



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis de flujo de bicicletas  
públicas dentro del polígono  
Ecobici con un modelo de  
asignación todo o nada**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Diego Cejin Alcocer

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. David López Flores



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

## INDICE

RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
OBJETIVOS.....	7
1 MARCO TEÓRICO .....	8
1.1 TRABAJOS RELACIONADOS .....	8
1.2 CICLOVÍA.....	9
1.3 SISTEMA DE BICICLETAS COMPARTIDAS.....	10
1.4 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	10
1.5 QGIS.....	11
1.6 TRANSCAD .....	12
1.7 RED DE TRANSPORTE .....	12
1.8 ASIGNACIÓN TODO O NADA .....	13
1.8.1 EJEMPLO ASIGNACIÓN TODO O NADA .....	15
1.8.2 ASIGNACIÓN TODO NADA PARA BICICLETAS.....	17
1.9 AFORO DE TRÁNSITO .....	18
2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIOS .....	19
2.1 ECOBICI.....	19
2.2 DESCRIPCIÓN INFRAESTRUCTURA .....	19
2.3 DISTRIBUCIÓN POLÍGONO ECOBICI.....	21
2.4 EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	22
2.5 DATOS ESTADÍSTICOS .....	23
3 METODOLOGÍA .....	24
3.1 OBTENCIÓN DE DATOS.....	24
3.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE ASIGNACIÓN .....	29
3.3 ASIGNACIÓN .....	34
4 RESULTADOS .....	38
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	47
6 CONCLUSIÓN.....	59
7 REFERENCIAS .....	62

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de ciclovía (Fuente: Elaboración propia) .....	10
Figura 2. Logotipo oficial de QGIS (Fuente: qgis.org).....	11
Figura 3. Logotipo oficial de TransCAD (Fuente: caliper.com/transcad/) .....	12
Figura 4. Red de transporte de Sioux Falls (Fuente: Chen A. et al., 2012).....	13
Figura 5. Esquema de red carretera DF – Nuevo Laredo (Fuente: Moreno et al., 2014).....	16
Figura 6. Matriz origen-destino para red carretera DF - Nuevo Laredo (Fuente: Moreno et al., 2014).....	16
Figura 7. Rutas óptimas para matriz origen-destino (Fuente: Moreno et al., 2014) .....	16
Figura 8. Asignación de flujo todo o nada para ejemplo de red de carretera DF – Nuevo Laredo (Fuente: Moreno et al., 2014) .....	17
Figura 9. Contador manual de 4 dígitos PRETUL.....	18
Figura 10. Bicicletas Ecobici estacionadas en una cicloestación (Fuente: UnoTV) .....	19
Figura 11. Estacion 19 de Ecobici.....	20
Figura 12. Bicicleta Ecobici (Fuente: Ecobici.cdmx.gob.mx).....	20
Figura 13. Mapa de delimitación de polígono Ecobici 2022 .....	21
Figura 14. Evolución de bicicletas y estaciones Ecobici .....	22
Figura 15. Captura de pantalla de la sección donde se obtuvieron las bases de datos Ecobici....	24
Figura 16. Base de datos de viajes ECOBICI para el mes de septiembre (Programa Excel, Office, 2021).....	25
Figura 17. Base de datos con los datos segmentados para jueves de 7 a 10 am (Programa Excel, Office, 2021).....	25
Figura 18. Tabla generada para contabilizar estaciones con más entradas y salidas por estación en jueves de 7 a 10 am (Programa Excel, Office, 2021) .....	26
Tabla 1. Comparación de arribos y retiros en la base de datos y los aforados manualmente para la estación 19 .....	27
Tabla 2. Comparación de arribos y retiros en la base de datos y los aforados manualmente para la estación 81 .....	27
Figura 19. Tabla origen-destino-flujo para jueves de 7 a 10 am (Programa Excel, Office, 2021)..	28
Figura 20. Tabla origen-destino para jueves de 6 a 8 pm (Programa Excel, Office, 2021 .....	28
Figura 21. Captura de pantalla de la página web donde se descargaron los datos georreferenciados (Programa QGIS 3.28).....	29

Figura 22. Captura del mapa de la CDMX con la capa de cicloestaciones sobrepuesta (Programa QGIS 3.28) .....	29
Figura 23. Captura de sección de menú en donde se realizó el recorte del polígono (Programa QGIS 3.28) .....	30
Figura 24. Captura de mapa de polígono Ecobici con zona a recortar resaltada (Programa QGIS 3.28) .....	30
Figura 25. Captura de menú donde se generó el proyecto apartir del mapa recortado (Programa QGIS 3.28) .....	31
Figura 26. Captura de mapa de polígono Ecobici recortado y listo para exportar (Programa QGIS 3.28) .....	31
Figura 27. Polígono Ecobici con cicloestaciones sobre puestas (Programa: TransCAD 4.5).....	32
Figura 28. Captura del menú donde se revisó la conectividad de la red (Programa: TransCAD 4.5) .....	33
Figura 29. Polígono Ecobici con cicloestaciones asignadas a los nodos y listo para asignación. (Programa: TransCAD 4.5) .....	33
Figura 30. Menú utilizado para crear la matriz de tiempos mínimos. (Programa TransCAD 4.5) .	34
Figura 31. Matriz de tiempos mínimos de traslado entre nodos con cicloestación asignada (Programa: TransCAD 4.5) .....	34
Figura 32. Captura de matriz de flujo entre cicloestaciones para un jueves de 7 a 10 am (Programa TransCAD 4.5) .....	35
Figura 33. Captura de menús para realizar la asignación todo o nada (Programa TransCAD 4.5)	36
Figura 34. Captura de resultado de asignación todo nada para un jueves de 7 a 10 am señalando el flujo total en cada calle (Programa TransCAD 4.5) .....	36
Figura 35. Captura muestra de un mapa de resultado de flujo. (Programa TransCAD 4.5).....	37
Figura 36. Asignación todo o nada para jueves de 7 a 10 am .....	39
Figura 37. Sección de Avenida Insurgentes sur.....	40
Figura 38. Asignación todo o nada para jueves de 1 a 4 pm.....	41
Figura 39. Sección de Avenida División del Norte en cruce con Avenida Insurgentes .....	42
Figura 40. Asignación todo o nada para jueves de 6 a 8 pm.....	43
Figura 41. Sección de Avenida Cuauhtémoc en cruce con Viaducto Pte. M. Alemán .....	44
Figura 42. Asignación todo o nada para sábado de 12 a 3 pm .....	45
Figura 43. Sección de Colonia Centro con Calle Artículo 123 marcada en rojo.....	46
Figura 44. Mapa con sección sureste resaltada .....	47

Figura 45. Sección aforada de Avenida Cuauhtémoc (Fuente: OpenStreetMaps) .....	48
Figura 46. Sección aforada de Avenida Horacio (Fuente: OpenStreetMaps) .....	49
Figura 47. Sección aforada de Avenida Insurgentes (Fuente: OpenStreetMaps) .....	49
Figura 48. Sección aforada de Avenida División del Norte (Fuente: OpenStreetMaps) .....	50
Figura 49. Sección aforada de Calle Artículo 123 (Fuente: OpenStreetMaps) .....	50
Tabla 3. Aforo manual de bicicletas en Avenidas seleccionadas .....	51
Figura 50. Sección de ciclovía en avenida insurgentes sur dirección sur-norte .....	53
Figura 51. Avenida Insurgentes sur en la colonia Roma Sur .....	53
Figura 52. Sección de ciclovía en Av. Horacio en la colonia Polanco .....	54
Figura 53. Sección de ciclovía en Avenida división del Norte en la colonia Del Valle.....	54
Figura 54. Ciclovía en Avenida Juárez en la colonia Centro .....	55
Figura 55. Ciclovía en Eje Central en la colonia Centro .....	55
Figura 56. Calle Artículo 123 en la colonia Centro .....	56
Figura 57. Ciclovía en calle Independencia en la colonia Centro .....	56
Figura 58. Eje 1 en la colonia Centro .....	57
Figura 59. Avenida Cuauhtémoc cruce con Viaducto Pte. M. Alemán .....	58
Figura 60. Avenida Cuauhtémoc colonia Roma Sur .....	58

## RESUMEN

En la actualidad, la bicicleta es un modo de transporte relevante y su crecimiento como sistema se mantiene en aumento. El sistema de bicicletas públicas que opera en la Ciudad de México tiene el nombre de *Ecobici*, y aunque existe investigación vasta sobre el uso de bicicletas en México, no existe una gran cantidad para el caso del sistema *Ecobici*. Investigaciones centradas en este sistema son de suma relevancia para la planeación de su crecimiento.

Este trabajo se centra en construir un modelo de asignación de flujo de bicicletas usando el software TransCAD y la asignación de tránsito todo o nada. La asignación todo o nada presentada en este trabajo consiste en asignar todo el flujo que va desde un origen a un destino a la ruta más rápida. Esta asignación se seleccionó debido a que las bicicletas no se ven afectadas por la congestión y los ciclistas pueden circular casi por cualquier vía.

Uno de los resultados del modelo son mapas de flujo ciclista en el polígono *Ecobici*. Donde se puede observar la cantidad de bicicletas que circulan por cada vía según el horario. Este modelo de flujo sirve para analizar el comportamiento del sistema y poder hacer una evaluación de la infraestructura ciclista en las zonas de mayor demanda.

Las conclusiones de este trabajo muestran que algunas de las calles y avenidas de mayor demanda ciclista no cuentan con una infraestructura óptima. Así mismo, se llega al planteamiento de expandir el sistema *Ecobici* hacia el este de la Ciudad de México.

Como limitantes del estudio se presenta el asumir que los usuarios únicamente toman en cuenta la distancia para la elección de rutas en sus trayectos y dejan fuera factores como calidad/existencia de ciclovía, seguridad y pendiente.

## INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de México, la bicicleta es un modo de transporte que ha adquirido relevancia debido a su sustentabilidad, practicidad, bajo costo y beneficios para la salud. La infraestructura ciclista en la Ciudad de México se compone de una red de 206.3 km de ciclovías distribuidas por toda la ciudad y 10 biciestacionamientos masivos que se encuentran en los Centro de Transferencia Modal (CETRAM) con mayor demanda (Ecobici, 2022). La infraestructura ciclista de la Ciudad de México cada vez tiene mayor alcance.

Al sistema de bicicletas compartidas en la Ciudad de México se le denomina *Ecobici* y para el 2023 contaba con 9300 bicicletas distribuidas en 687 estacionamientos denominados cicloestaciones. *Ecobici* comenzó a operar en 2010 con el funcionamiento de 1114 bicicletas y 85 cicloestaciones en las colonias Cuauhtémoc, Juárez, Roma Norte, Hipódromo Condesa y Condesa

En los últimos años se han propuesto investigaciones enfocadas al estudio del sistema de bicicletas dentro de la Ciudad de México y el uso de *Ecobici*. (Márquez et al., 2021; Moncayo, 2020; Martínez et al., 2022; Pérez, 2013). Dichas investigaciones resultan sumamente necesarias ya que el sistema de bicicletas se encuentra en crecimiento. Estas investigaciones proporcionan una dirección de desarrollo para el sistema de bicicletas, tanto en el crecimiento de los sistemas de bicicletas compartidas como en el desarrollo y mejora de la infraestructura ciclista.

Este estudio se enfoca en analizar el flujo de bicicletas dentro del polígono *Ecobici* de la Ciudad de México mediante el uso de la asignación de tránsito 'todo o nada'. La asignación es únicamente usando los viajes de las bicicletas *Ecobici* y se dejan fuera los viajes de bicicletas privadas. La razón detrás de esta exclusión radica en que los datos de viajes en bicicletas privadas ofrecen un nivel de detalle basado en zonas de origen y destino, mientras que los datos de *Ecobici* se centran en puntos específicos, es decir, las cicloestaciones.

