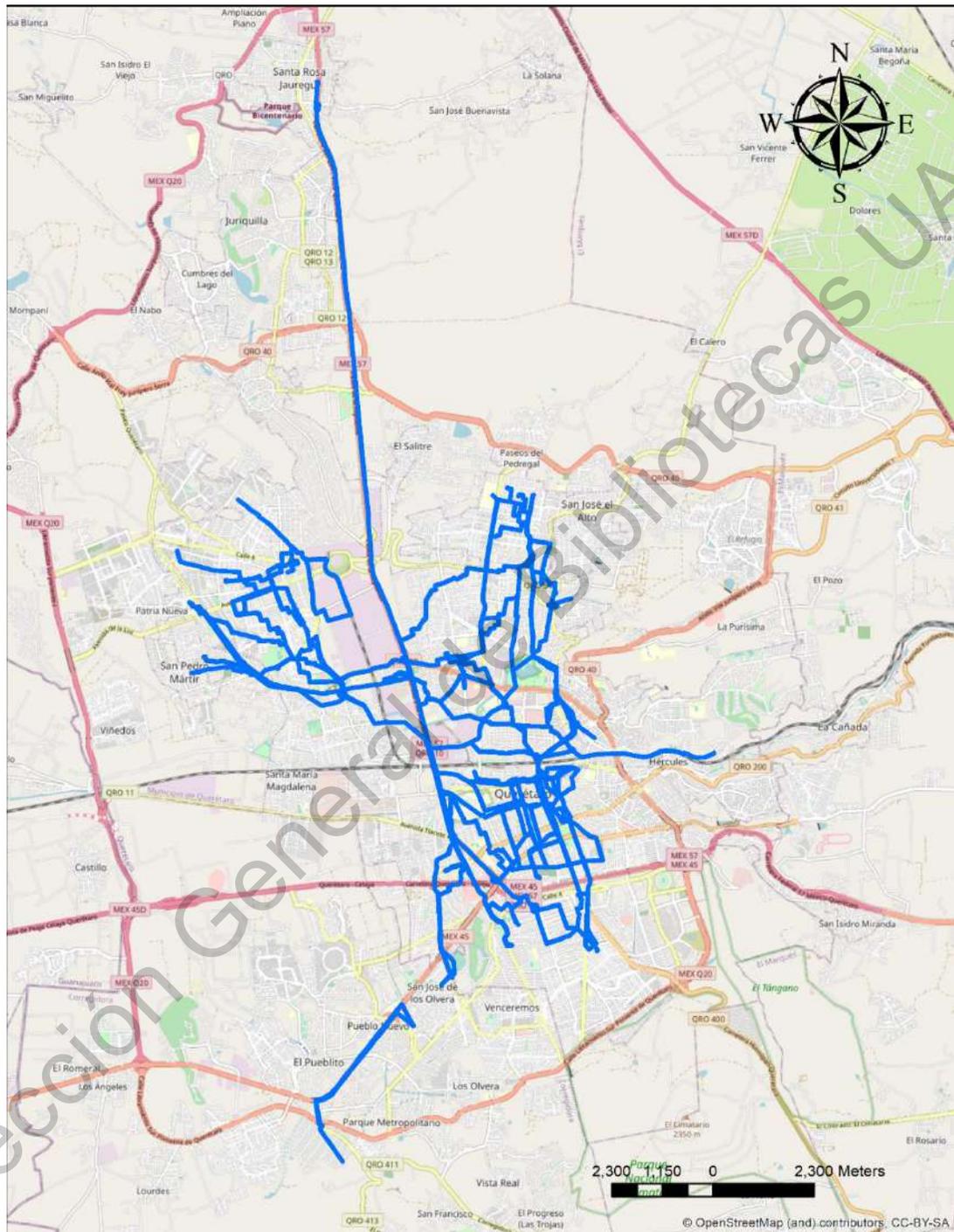
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 14.