Hasta donde se sabe, esta investigación constituye un enfoque original, ya que no se han encontrado trabajos previos que estimen el flujo de bicicletas *Ecobici* utilizando el método de asignación 'todo o nada'. El desarrollo del modelo de asignación todo o nada consta de la construcción de una red de transporte usando los Sistemas de Información Geográfica (SIG), Quantum GIS (QGIS) y TransCAD, los cuales son empleados de la siguiente forma:

- Se importan a QGIS datos geoespaciales obtenidos de la página de la Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México (SEMOVI), que contienen la distribución y localización de las ciclovías y cicloestaciones *Ecobici*.
- Se exporta e importa el mapa de QGIS a TransCAD y se prepara la red de transporte para cargar los datos de viaje.
- Se segmentan en horarios los datos de viaje origen destino (O-D) obtenidos de la base de datos pública de *Ecobici*.
- Se cargan los datos de viaje a TransCAD en forma de matriz O-D.
- Se realiza la asignación todo o nada para los viajes entre cada par origen-destino.

- Se obtienen como resultado mapas del flujo ciclista para horarios determinados.

La asignación de flujo obtenida en este estudio reviste una gran importancia, ya que proporciona una estimación del número de bicicletas que circulan por las vías contenidas dentro del polígono *Ecobici*.

El análisis de los resultados de la asignación tiene como objetivo identificar las zonas y avenidas con mayor demanda, lo cual permite:

- Proponer mejoras en la red de ciclovías actual.
- Proponer una expansión del sistema actual basada en datos concretos.
- Identificar las zonas ideales la expansión.

## OBJETIVOS

### General

Realizar un análisis del flujo de bicicletas públicas dentro del polígono *Ecobici* con un modelo de asignación todo o nada.

### Específicos

- Construir un modelo de asignación de tránsito dentro del polígono *Ecobici*.
- Realizar una asignación de tráfico todo o nada para los viajes en bicicleta del sistema *Ecobici*.
- Realizar un análisis por horarios del comportamiento del flujo del sistema *Ecobici*.
- Detectar las zonas de mayor flujo de bicicletas públicas dentro del polígono *Ecobici*.

El trabajo se estructura de la siguiente forma. El Capítulo 1 presenta el marco teórico en donde se mencionan algunos trabajos relacionados al sistema *Ecobici* y asignaciones de tránsito para bicicletas. Así mismo, se presentan definiciones de todos los conceptos necesarios para el desarrollo del este trabajo. El Capítulo 2 contiene una descripción de la zona de estudio, en donde se define el sistema *Ecobici*, su infraestructura, la distribución del sistema, la evolución histórica y datos estadísticos. En el Capítulo 3 se explica la metodología que se siguió para la obtención de datos y construcción de la asignación todo o nada. En el Capítulo 4 se muestran los resultados de la asignación. En el Capítulo 5 se presenta una discusión acerca de los resultados. Finalmente, en el Capítulo 6 se discuten las conclusiones del trabajo, las limitantes del modelo de asignación presentado y las futuras líneas de investigación.

# 1 MARCO TEÓRICO

Esta sección brinda una exposición ordenada de la teoría en la que está sustentado el presente trabajo. La teoría presentada permitirá al lector entrar en contexto, comprender y analizar la metodología propuesta.

## 1.1 TRABAJOS RELACIONADOS

En los años recientes se han hecho estudios con fin de caracterizar y comprender el sistema *Ecobici*. En Márquez et. al. (2021), se utilizaron datos de tiempo de viajes y números de retiro y entrega de bicicletas en cada cicloestación para caracterizar el comportamiento de inventarios de las cicloestaciones. Los autores realizaron una simulación iterativa para llegar a la cantidad óptima de bicicletas que deben existir en cada inventario de estación para que no se den casos de desabasto de bicicletas.

Moncayo (2020) uso datos públicos del sistema *Ecobici*, para: calcular tiempos promedio de viaje, contar viajes de entrada y salida, y conocer el flujo de bicicletas en intervalos de diez minutos. Estos hallazgos son útiles para la gestión del sistema, incluyendo la reubicación de bicicletas y la planificación de estaciones. Se utilizaron aproximadamente 4.6 millones de viajes de julio de 2014 a enero de 2015. Moncayo (2020) además proporcionó un script en R para replicar el análisis. Su enfoque es novedoso, ya que previos estudios, se centraron en los usuarios en lugar del comportamiento del sistema.

Martínez et al. (2022) caracterizaron la zona *Ecobici* a través de todos los viajes origen-destino en 2019, para relacionar cuáles son los pares origen-destino más comunes, cuáles son las colonias que tienen mayor interconexión con base a los viajes realizados y que colonias tienen más viajes internos.

López (2013) realizó un análisis de las medidas y factores que permitan realizar un cambio de modo de transporte en el sistema *Ecobici*. Este estudio se centra en qué factores de comportamiento y política pública se necesitan para que la promoción del uso de la bicicleta como una alternativa sustentable se consolide.

De Buen (2021) relaciona las políticas que restringen el uso de automóvil para disminuir la contaminación con el aumento del uso del sistema de bicicletas compartidas. La autora se basa en que las malas condiciones ambientales aumentan el desarrollo de los sistemas de bicicletas compartidas y su infraestructura.

Así como existen estudios enfocados al sistema *Ecobici*, también existen trabajos enfocados a otros sistemas de bicicletas públicas que cuyos objetivos y metodología tienen similitudes con esta tesis. A continuación, se presentan dichos trabajos.

Gallego (2013), ofrece una metodología para diseñar un modelo de transporte para la movilidad urbana sostenible en ciudades de tamaño medio. El modelo se basa en una asignación todo o nada en donde en lugar de tomar la ruta más corta para la asignación, dirige algunas rutas hacia las vías con mejor infraestructura ciclista. Esta redirección es posible pues se trata de una ciudad

de tamaño medio, por lo que las distancias de los desvíos no son considerables. El autor realiza la asignación con datos aforados en campo y encuestas. Su modelo pretende obtener la caracterización de la movilidad urbana sostenible con base a su variación dinámica.

Ortiz (2017) usa datos obtenidos en campo y algunos datos del sistema de bicicletas públicas *Sevici*, para realizar una asignación todo o nada en la red ciclista de Sevilla, España. En el modelo de asignación, Ortiz (2017) únicamente se considera la red de ciclovías y excluye avenidas sin infraestructura ciclista. Este trabajo pretende caracterizar las zonas de transporte con base a una estimación de flujo ciclista, fomentar esta la línea de investigación y promover la apertura de más datos de viaje.

## 1.2 CICLOVÍA

La National Association of City Transportation Officials (NACTO) define ciclovía como una vía diseñada y reservada para el tránsito de bicicletas. Es un espacio segregado del tráfico de vehículos motorizados para brindar un espacio seguro y protegido para los ciclistas.

Normalmente, la dirección de las ciclovías es la misma que la dirección de los automóviles, pero algunas veces, según lo amerite, pueden ir en contraflujo al tránsito de los automóviles.

La Figura 1 muestra los diferentes tipos de ciclovías, que a continuación se presentan (Martínez, 2014):

- Convencional: comparte la vía con los automóviles y se encuentra demarcada con pintura en el pavimento.
- Convencional más zona de amortiguamiento: igual a la convencional, pero con la diferencia de tener una separación mayor entre la vía de automóviles y la ciclovía.
- Confinada: junto a la vía de automóviles con elementos de confinamiento que separen ambas.
- Reservada: separada del tránsito de vehículos y sigue su propia ruta.
- Vías integradas: vías en las que por medio de señalización se indica que pueden circular bicicletas y otro tipo de vehículos (normalmente transporte público).



Figura 1. Tipos de Ciclovía (Elaboración propia)

### 1.3 SISTEMA DE BICICLETAS COMPARTIDAS

Un sistema de bicicletas compartidas tiene el objetivo de poner a disposición de los habitantes de una zona bicicletas para alquilar en sus trayectos diarios. Para la renta de bicicletas, se colocan estaciones en lugares estratégicos, cerca de lugares frecuentemente visitados, lo que permite a los habitantes poder rentar una bicicleta en una estación y devolverla en otra. La mayoría de los sistemas de bicicletas compartidas son accesibles a través de aplicaciones móviles (PBSC Urban Solutions, 2022).

### 1.4 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Es necesario contar con un espacio virtual para realizar la construcción y simulación de los modelos de redes de transporte, por lo que es sustancial el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación (Sitjar i Suñer, 2009). Existe una diversidad de áreas y actividades en las que los sistemas de información geográfica nos pueden resultar útiles. Sendra et al. (2000), clasifica su utilidad en 2 grandes grupos:

- Gestión y descripción de territorio.
- Ordenación y planificación del territorio.

Para el caso de gestión y descripción del territorio las funciones más empleadas para su desarrollo son las siguientes:

- Almacenamiento y gestión de datos espaciales.
- Análisis simple o complejo de datos espaciales.

- Generación de resultados, mapas, informes, tablas o gráficos.

Para el grupo de ordenación y planificación de territorio el proceso es más elaborado y principalmente se puede resumir en las siguientes funciones:

- Búsqueda selectiva de datos.
- Descripción de los datos
- Generación de modelos con base a información preexistente.
- Manipulación de información: superposición, cambio de tiempo de elemento gráfico, etc.

En este trabajo de investigación, se utilizarán los SIG para la manipulación de datos geoespaciales del sistema *Ecobici*. La gestión de datos se utilizará para la construcción de un modelo de asignación a partir del cual se puedan generar mapas que expliquen el comportamiento del flujo de bicicletas. Los Sistemas de Información Geográfica que se utilizarán en este trabajo, son QGIS y TransCAD.

Este trabajo usará el SIG Quantum GIS para manipular los datos geoespaciales e importarlos a el SIG TransCAD. En TransCAD se hace la asignación todo o nada, la cual generará mapas de flujo como resultado.

## 1.5 QGIS

Dentro del mundo del software de código libre existe QGIS (ver logotipo en la Figura 2), que es un SIG de código libre desarrollado por Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) en C++. QGIS, permite la visualización edición y análisis de datos geográficos en diversos formatos, como Shapefile, GeoJSON, KML, GeoTIFF, entre otros (QGIS Development Team , 2023).



*Figura 2. Logotipo oficial de QGIS (QGIS Development Team, 2023)*

Este software trabaja bajo cualquier sistema operativo y permite la creación de mapas con una gran cantidad de capas que se ensamblan bajo diferentes formatos y especificaciones según lo requiera el trabajo que se realice. Una gran ventaja de este software es que cuenta con librerías que permiten crear complementos extensibles (plugins) enfocados a la necesidad de que cada proyecto. Debido a que QGIS es de código libre, existe una gran cantidad de complementos e incluso aplicaciones para complementarlo.

## 1.6 TRANSCAD

TransCAD (ver logotipo en la Figura 3) es un SIG diseñado específicamente para el análisis y planificación del transporte. Se utiliza en el campo de la ingeniería y planificación de transporte.



Figura 3. Logotipo oficial de TransCAD (Caliper, 2023)

Sus tres principales funciones son:

- Potente motor GIS con extensiones especiales para el transporte.
- Herramientas de mapeo, visualización y análisis diseñadas para aplicaciones de transporte.
- Módulos de aplicaciones para enrutamiento, previsión de demanda de viajes, transporte público, logística, ubicación de sitios y gestión de territorios

Así mismo, TransCAD incluye la generación y manejo de objetos de datos de transporte como lo son:

- Redes de transporte.
- Matrices.
- Rutas y sistemas de ruta.
- Referencias lineales.

TransCAD es un SIG que se utiliza con licencia, por lo cual se debe pagar para obtenerlo. Es muy utilizado en la industria del transporte por organismos gubernamentales y consultoras de ingeniería para el campo de la planificación y gestión del transporte (Caliper, 2023).

## 1.7 RED DE TRANSPORTE

Una red de transporte se define como la infraestructura de red que proporciona conectividad y traslado para el usuario que la utilice (Boucadair, 2015). La correcta planificación y desarrollo de una red de transporte tiene un fuerte impacto en la movilidad, calidad de vida y desarrollo económico de una zona.

Para estimar y analizar el flujo de tránsito en una red, se utilizan modelos de redes transporte que son una representación matemática y gráfica de la red real de transporte. En los modelos de redes de transporte se identifican componentes clave como puntos de conexión, conocidos como nodos, y las conexiones entre ellos, llamados enlaces. Los nodos pueden servir para representar intersecciones, estaciones, terminales, entre otros. Los enlaces representan cualquier tipo de vía de desplazamiento dentro del sistema. Cada enlace tiene pesos que modelan las características de la red, como la capacidad, velocidad y dirección, entre otros (Meyer, 2016).

La Figura 4 muestra el modelo de la red de transporte de Sioux Falls (Chen et al., 2012). Las fechas representan los enlaces de la red, estos enlaces cuentan con una dirección, marcada con la dirección de la flecha, y un flujo, señalado junto a cada flecha. Los nodos representan la intersección entre los enlaces y los números que contienen sirven para identificarlos.

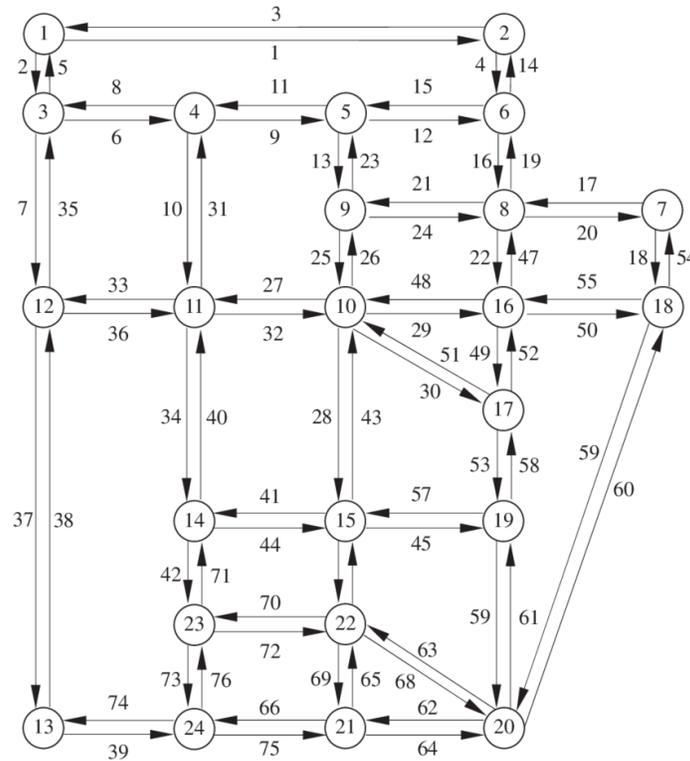


Figura 4. Red de transporte de Sioux Falls (Chen et al., 2012)

Los modelos de redes de transporte ayudan a analizar diferentes aspectos de una red de transporte, como la congestión, tiempos de viaje y eficiencia. Se usan para planificar y optimizar rutas, realizar estudios de tráfico, entre otros. Además, los modelos, tienen la intención de contribuir a la mejora de la movilidad y la eficiencia del sistema de transporte.

### 1.8 ASIGNACIÓN TODO O NADA

Para lograr definir lo que es la asignación todo o nada es necesario primero definir el término flujo y asignación de tránsito. El flujo, en ingeniería de tránsito, se refiere a los vehículos que cruzan por un punto o línea en la vía y se mide por tiempo o por densidad. Flujo en un punto en el espacio en un rango de tiempo dado o densidad de vehículos sobre un espacio en un momento dado (Hall, 2008). Para fines de este trabajo se utiliza la medición de flujo por tiempo sobre un punto para los aforos y sobre una línea para el modelo de asignación.

Los modelos de asignación de tránsito se usan para estimar el flujo en una red de transporte. Estos modelos se apoyan de una matriz de flujo, la cual indica el volumen de vehículos que viajan entre los pares origen-destino (O-D). Los flujos entre cada par O-D, se asignan a la red en función

del tiempo de viaje o los caminos alternativos por los que podrían moverse los vehículos (Caliper, 2023a).

Todo o nada es una asignación de tránsito la cual se asignan los flujos entre orígenes y destinos a una sola ruta o enlace. Funciona bajo la suposición de que los usuarios en el sistema de transporte elegirán la ruta más corta o la ruta más rápida para su viaje sin considerar la capacidad en la vía (Ortúzar et al., 2011; Gallego, 2013; Ortiz, 2017).

Para ejecutar la asignación todo o nada, se necesita una tabla que contenga la longitud y velocidad de flujo libre de los enlaces. Los pasos para hacer la asignación son los siguientes (Ortúzar et al., 2011):

1. Obtener las rutas mínimas entre cada par origen- destino (O-D).
2. Obtener el número de viajes entre cada par origen y destino.
3. Asignar a la ruta mínima los viajes desde cada origen a cada destino.
4. Sumar los volúmenes de flujo en cada enlace. Cualquier enlace puede ser parte de una ruta mínima para cualquier par O-D.

La asignación calcula las rutas más rápidas sin considerar congestión y los flujos asignan sin considerar la capacidad de la vía. Esta asignación tiene la ventaja de que es sencilla y los resultados son fáciles de comprender. Mientras que tiene la desventaja de no proporcionar resultados realistas cuando los efectos de la congestión y la capacidad pueden alterar las rutas de los vehículos.

Se emplea el Algoritmo de Dijkstra (también llamado algoritmo de caminos mínimos) para encontrar la ruta más corta desde un origen hacia los destinos, siempre y cuando los enlaces de la red de transporte no tengan un peso negativo.

El algoritmo de Dijkstra se compone de los siguientes pasos (EcuRed, 2023):

Inicialización.

- Sea  $V$  un conjunto de nodos de una red de transporte.
- Sea  $C$  una matriz de tiempos de viaje de los enlaces de la red. En  $C[u, v]$  se almacena el tiempo de viaje entre el enlace que va de  $u$  a  $v$ .
- Sea  $S$  un conjunto que contendrá los nodos para los cuales ya se tiene determinado el tiempo de viaje mínimo.
- Sea  $D$  un arreglo unidimensional tal que  $D[v]$  es el tiempo de viaje mínimo del nodo origen al nodo  $v$ .
- Sea  $P$  un arreglo unidimensional tal que  $P[v]$  es el nodo predecesor de  $v$  en el tiempo de viaje mínimo que se tiene calculado.
- Sea  $v_{inicial}$  el nodo origen. El Algoritmo Dijkstra determina los tiempos de viaje mínimos que existen partiendo de un nodo origen al resto de los nodos.

**Paso 1.**  $S \leftarrow \{v_{inicial}\}$  # Inicialmente  $S$  contendrá el nodo # origen.

**Paso 2.** Para cada  $v \in V, v \neq v_{inicial}$ , hacer:

2.1.  $D[v] \leftarrow C[v_{inicial}, v]$  # Inicialmente el tiempo mínimo de  $v_{inicial}$  a  $v$  es lo contenido en la matriz de tiempos.

2.2.  $P[v] \leftarrow v_{inicial}$  # Inicialmente, el predecesor de  $v$  en el tiempo mínimo calculado hasta el momento es  $v_{inicial}$ .

**Paso 3.** Mientras  $(V - S \neq \emptyset)$  hacer # Mientras existan nodos para los cuales no se ha determinado el tiempo de viaje mínimo.

3.1. Elegir un nodo  $w \in (V - S)$  tal que  $D[w]$  sea el mínimo.

3.2.  $S \leftarrow S \cup \{w\}$  //Se agrega  $w$  al conjunto  $S$ , pues ya se tiene el tiempo de viaje mínimo hacia  $w$ .

3.3. Para cada  $v \in (V - S)$  hacer:

3.3.1.  $D[v] \leftarrow \min(D[v], D[w] + C[w, v])$  # Se escoge, entre el camino mínimo hacia  $v$  que se tiene hasta el momento, y el camino hacia  $v$  pasando por  $w$  mediante su camino mínimo, el de menor tiempo de viaje.

3.3.2. Si  $\min(D[v], D[w] + C[w, v]) = D[w] + C[w, v]$  entonces  $P[v] \leftarrow w$  # Si se escoge ir por  $w$  entonces el predecesor de  $v$  por el momento es  $w$ .

**Paso 4.** Fin.

#### 1.8.1 EJEMPLO ASIGNACIÓN TODO O NADA

En Moreno et al. (2014), se presenta un ejemplo práctico en el que se utiliza la asignación todo o nada que a continuación se describe.

En la Figura 5 se muestra un modelo de asignación que representa la red de transporte carretero que hay entre el Distrito Federal y Nuevo Laredo. Los nodos representan los orígenes y destinos, y además son las ciudades dentro de la red de transporte. Los enlaces representan las vías que unen dichas ciudades, donde el tiempo necesario para recorrerlos se muestra junto a cada uno.

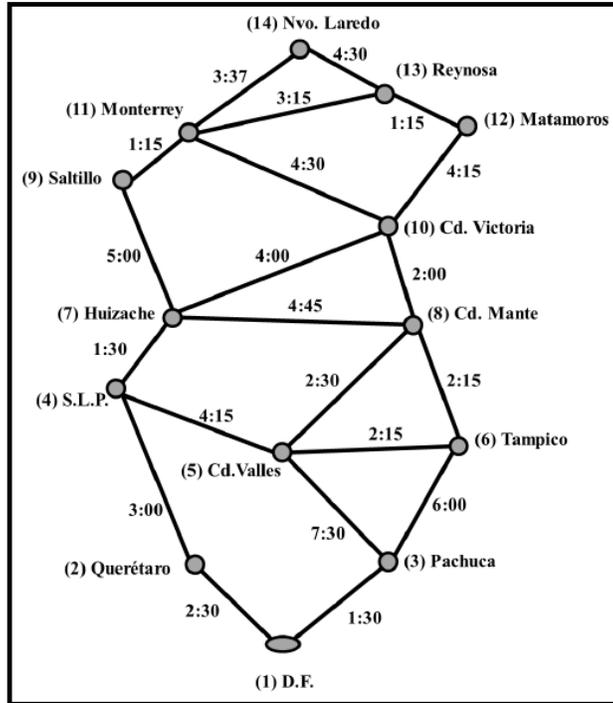


Figura 5. Esquema de red carretera DF - Nuevo Laredo (Moreno et al., 2014)

La Figura 6 representa la matriz origen-destino donde se muestran el número de vehículos que quieren llegar de cada origen a cada destino indicado. Así mismo, en la Figura 7 se muestran las rutas más cortas entre cada par origen-destino, calculadas utilizando el algoritmo de Dijkstra.

		DESTINO				
		NLAREDO	TAMPICO	SLP	DF	CDVALLES
ORIGEN	DF	80	20			
	MATAM			20	60	
	MTY				50	25

Figura 6. Matriz origen-destino para red carretera DF - Nuevo Laredo (Moreno et al., 2014)

From	To	Distance	Route
1-DF	14-NLARED	16.87	1- 2- 4- 7- 9- 11- 14
1-DF	6-TAMPIC	7.50	1- 3- 6
12-MATAM	1-DF	15.25	12- 10- 7- 4- 2- 1
12-MATAM	4-SLP	9.75	12- 10- 7- 4
11-MTY	1-DF	13.25	11- 9- 7- 4- 2- 1
11-MTY	5-VALLES	9.00	11- 10- 8- 5

Figura 7. Rutas óptimas para matriz origen-destino (Moreno et al., 2014)

Una vez que se tienen los flujos y se calculan las rutas más cortas, se asignan flujos a cada ruta. Después se identifican los enlaces que comparten flujo para distintas rutas y se suman dichos flujos con el fin de tener el flujo total de cada enlace.

En la Figura 8 se muestra el resultado de la asignación todo o nada para esta red de transporte. Los números junto a cada enlace muestran el flujo total del enlace. El grosor de los enlaces es una representación gráfica del flujo total. Los enlaces punteados, no son parte de la asignación.