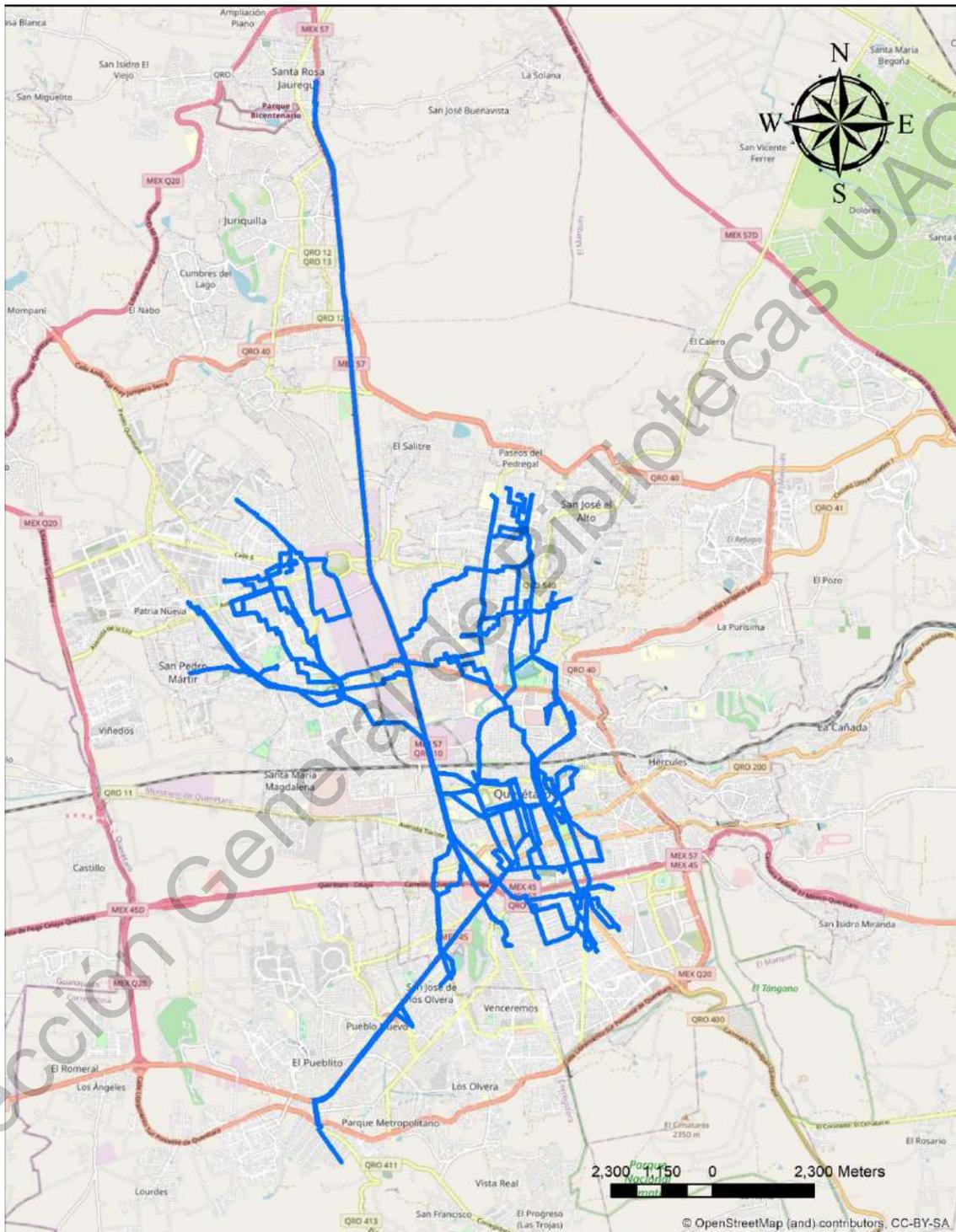
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 15.



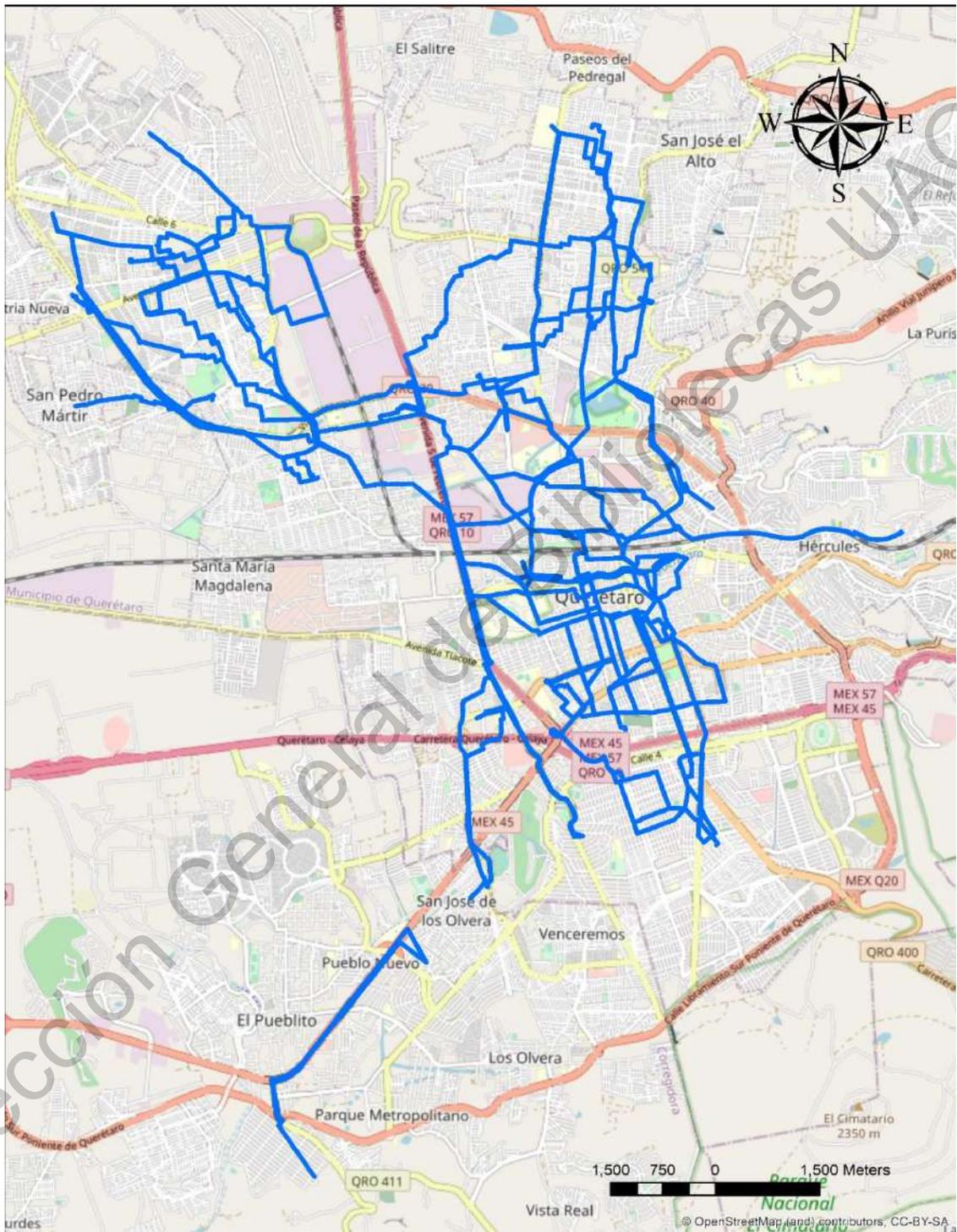
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 16.



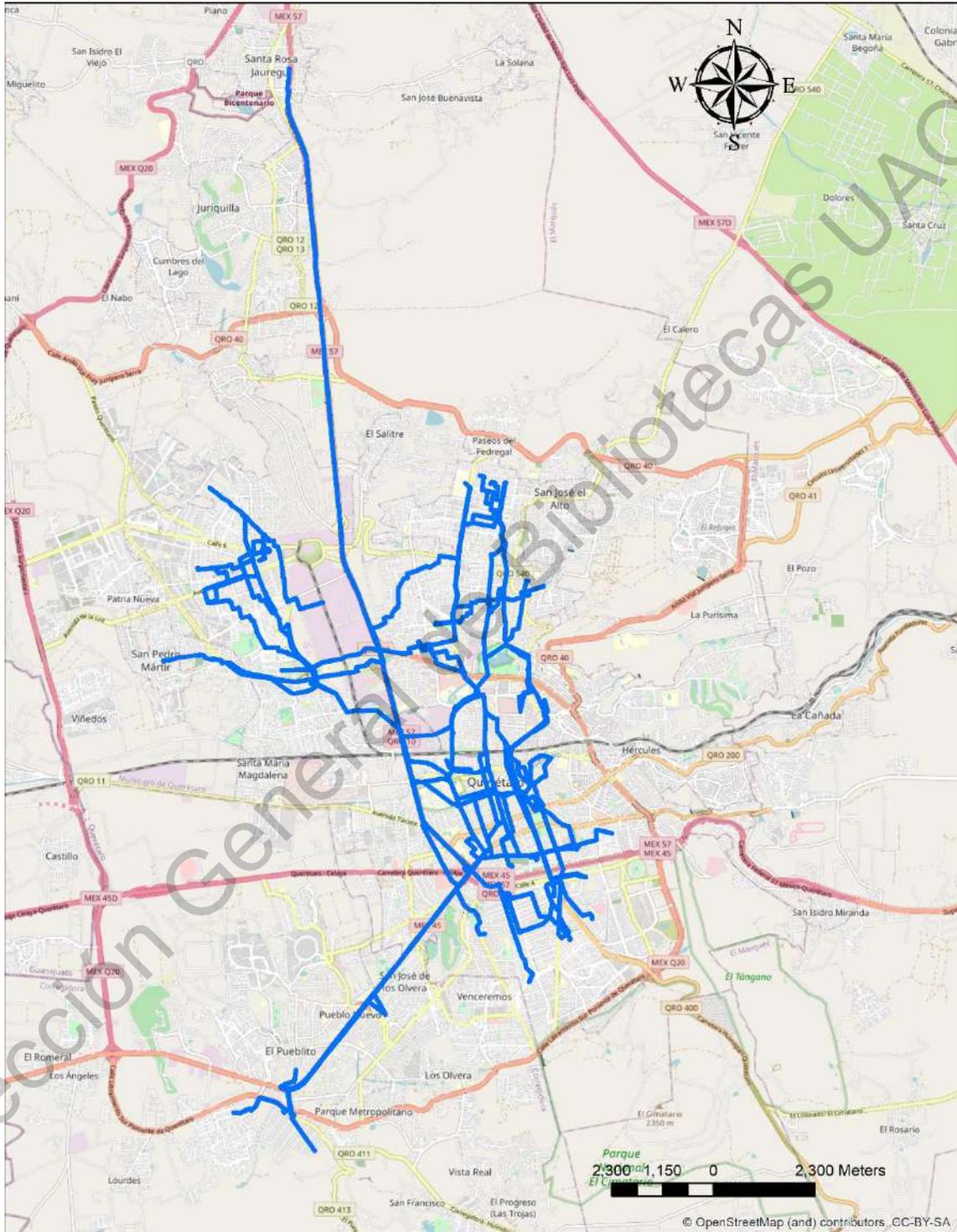