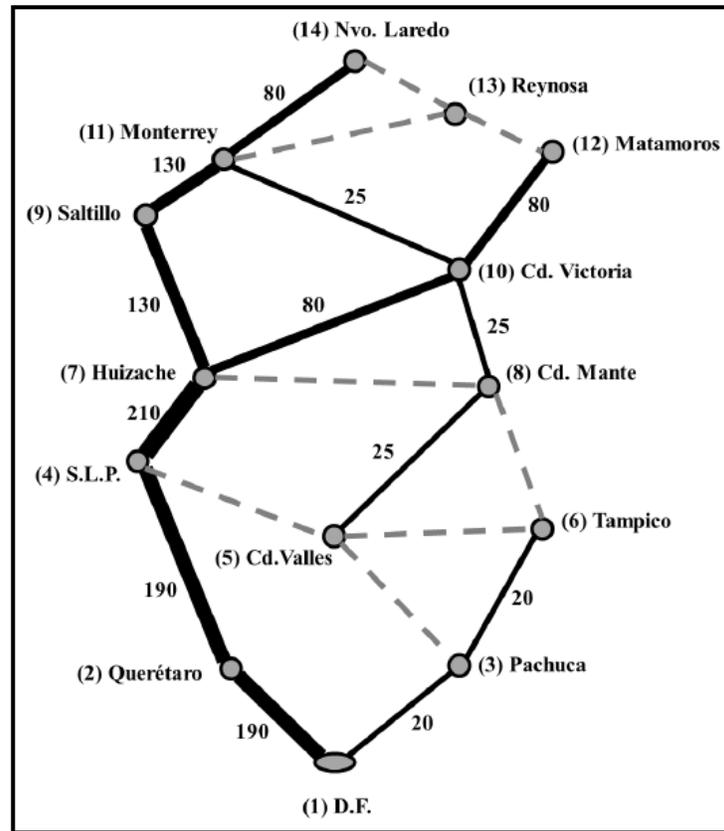


Figura 8. Asignación de flujo todo o nada para ejemplo de red de carretera DF – Nuevo Laredo (Moreno et al., 2014)

El enlace con mayor flujo es el que conecta el nodo 4 con el 7, es decir, S.L.P. con Huizache. Este enlace tiene un flujo de 210 vehículos ya que es utilizado por 4 rutas: D.F.–Nvo. Laredo, Matamoros–D. F, Matamoros–S.L.P. y Monterrey–D.F.

### 1.8.2 ASIGNACIÓN TODO NADA PARA BICICLETAS

Todo o nada es un método de asignación que solo considera distancias o tiempos entre los nodos, y deja de lado factores como la capacidad y congestión. Es un modelo que se puede utilizar óptimamente para volúmenes vehiculares reducidos donde no hay congestión. En la Ciudad de México, debido a la baja demanda de viajes de bicicletas, no existe congestión y las ciclovías están muy por debajo de su capacidad. Por lo que el método de asignación todo o nada, puede ser aplicado para el contexto de la Ciudad de México.

En el caso de asignación todo o nada en el sistema de bicicletas *Ecobici*, se considera que los orígenes y destinos son las cicloestaciones, y se asume que los usuarios toman las rutas más cortas para moverse de una cicloestación a otra.

## 1.9 AFORO DE TRÁNSITO

Villegas (2023) define los aforos de tránsito como la obtención de datos de primera mano de forma sistemática sobre el tránsito en un lugar predeterminado de la red. Los aforos sirven para obtener datos cuantitativos de volúmenes de tránsito.

Los aforos se pueden realizar por diversos métodos, aunque se pueden dividir en dos tipos, automáticos y manuales. Este proyecto se limita a utilizar el tipo de aforo manual. Se realiza a través de la observación directa desde una ubicación estratégica a lo largo de la vía determinada. En dicha ubicación se registran el número de bicicletas que pasan en un intervalo de hora. Para realizar los conteos manuales se utiliza un contador manual, como el que se muestra en la Figura 9.



*Figura 9. Contador manual de 4 dígitos Pretul (Truper, 2023)*

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIOS

Esta sección presenta al lector la información necesaria para familiarizarse con la zona de estudios. La información brindada contiene aspectos de infraestructura, de distribución geográfica, de evolución histórica y datos estadísticos.

### 2.1 ECOBICI

El sistema *Ecobici*, de la Ciudad de México, es un sistema de bicicletas compartidas que tiene como objetivo fomentar el uso de la bicicleta como medio de transporte en la ciudad (Ecobici, 2022a). Este sistema consiste en una red de ciclo estaciones en puntos estratégicos de la ciudad, donde los usuarios pueden tomar una bicicleta de cualquier cicloestación y estacionarla en la cicloestación más cercana a su destino. Los trayectos están limitados a 45 minutos de 5 am a 12:30 am los 7 días de la semana. La Figura 10 muestra un ejemplo de una cicloestación. Para acceder al sistema *Ecobici*, los usuarios pueden pagar una suscripción anual, semanal, por tres días o un día. Esta suscripción permite hacer viajes ilimitados, de 45 minutos cada uno, por todo el tiempo que dure la suscripción adquirida (Ecobici 2022a).



Figura 10. Bicicletas Ecobici estacionadas en una cicloestación (Ecobici, 2022a)

### 2.2 DESCRIPCIÓN INFRAESTRUCTURA

La infraestructura de *Ecobici* está compuesta de varios elementos que conforman el sistema y facilitan su uso. Los principales componentes se presentan a continuación.

**Cicloestación:** Son las instalaciones donde los usuarios pueden tomar o devolver las bicicletas *Ecobici* y están distribuidas estratégicamente en diferentes partes de la ciudad. Cada cicloestación cuenta con anclajes o bases para estacionar las bicicletas de forma segura. En la Figura 11, se muestra como ejemplo la cicloestación 19.



Figura 11. Estación 19 de Ecobici

**Bicicletas:** Las bicicletas *Ecobici* que se encuentran en las cicloestaciones están equipadas con un portabultos amplio en la parte delantera, luces reflectoras, sistema para anclarlas en las estaciones, sistema de cambio de velocidades, matrícula de identificación y asiento ajustable. Todas estas características hacen que las bicicletas tengan la certificación ISO 4210 (*Ecobici*, 2022). La Figura 12, muestra un ejemplo de una *Ecobici*.



Figura 12. Bicicleta Ecobici (*Ecobici*, 2022a)

**Sistema de bloqueo y desbloqueo:** Los usuarios pueden desbloquear el sistema de anclaje de una bicicleta en una estación utilizando su tarjeta de movilidad integrada de la Ciudad de México o una aplicación móvil.

**Señalización vial:** El sistema de *Ecobici* también fomenta e incluye la señalización vial para ayudar a los ciclistas a transitar de forma segura. Esta señalización incluye marcas en el pavimento, señales de tránsito, entre otros elementos.

**Ciclovías:** Para garantizar un espacio seguro para los ciclistas el sistema incluye una extensa red de ciclovías por la ciudad.

**Estacionamientos para bicicletas:** A parte de las cicloestaciones, existen estacionamientos públicos de bicicletas para fomentar el uso de la bicicleta y los habitantes puedan estacionar sus bicicletas privadas.

### 2.3 DISTRIBUCIÓN POLÍGONO ECOBICI

El polígono *Ecobici*, está delimitado por la ubicación de las cicloestaciones y está distribuido principalmente en el área central de la Ciudad de México. Las cicloestaciones se encuentran dentro de las alcaldías Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Benito Juárez. El polígono *Ecobici*, abarca 55 colonias tales como, Centro Histórico, Polanco, Nápoles, Roma, Condesa, Juárez, Cuauhtémoc, Narvarte y Del Valle, entre otras.

En la Figura 13 se muestra la delimitación del polígono *Ecobici* en 2022. Los nodos rojos que se muestran en la Figura 13 representan las cicloestaciones y las líneas verdes representan las ciclovías existentes. Es importante destacar, que el polígono *Ecobici* se ha expandido a lo largo de los años, con el objetivo de aumentar el alcance del sistema. Es recomendable consultar el sitio web de *Ecobici* para visualizar un mapa actualizado.

## DELIMITACIÓN POLÍGONO ECOBICI 2022

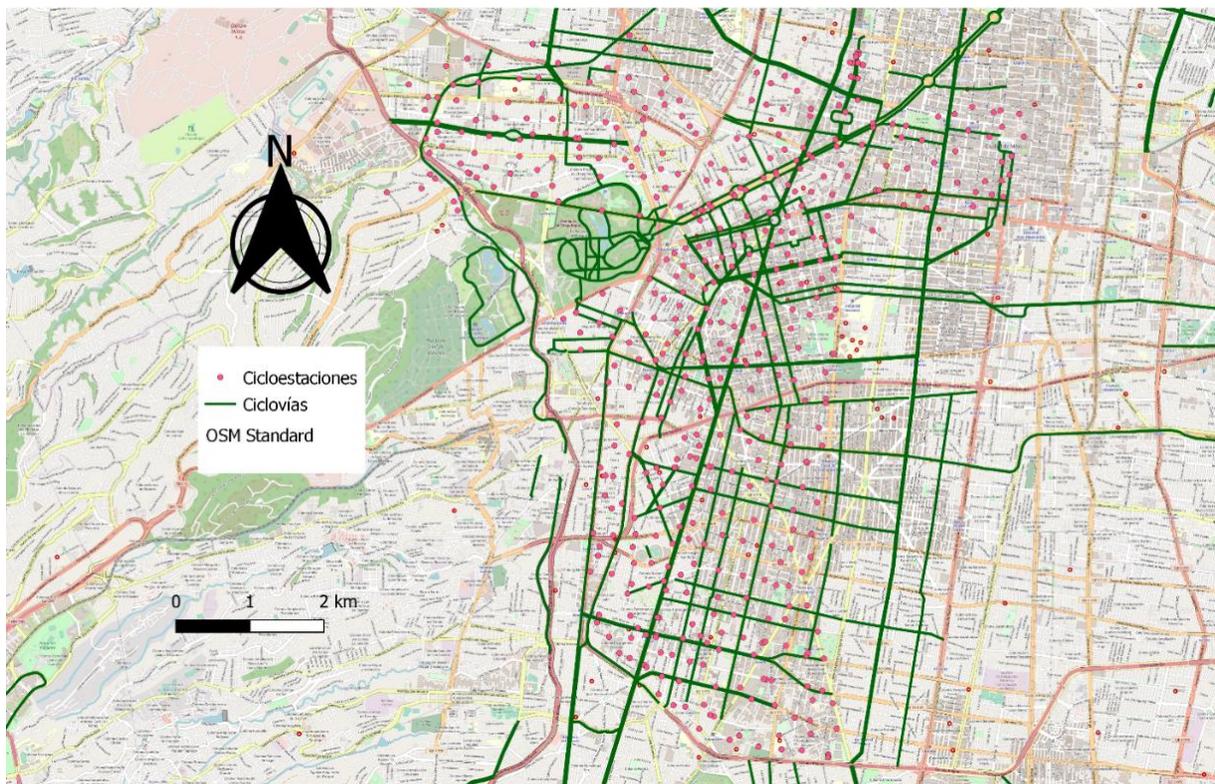


Figura 13. Mapa de delimitación de polígono Ecobici 2022 (Ecobici, 2023b)

## 2.4 EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Desde su lanzamiento en 2010, *Ecobici* ha experimentado una evolución significativa. El sistema comenzó con 85 estaciones y 1114 bicicletas ubicadas en las colonias Cuauhtémoc, Juárez, Roma Norte, Hipódromo Condesa y Condesa. En su primer año se registraron 841,079 viajes. En el 2015, se realizó una mega expansión en la cual se llegó a 452 estaciones y 6100 bicicletas. Para el 2017, llegó al máximo de viajes con un total de 9.53 millones en ese año y 48 millones desde su lanzamiento (Márquez et al., 2021). En 2018, el número de estaciones aumentó a 480 y el de bicicletas a 6500. Para finales de 2022, se llegaron a 79 millones de viajes desde su lanzamiento y un total de 436,569 usuarios registrados, con un servicio activo en 55 colonias (Martínez et al., 2022). Según el sitio web de *Ecobici*, para finales de 2023 se pronostica la existencia de 687 estaciones y un total de 9300 bicicletas.

La Figura 14 muestra la evolución del número de bicicletas y cicloestaciones del sistema *Ecobici* desde su lanzamiento hasta el 2023. La línea azul representa el aumento anual en la cantidad de cicloestaciones. La línea naranja representa el aumento anual en cantidad de bicicletas.