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 17.



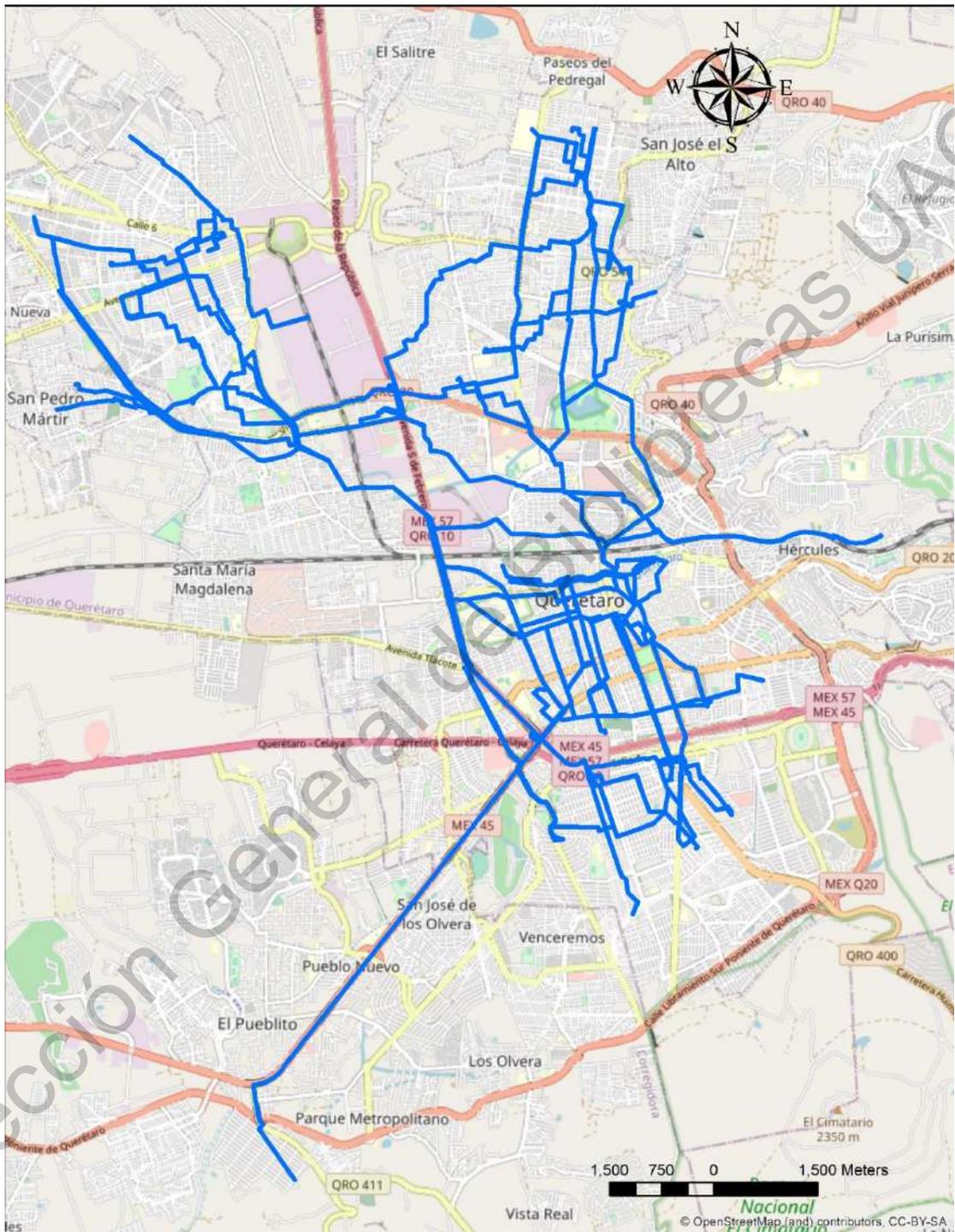