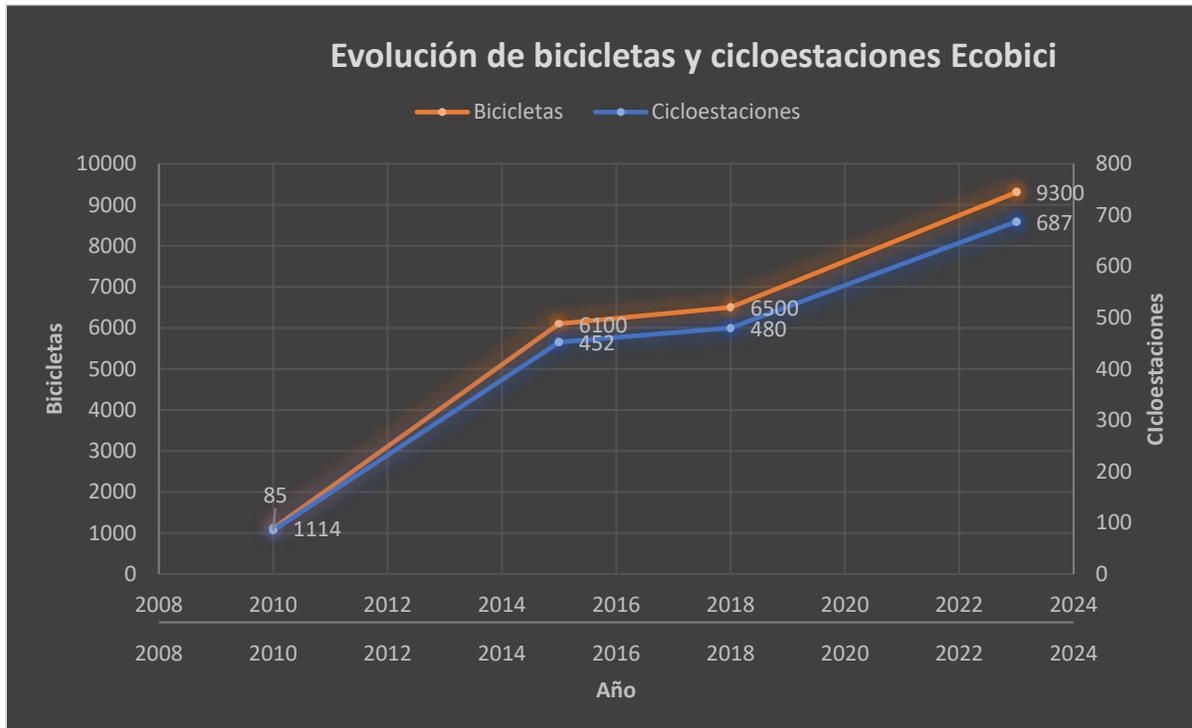


Figura 14. Evolución de bicicletas y estaciones Ecobici

## 2.5 DATOS ESTADÍSTICOS

*Ecobici* comparte los datos históricos de viajes de forma pública en su página web. Los datos se comparten mensualmente en archivos CSV con todos los viajes registrados durante ese mes. Cada uno de los archivos CSV contiene los siguientes datos:

- Genero\_Usuario: Masculino o Femenino (F, M)
- Edad\_Usuario: Edad del usuario que realizó el viaje
- Bici: Identificador de la bicicleta con la que se realizó el viaje
- Ciclo\_Estacion\_Retiro: ID de la cicloestación donde se inició el viaje
- Fecha\_Retiro: Fecha en la cual inició el viaje en formato dd/mm/aaaa
- Hora\_Retiro: Hora en la cual se inició el viaje en formato hh:mm:ss
- Ciclo\_Estacion\_Arribo: Identificador de la cicloestación donde se finalizó el viaje
- Fecha\_Arribo: Fecha en la cual finalizó el viaje en formato dd/mm/aaaa
- Hora\_Arribo: Hora en la cual se finalizó el viaje en formato hh:mm:ss

También, en la página de *Ecobici* es posible obtener la siguiente información de cada cicloestación: identificador, ubicación, coordenadas, total de estaciones de anclaje y archivos georreferenciados.

La duración promedio de un viaje en *Ecobici* es de 13 minutos y 15 segundos, con una desviación estándar de 12 minutos y 40 segundos. La edad promedio de los usuarios es de 36 años con una desviación estándar de 10.6 años. Alrededor de un 70% de los usuarios se identifican con género masculino y un 30% con el femenino (Ecobici, 2022a).

Periódicamente, la Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México (SEMOVI) realiza encuestas a todos los usuarios de *Ecobici*. Según los resultados publicados en 2020, se conoce que las colonias donde se originan más viajes son la Roma Norte y la colonia Del Valle. Mientras que las colonias que atraen más viajes son el Centro, la Condesa y la Anzures. Esta encuesta también arrojó que 55% de los usuarios utilizan *Ecobici* para ir al trabajo y asuntos relacionados al trabajo. Mientras que el porcentaje restante es para actividades recreativas, diligencias del día a día o traslados cortos espontáneos (Ecobici, 2020).

### 3 METODOLOGÍA

En esta sección se describe el procedimiento que se siguió para realizar la asignación todo o nada. Se divide en tres partes, la obtención de datos, la construcción del modelo de asignación y la asignación.

#### 3.1 OBTENCIÓN DE DATOS

Para iniciar con la metodología fue necesario la obtención de datos. Del portal de *Ecobici* se descargó la base de datos que contiene todos los viajes de *Ecobici* realizados durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2022. Se seleccionaron estos meses ya que presentan una alta congestión vehicular, por lo que se asume que el número de viajes en bicicleta también es alto. Además, de acuerdo con el cronograma de avance en este trabajo, los meses de septiembre, octubre y noviembre, cuadraban con los tiempos estimados donde era posible realizar trabajo de campo para hacer una validación del modelo.

La Figura 15 muestra el portal de datos abiertos del sistema *Ecobici* de donde se descargaron los datos de septiembre, octubre y noviembre de 2022. En la Figura 16 se muestra un ejemplo de los datos descargados.

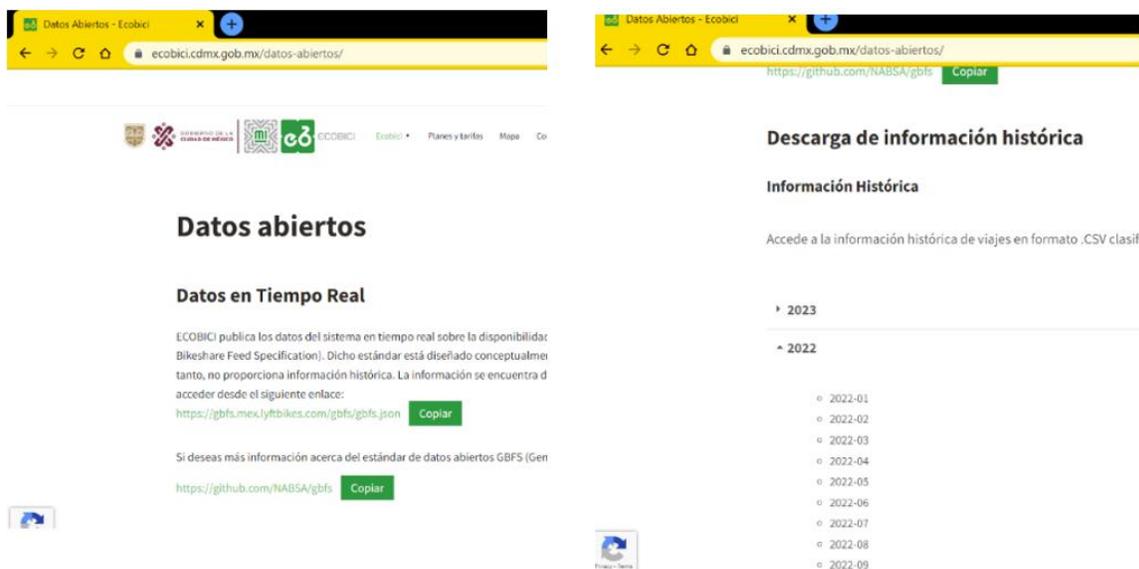


Figura 15. Captura de pantalla de la sección de donde se obtienen las bases de datos Ecobici

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Genero_u	Edad_usu	Bici	CE_retiro	Fecha_retiro	Hora_retir	CE_arribo	Fecha_arribo
9	M	60	3516234	40	sábado, 3 de septiembre de 2022	0:00:00	74	sábado, 3 de septiemb
21	F	26	6007652	128	viernes, 2 de septiembre de 2022	0:00:00	128	viernes, 2 de septiemb
23	F	28	6498893	412	sábado, 17 de septiembre de 2022	0:00:00	407	sábado, 17 de septiemb
25	M	26	6086151	394	miércoles, 28 de septiembre de 2022	0:00:00	423	miércoles, 28 de septiemb
30	M	29	6180426	407	viernes, 30 de septiembre de 2022	0:00:00	65	viernes, 30 de septiemb
31	M	21	3802147	88	jueves, 29 de septiembre de 2022	0:00:00	29	jueves, 29 de septiemb
34	M	43	6615900	427	martes, 13 de septiembre de 2022	0:00:00	445-446	martes, 13 de septiemb
36	M	30	2493112	341	sábado, 17 de septiembre de 2022	0:00:01	125	sábado, 17 de septiemb
38	M	31	2430429	384	lunes, 26 de septiembre de 2022	0:00:00	370	lunes, 26 de septiemb
40	F	25	5061742	399	sábado, 24 de septiembre de 2022	0:00:01	413	sábado, 24 de septiemb
42	F	35	7410467	49	lunes, 26 de septiembre de 2022	0:00:00	128	lunes, 26 de septiemb
43	F	34	2065795	125	miércoles, 28 de septiembre de 2022	0:00:00	74	miércoles, 28 de septiemb
44	M	26	4281903	128	jueves, 8 de septiembre de 2022	0:00:01	64	jueves, 8 de septiemb
45	M	53	6298582	72	jueves, 29 de septiembre de 2022	0:00:01	332	jueves, 29 de septiemb
46	M	35	7989494	46	sábado, 24 de septiembre de 2022	0:00:01	83	sábado, 24 de septiemb
47	F	30	6615900	40	sábado, 24 de septiembre de 2022	0:00:01	40	sábado, 24 de septiemb

Figura 16. Base de datos de viajes ECOBICI para el mes de septiembre

Los datos que se descargaron del portal de datos abiertos *Ecobici* para los meses de septiembre, octubre y noviembre fueron segmentados en cuatro grupos distintos:

- Jueves de 7 a 10 am
- Jueves de 1 a 4 pm
- Jueves de 6 a 8 pm
- Sábados de 12 a 3 pm

El jueves se seleccionó para la toma de datos ya que éste, es un día representativo de los días entre semana (Hernández et al., 2020). Los intervalos de hora para el jueves corresponden a los horarios con más demanda vehicular en la CDMX (Tomtom, 2023). Por otro lado, el día sábado es especial, ya que la demanda de viajes también es alta pero los intervalos de hora con mayor demanda son entre las 8 y las 15 horas (Tomtom, 2023). La Figura 17, muestra un ejemplo de los datos segmentados por días y horas en Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Genero_U	Edad_Usu	Bici	Ciclo_Está	Fecha_Retiro	Hora_Reti	Ciclo_Está	Fecha Arribo	Hora_Arri
2	M	66	6364038	312	jueves, 6 de octubre de 2022	7:00:00	312	jueves, 6 de octubre de 2022	7:22:48
3	M	33	8852709	300	jueves, 27 de octubre de 2022	7:00:00	302	jueves, 27 de octubre de 2022	7:01:47
4	O	31	2895100	415	jueves, 17 de noviembre de 2022	7:00:02	393	jueves, 17 de noviembre de 2022	12:00:31
5	F	23	13069	68	jueves, 8 de septiembre de 2022	7:00:02	258	jueves, 8 de septiembre de 2022	7:13:06
6	M	31	12430	217	jueves, 1 de septiembre de 2022	7:00:03	211	jueves, 1 de septiembre de 2022	7:03:33
7	M	29	5292057	234	jueves, 24 de noviembre de 2022	7:00:04	460	jueves, 24 de noviembre de 2022	7:14:55
8	F	48	7124662	377	jueves, 24 de noviembre de 2022	7:00:07	7	jueves, 24 de noviembre de 2022	7:27:09
9	M	31	8719155	107-108	jueves, 24 de noviembre de 2022	7:00:08	113	jueves, 24 de noviembre de 2022	7:04:40
10	M	42	3659539	273-274	jueves, 27 de octubre de 2022	7:00:09	261	jueves, 27 de octubre de 2022	7:15:13
11	F	42	7147432	125	jueves, 17 de noviembre de 2022	7:00:10	64	jueves, 17 de noviembre de 2022	7:10:52
12	M	33	2434967	64	jueves, 6 de octubre de 2022	7:00:10	40	jueves, 6 de octubre de 2022	7:07:00
13	M	22	5867668	447	jueves, 13 de octubre de 2022	7:00:10	53	jueves, 13 de octubre de 2022	7:02:44
14	M	37	3085263	280	jueves, 10 de noviembre de 2022	7:00:12	7	jueves, 10 de noviembre de 2022	7:20:34
15	M	50	7601933	111	jueves, 3 de noviembre de 2022	7:00:13	29	jueves, 3 de noviembre de 2022	7:12:20
16	M	30	2452399	31	jueves, 17 de noviembre de 2022	7:00:13	22	jueves, 17 de noviembre de 2022	7:08:34
17	M	32	6232144	325	jueves, 6 de octubre de 2022	7:00:13	46	jueves, 6 de octubre de 2022	7:18:20
18	M	29	9528	210	jueves, 1 de septiembre de 2022	7:00:15	242	jueves, 1 de septiembre de 2022	7:06:26
19	M	23	5950068	260	jueves, 20 de octubre de 2022	7:00:18	3	jueves, 20 de octubre de 2022	7:09:39