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 18.



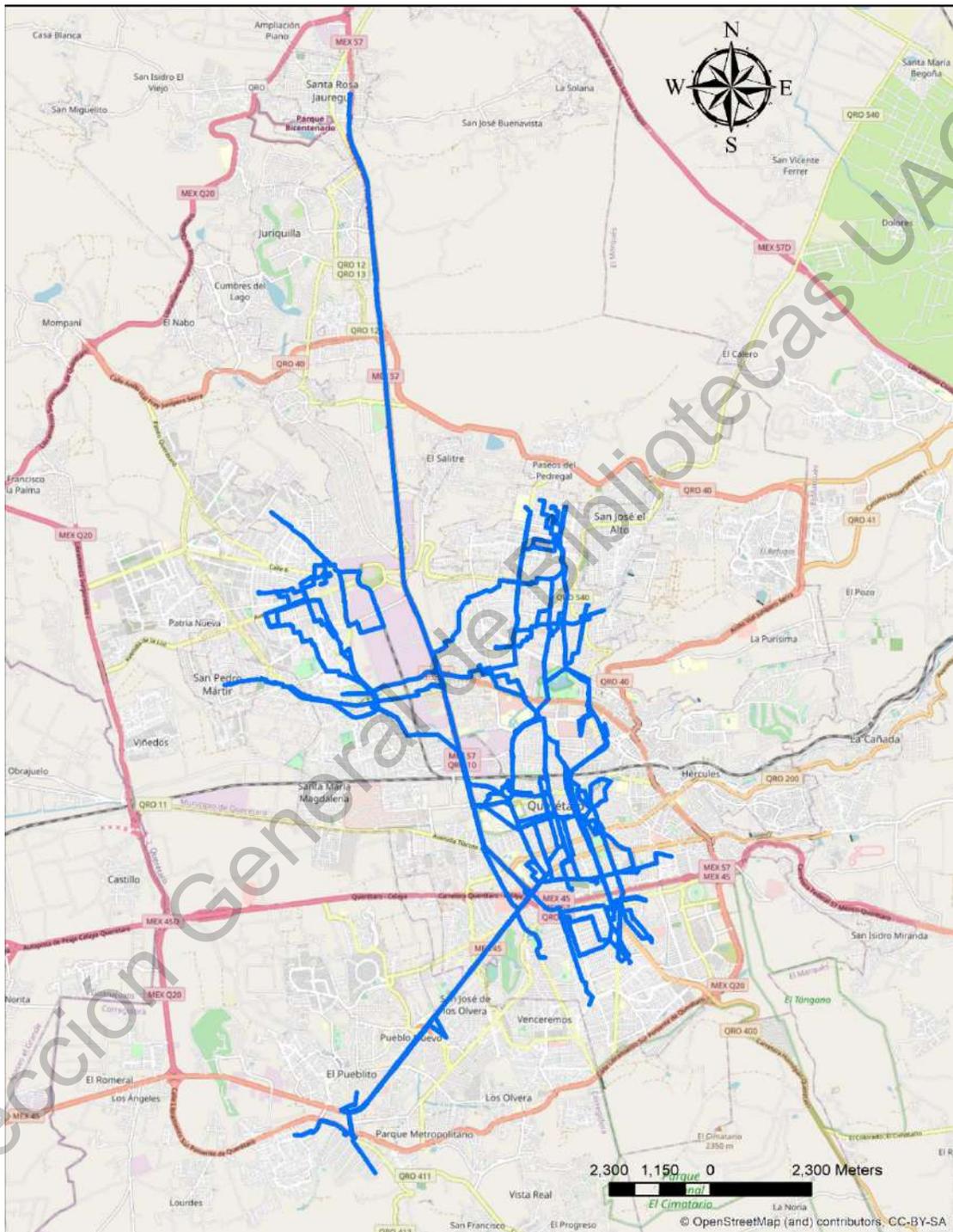
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