Figura 17. Base de datos con los datos segmentados para jueves de 7 a 10 am

Para cerciorar que los datos proporcionados en el portal de *Ecobici* estuvieran aproximados a la realidad y que no hubiese un subregistro o sobre registro de arribos o retiros, los jueves se realizaron aforos manuales en cada una de las horas pico para 2 de las estaciones con mayor demanda de arribos y retiros. A continuación, se presenta el proceso para obtener la demanda de las cicloestaciones por día según la base de datos y después se presentan los resultados de aforo. El aforo se realizó durante el mes de marzo de 2023 debido al cronograma de este proyecto, así mismo, para corroborar que el comportamiento en días hábiles para diferentes épocas del año es similar.

En la Figura 18 se muestra una captura del formato de la tabla utilizada de la base de datos en Excel. En la primera columna, de esta tabla, se señala la cicloestación con su número de identificación. En la segunda y tercera columna se muestra el número de arribos y retiros en los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2022, en la cuarta columna se muestra la suma de las 2 columnas anteriores. En las columnas T, U y V se muestran los datos de las columnas Q, R y S, divididos entre trece, para mostrar los arribos y retiros por día. Las filas están ordenadas de mayor a menor en función del total de arribos y retiros.

P	Q	R	S	T	U	V
Estación	Arribos en los 3 meses	Retiros en los 3 meses	SUMA	Arribos por día	Retiros por día	Suma
19	317	533	850	24	41	65
271-272	693	82	775	53	6	59
22	176	569	745	13	43	57
16	180	527	707	13	40	54
261	108	564	672	8	43	51
64	285	279	564	21	21	43
72	290	261	551	22	20	42
46	176	368	544	13	28	41
7	122	374	496	9	28	38
29	253	243	496	19	18	38
128	197	277	474	15	21	36
25	99	339	438	7	26	33
81	263	173	436	20	13	33
5	155	258	413	11	19	31
111	219	178	397	16	13	30
6	192	204	396	14	15	30
302	146	245	391	11	18	30
56	151	236	387	11	18	29

Figura 18. Tabla generada para contabilizar estaciones con más entradas y salidas por estación en jueves de 7 a 10 am

La Tabla 1 y la Tabla 2 muestran el promedio de arribos y retiros para las estaciones 19 y 81 para los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2022. En ambas tablas se presentan las demandas de arribos y retiros obtenidos de la base de datos del portal *Ecobici* comparados con los aforos manuales de arribo y retiro en el mes de marzo de 2023. No se pudo comparar con la base de datos de este mes debido a que el formato de tiempo de este archivo está dañado. Sin embargo, realizar el aforo en marzo del 2023 para comparar con los datos de septiembre, octubre y noviembre del 2022 también sirve para observar que el comportamiento es similar en días hábiles de un mes distinto. Los resultados muestran que los datos de la base de datos pública son fiables.

Estación 19				
Día	Hora		Base de datos	Aforo
Día hábil	7-10	Arribos	24	30
		Retiros	41	54
		Total	65	84
	13-16	Arribos	30	21
		Retiros	32	29
		Total	62	40
	18-20	Arribos	18	25
		Retiros	32	29
		Total	50	54
Sábado	12-15	Arribos	22	30
		Retiros	23	13
		Total	45	43

Tabla 1. Comparación de arribos y retiros en la base de datos y los aforados manualmente para la estación 19

Estación 81				
Día	Hora		Base de datos	Aforo
Día hábil	7-10	Arribos	20	16
		Retiros	13	24
		Total	33	40
	13-16	Arribos	19	23
		Retiros	17	20
		Total	36	43
	18-20	Arribos	25	30
		Retiros	18	25
		Total	43	55
Sábado	12-15	Arribos	17	25
		Retiros	17	21
		Total	34	46

Tabla 2. Comparación de arribos y retiros en la base de datos y los aforados manualmente para la estación 81

Utilizando la función de tablas dinámicas en Excel, se generaron tablas de origen-destino y flujo, como se muestra en la Figura 19. Las tablas dinámicas contabilizan la cantidad de bicicletas entre cada pareja de cicloestaciones, para las 480 cicloestaciones durante los jueves y sábados de septiembre, octubre y noviembre del 2022. Este proceso se repitió para cada una de las horas con mayor demanda de cada día, resultando en cuatro tablas de origen-destino-flujo.

	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1		Origen	Destino	Flow			
2		1	1	2			
3		1	4	1			
4		1	5	2			
5		1	6	1			
6		1	8	1			
7		1	9	6			
8		1	10	6			
9		1	13	5			
10		1	14	6			
11		1	15	2			
12		1	16	2			
13		1	18	7			
14		1	20	1			
15		1	21	1			
16		1	22	1			
17		1	23	4			
18		1	25	1			
19		1	27	3			
20		1	28	2			

Figura 19. Tabla origen-destino-flujo para jueves de 7 a 10 am

El flujo registrado en las tablas descritas en el párrafo anterior se dividió entre 13 para obtener el flujo promedio por horario pico. Trece se debe a que hay 13 jueves o sábados contenidos en los 3 meses seleccionados. En la Figura 20 se muestra un ejemplo de la tabla de flujo para un jueves de 6 a 8 pm entre cada par origen destino para los jueves de 7 a 10 am. La columna O la cicloestación de origen, la P es la cicloestación destino y la F es el flujo total entre cada par origen-destino.

	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	O	O	D	F				
2		1	1	0.15				
3		1	4	0.15				
4		1	5	0.08				
5		1	6	0.08				
6		1	7	0.08				
7		1	13	0.08				
8		1	18	0.08				
9		1	27	0.08				
10		1	39	0.08				
11		1	52	0.15				
12		1	55	0.08				
13		1	61	0.08				
14		1	75	0.08				
15		1	86	0.23				
16		1	96	0.08				
17		1	103	0.23				
18		1	107	0.15				
19		1	117	0.15				

Figura 20. Tabla origen-destino para jueves de 6 a 8 pm

### 3.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE ASIGNACIÓN

La construcción del modelo de red de transporte inició descargando una capa SHP de la página de movilidad de la Ciudad de México, que contiene la ubicación de todas las cicloestaciones *Ecobici*. Esta capa se abre en el software QGIS para segmentar el polígono *Ecobici*. En la Figura 21, se muestra el sitio y apartado de donde se obtuvieron los datos SHP y, en la Figura 22, se pueden observar los datos SHP cargados en el software QGIS.

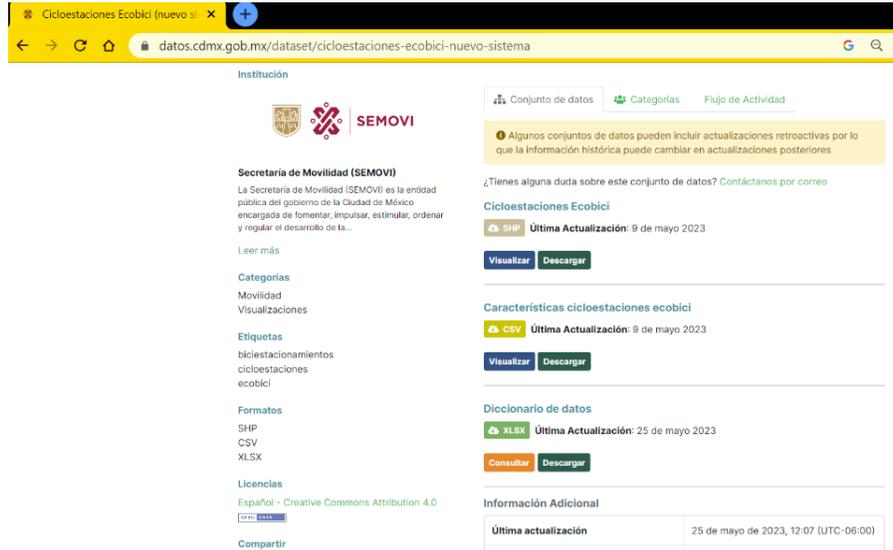


Figura 21. Captura de pantalla de la página web donde se descargan los datos georreferenciados

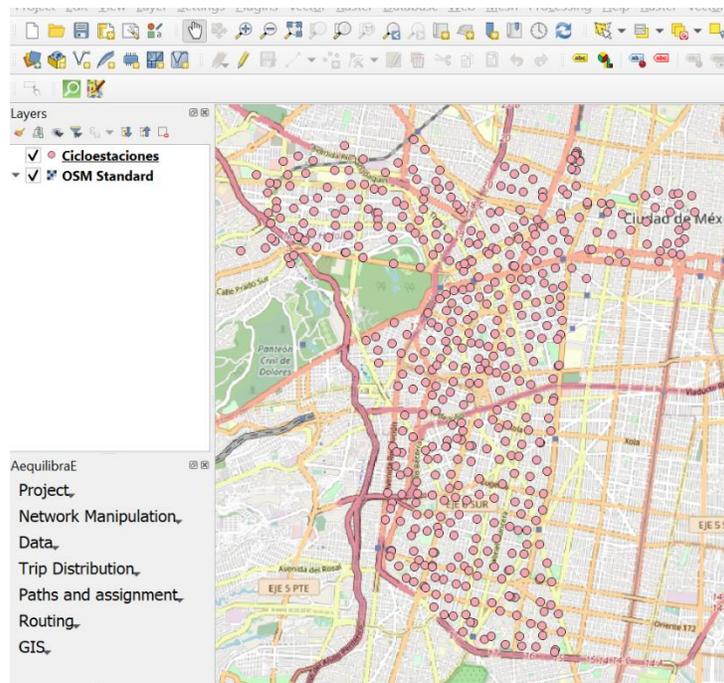


Figura 22. Captura del mapa de la CDMX con la capa de cicloestaciones sobrepuesta

En QGIS y usando un mapa de la Ciudad de México con la capa de cicloestaciones sobre puesta, se realizaron las siguientes acciones:

- Con la herramienta “Select features by polygon” (ver Figura 23) se seleccionó la zona delimitada por las cicloestaciones y se guardó. (ver Figura 24)
- Con el plug-in para QGIS “AequilibraE”, en el menú “Project” opción “Create project from OSM” (ver Figura 25), se creó un proyecto basado en nodos y enlaces.
- Este proyecto se importó a TransCAD como SHP (ver Figura 26).

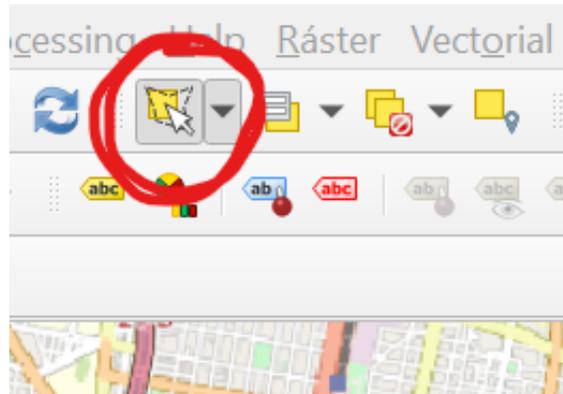


Figura 23. Captura de sección de menú en donde se realiza el recorte del polígono

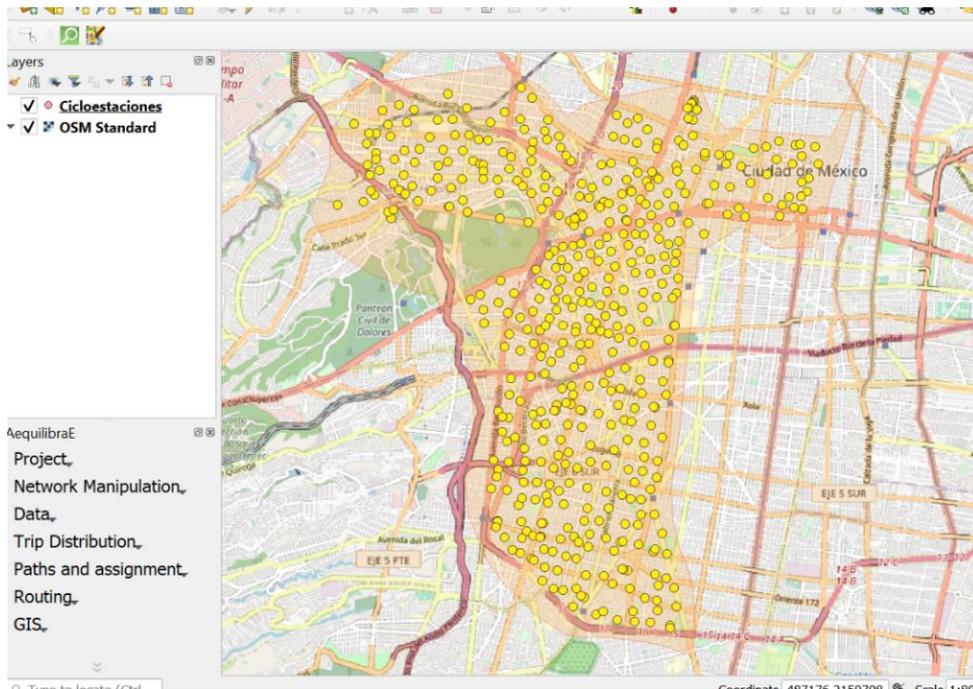


Figura 24. Captura de mapa de polígono Ecobici con zona a recortar resaltada

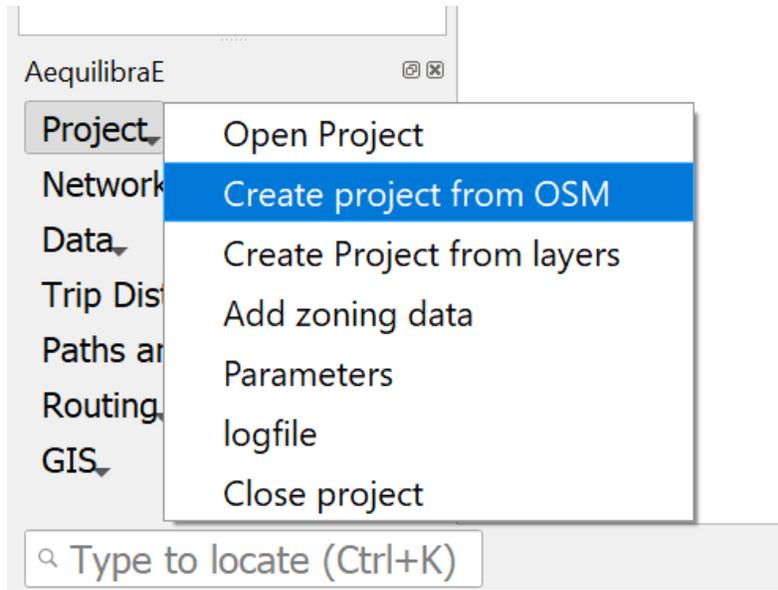


Figura 25. Captura de menú donde se generó el proyecto a partir del mapa recortado

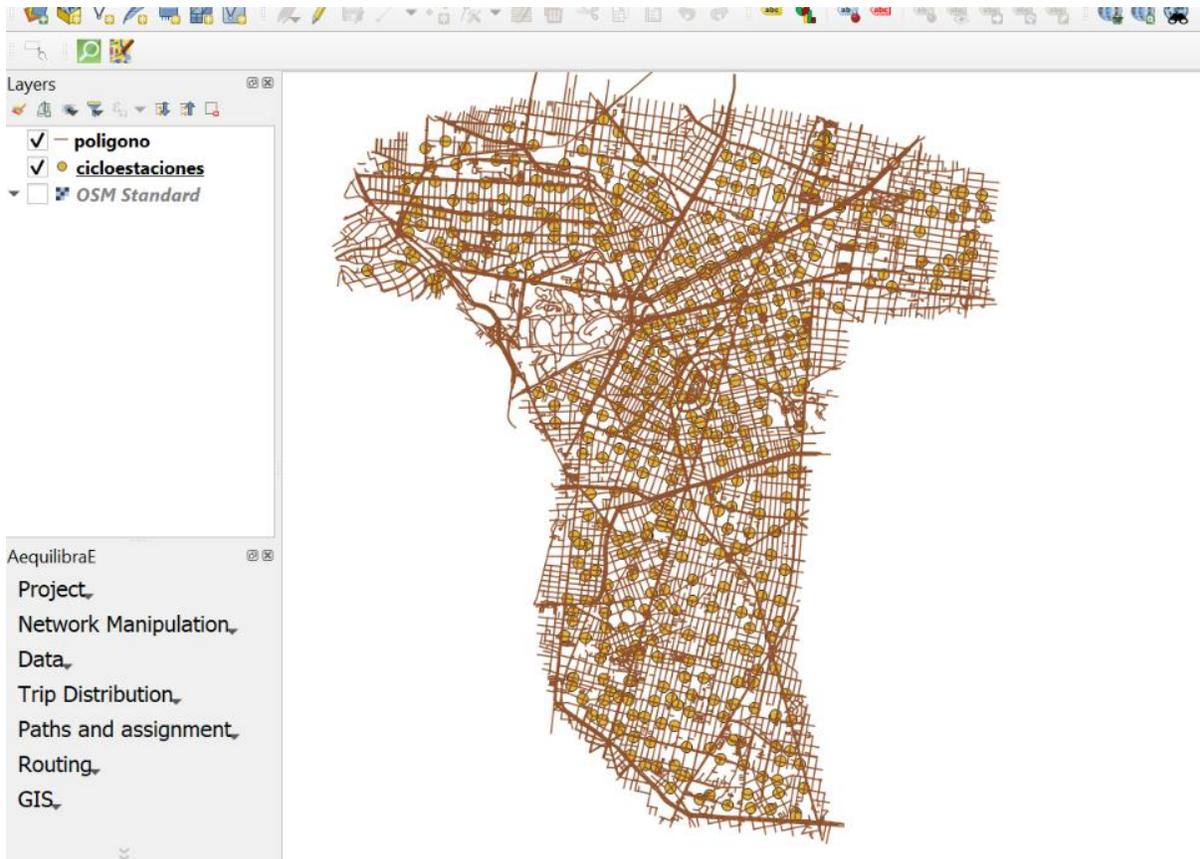


Figura 26. Captura de mapa de polígono Ecobici recortado y listo para exportar

La Figura 27 muestra el SHP con la red de transporte del polígono *Ecobici* que se importó a TransCAD. El SHP incluye nodos, calles y cicloestaciones. Los puntos rosas representan las cicloestaciones, las líneas y puntos negros representan los nodos y enlaces, respectivamente. Además, se realizó una limpieza de la red eliminando nodos innecesarios y elementos como vías de acceso controlado, pasos peatonales y callejones donde no pueden circular bicicletas

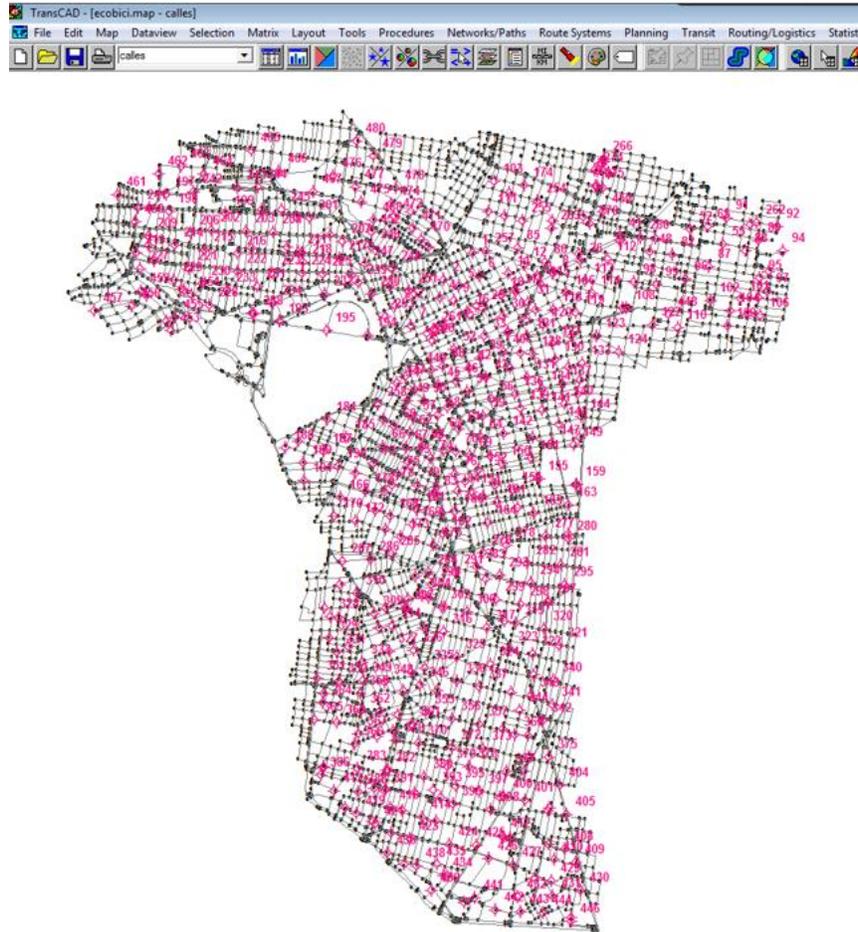


Figura 27. Polígono *Ecobici* con cicloestaciones sobre puestas

Se asignó cada cicloestación al nodo más cercano en la red usando la numeración correspondiente a las cicloestaciones (1-480) según la página de *Ecobici*. Más adelante, esta numeración permitirá, la identificación de cada cicloestación y así poder asignar los orígenes, destinos y flujos que se encontraron en la Figura 20.

Usando la herramienta de TransCAD, "Check Network Connectivity" (ver Figura 28) se verificó la conectividad de la red. Esta herramienta garantiza que toda la red esté conectada, es decir, que puedas trazar rutas directas entre cualquier pareja de nodos. Además, "Check Network Connectivity" identificó los enlaces sin conexión. En la Figura 29, se puede observar la red conectada y limpia que está lista para hacer la asignación todo o nada.