 19.



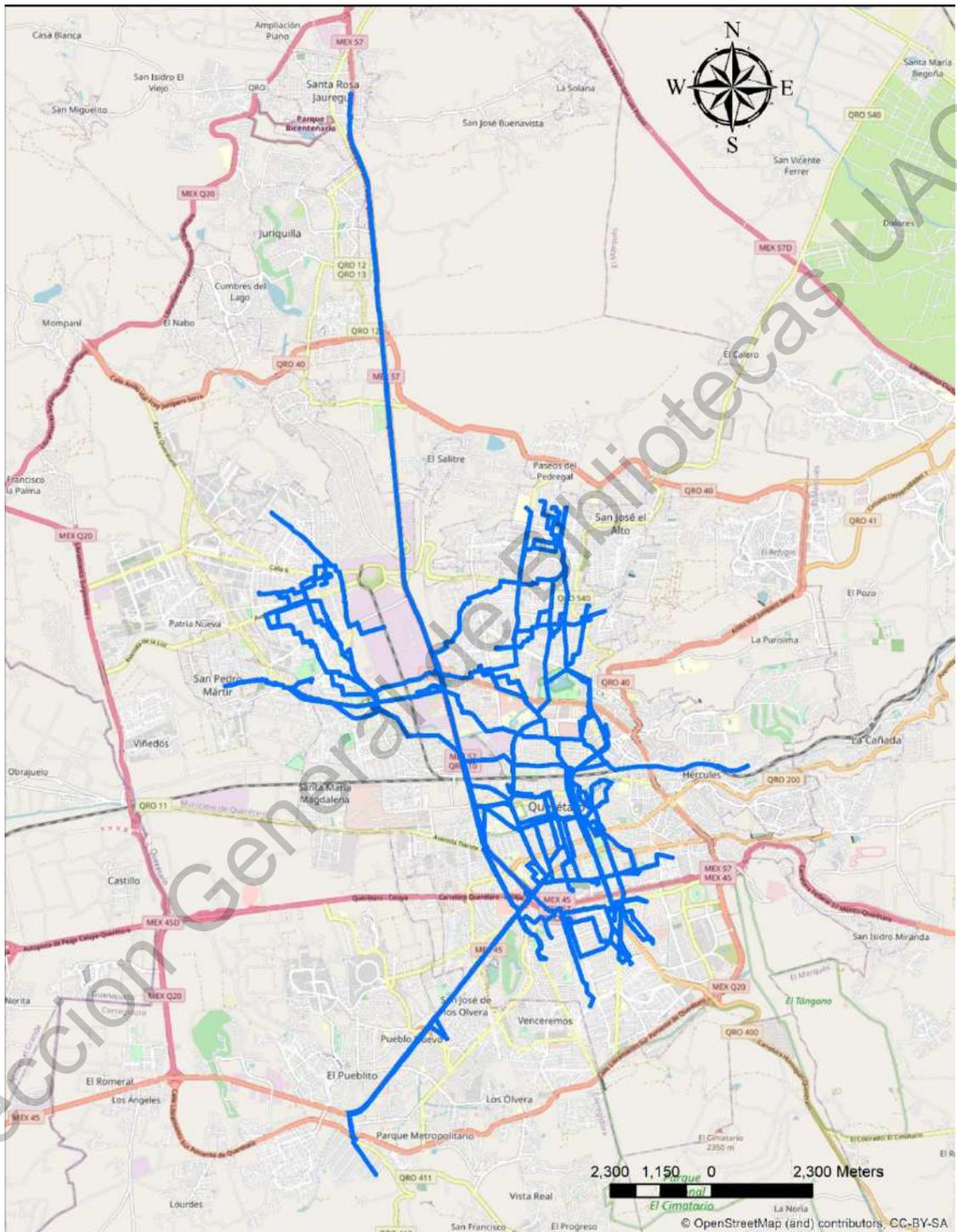
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 20.



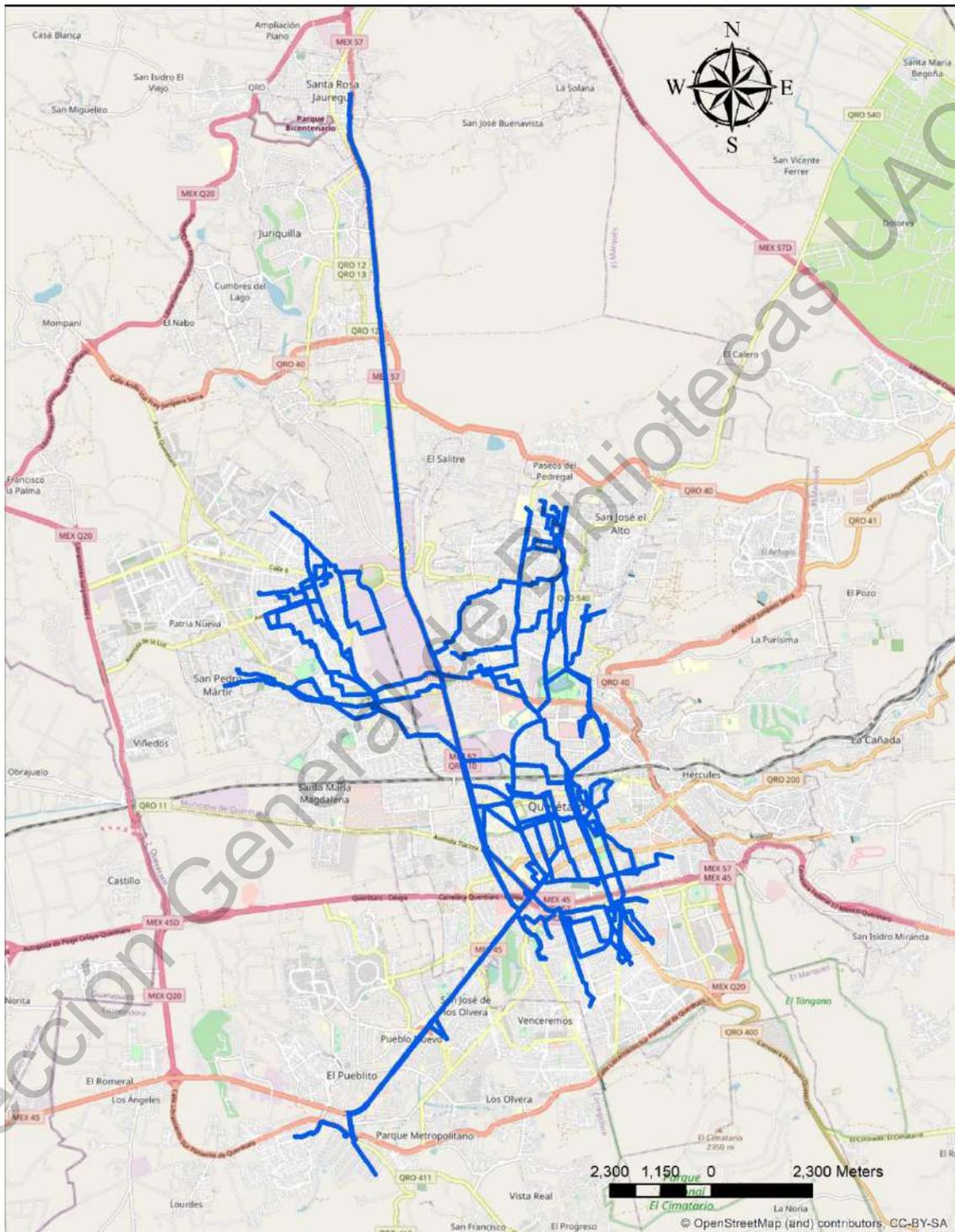
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 21.



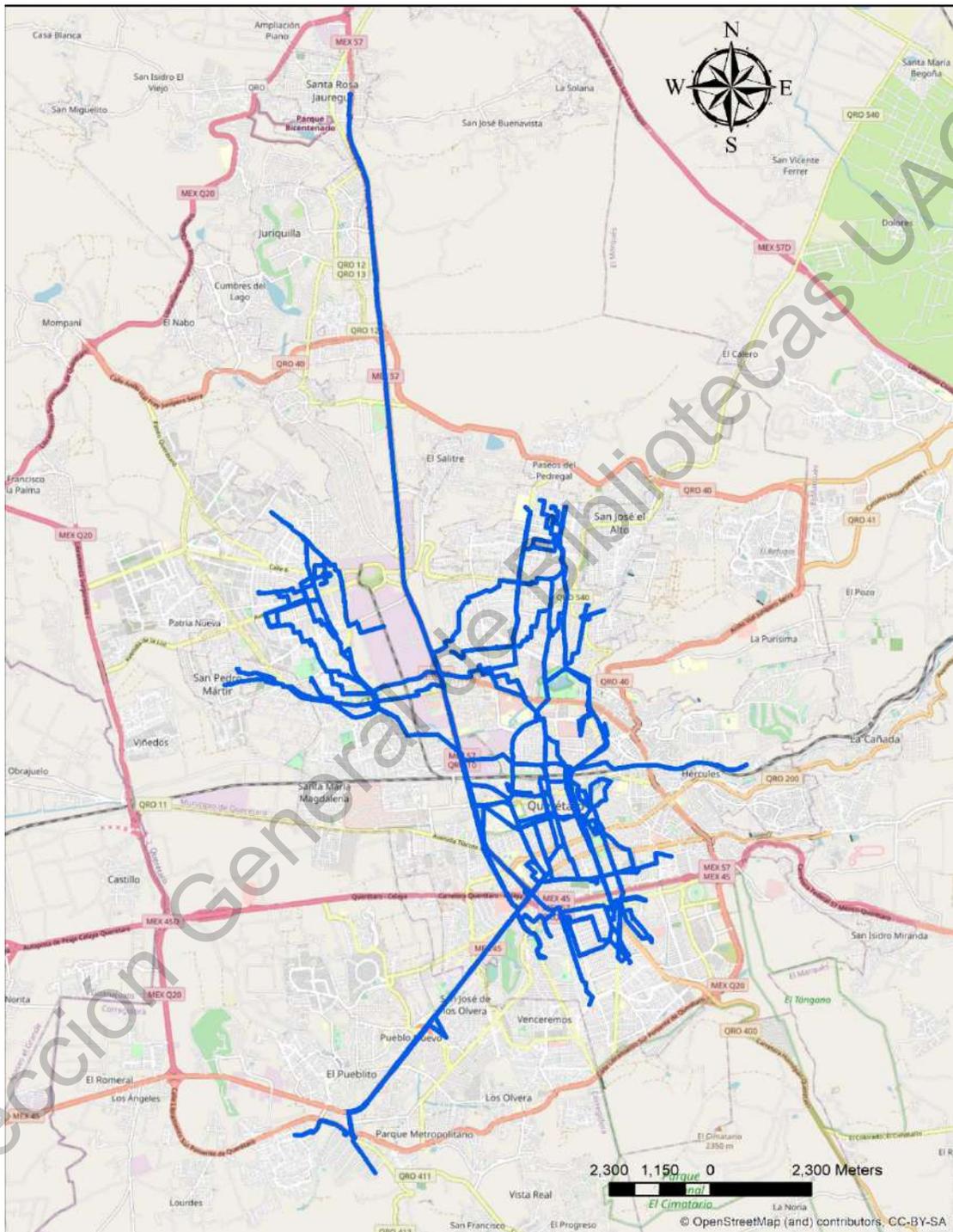
Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 22.



Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 23.



Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 24.



Líneas de transporte público de la red de menor costo generalizado generado a partir del padre 2 de la generación 25.