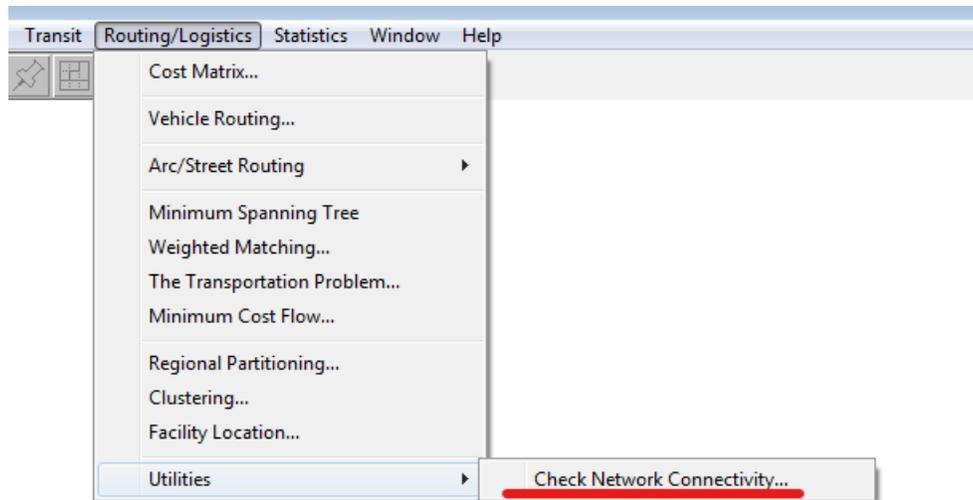


Figura 28. Captura del menú donde se revisó la conectividad de la red

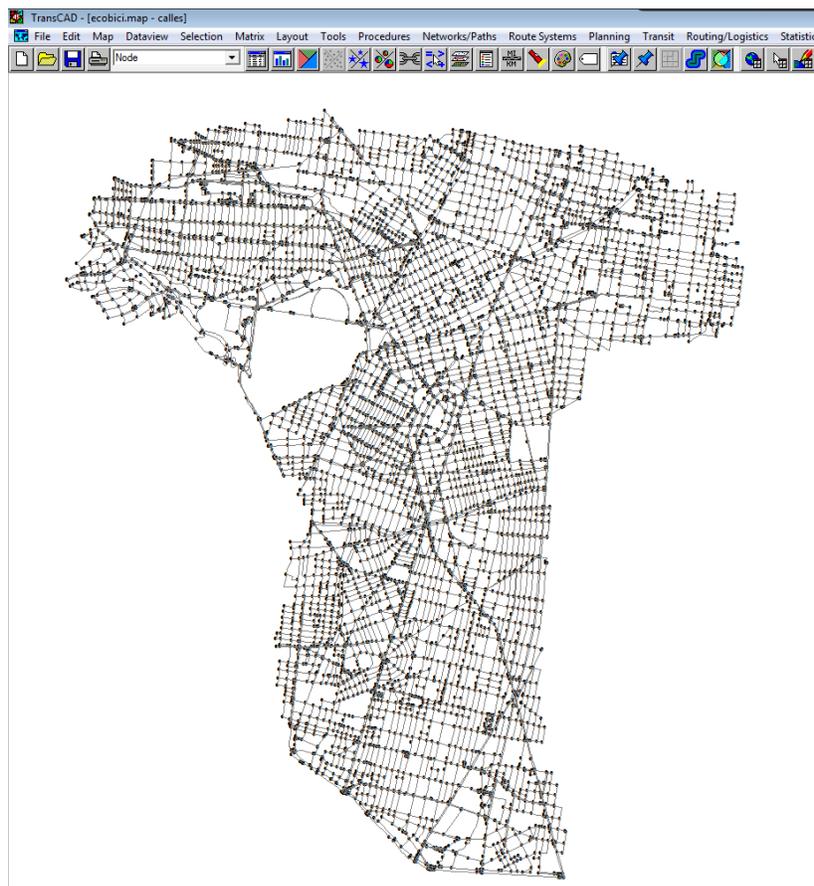


Figura 29. Polígono Ecobici con cicloestaciones asignadas a los nodos y listo para asignación.

### 3.3 ASIGNACIÓN

En el programa TransCAD por medio del menú “Multiple Paths” (ver Figura 30) se calculó una matriz de origen-destino cuyas entradas tienen los tiempos de viaje mínimos entre cada pareja de nodos en la red asignados a una cicloestación. Esta matriz (ver Figura 31) será utilizada posteriormente en la asignación todo o nada, para asignar el flujo total a cada enlace de la red.

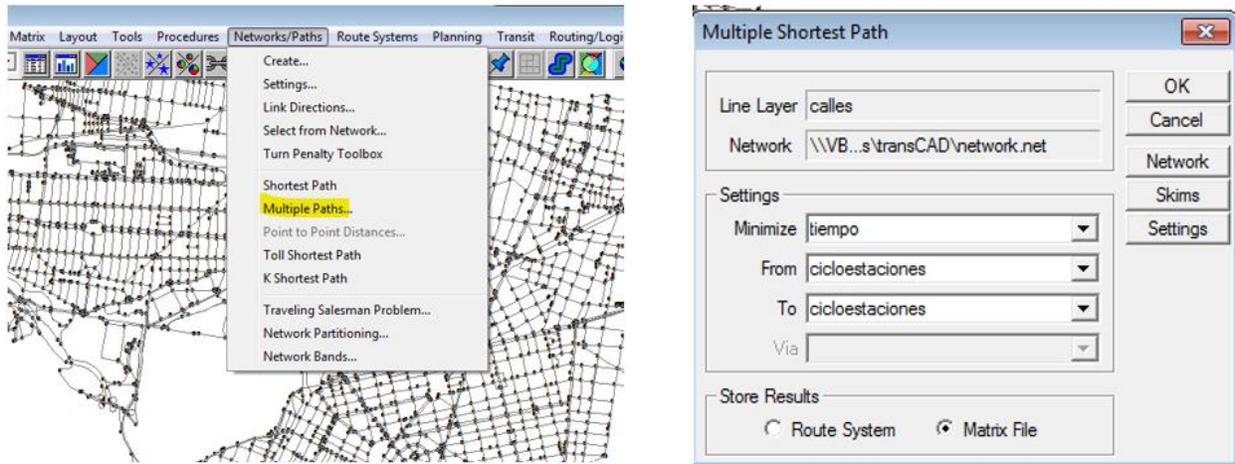


Figura 30. Menú utilizado para crear la matriz de tiempos mínimos.

	60	65	79	87	111	122	127	131	156	159	161	167	186	191	207	211
60	0.00	155.75	2201.24	1316.35	1281.62	1286.77	843.71	916.94	1989.54	2385.93	2384.42	303.82	1305.03	1162.97	1303.64	1293.86
65	338.38	0.00	2353.66	1468.78	1434.04	1439.19	996.14	1069.36	2141.97	2538.36	2536.85	406.39	1457.46	1315.39	1456.06	1446.29
79	2195.34	2391.09	0.00	1276.92	1326.22	1394.46	1594.78	1594.78	839.32	513.37	575.64	2496.90	1430.66	1533.50	1614.27	1601.38
87	1232.22	1323.97	1291.55	0.00	45.30	211.99	456.27	429.53	807.72	1204.11	1202.60	1539.78	237.40	268.59	426.25	413.36
111	1206.64	1362.39	1359.07	168.19	0.00	182.13	424.63	407.95	875.25	1271.64	1270.13	1508.20	188.10	219.29	376.95	364.06
122	1207.34	1363.08	1367.89	164.15	115.64	0.00	446.17	429.43	846.30	1253.07	1237.46	1508.89	85.94	205.12	274.79	261.89
127	807.33	963.07	1554.12	492.17	457.44	487.26	0.00	73.22	1199.23	1595.61	1594.10	1108.88	493.24	338.79	593.24	538.08
131	891.58	1047.25	1593.20	418.95	384.21	414.04	84.93	0.00	1176.00	1522.39	1520.88	1193.06	420.01	265.57	520.02	484.06
156	1937.68	2134.43	1736.37	790.30	839.60	907.84	1195.73	1178.98	0.00	429.55	427.04	2279.24	944.04	1046.88	1092.49	1079.59
159	2368.13	2523.88	515.06	1180.75	1230.05	1298.29	1586.18	1563.43	488.02	0.00	62.27	2663.69	1334.49	1437.33	1482.94	1470.04
161	2306.86	2461.60	452.79	1118.47	1167.78	1236.02	1523.90	1507.16	425.75	101.92	0.00	2607.41	1272.22	1375.05	1420.66	1407.77
167	381.31	203.55	2484.26	1482.52	1447.78	1442.49	1030.89	1104.12	2189.57	2585.96	2584.45	0.00	1460.75	1329.14	1448.60	1440.84
186	1121.40	1271.15	1464.41	246.63	198.12	114.37	360.23	343.49	342.82	1349.59	1332.98	1422.96	0.00	127.19	368.20	296.30
191	1108.18	1264.53	1480.97	263.18	214.67	148.47	348.02	331.27	358.14	1399.53	1410.74	154.45	0.00	343.30	330.40	24
207	1278.23	1425.98	1579.96	376.22	327.71	212.06	593.66	533.21	1058.36	1465.13	1449.52	1567.46	298.00	334.59	0.00	35.20
211	1243.04	1398.79	1544.75	341.02	292.50	176.86	518.46	498.01	1023.16	1429.93	1414.32	1544.60	262.80	299.39	151.96	0.00
215	1227.06	1362.80	1492.19	288.45	239.93	124.29	465.89	449.14	970.59	1377.36	1361.75	1520.61	210.23	246.82	197.01	143.91
222	1822.38	1978.13	420.65	883.95	953.25	1021.49	1221.82	1221.92	522.67	898.54	717.52	2123.94	1057.70	1160.53	1241.31	1228.41
240	1074.72	1220.47	683.22	887.34	936.64	1004.88	1292.77	1276.03	209.54	345.40	269.42	2376.28	1041.08	1143.92	1189.53	1176.63
241	2157.34	2313.09	678.64	969.96	1019.26	1087.50	1375.39	1358.64	277.24	330.82	254.85	2459.90	1123.70	1226.54	1272.15	1258.25
250	2104.28	2268.03	576.33	924.78	974.08	1042.32	1330.21	1313.47	276.98	427.36	426.04	2405.84	1078.53	1181.36	1262.14	1249.24
257	2095.34	2211.09	474.99	1045.75	1095.05	1163.29	1373.77	1373.77	493.67	439.14	439.91	2396.90	1199.49	1302.33	1385.11	1370.21
263	2044.76	2280.51	480.63	1080.36	1129.65	1197.98	1488.98	1488.97	526.67	477.28	478.05	2346.32	1234.10	1336.94	1417.72	1404.92
266	1987.68	2143.41	344.14	1058.28	1107.58	1175.82	1376.15	1376.14	573.59	508.25	527.23	2289.22	1212.02	1314.86	1395.64	1382.74
270	2233.63	2389.38	535.67	1046.25	1095.55	1163.79	1451.68	1434.94	368.45	187.85	186.34	2535.19	1199.99	1302.83	1348.44	1335.54
280	1998.86	2155.61	646.17	852.91	902.21	970.45	1258.34	1241.59	235.46	458.10	456.59	2301.42	1006.65	1109.49	1190.27	1170.57
283	1994.08	2148.83	788.08	806.70	856.00	924.24	1212.13	1195.38	128.90	420.26	344.28	2295.64	980.44	1063.28	1108.89	1095.99
297	1890.53	2046.20	983.96	783.15	752.45	773.89	1108.50	1091.63	127.59	596.14	510.75	2132.09	856.89	959.73	914.96	901.97
326	1204.46	1360.21	1545.89	342.15	293.64	178.00	443.29	426.55	1024.30	1431.07	1415.46	1506.02	263.94	224.23	144.39	89.23
333	1278.49	1434.24	1510.30	306.56	258.05	150.87	517.32	500.58	888.71	1395.48	1379.87	1580.04	236.80	298.25	145.68	132.78
377	1294.57	1450.31	1367.95	192.95	144.43	87.23	533.40	516.66	824.53	1253.07	1215.69	1586.12	173.17	292.35	307.05	294.15
406	1362.17	1517.32	1443.40	310.41	261.90	192.79	601.01	584.26	861.07	1289.62	1292.23	1663.73	278.73	381.94	272.88	259.98
451	993.80	1149.55	1544.25	726.47	677.96	581.92	601.87	623.24	1422.66	1829.43	1813.82	1291.03	600.19	472.70	420.92	456.12
459	844.31	1000.06	1947.69	729.91	681.40	585.36	502.82	437.29	1426.10	1832.87	1817.26	1141.54	603.63	476.14	553.88	547.69
469	666.93	822.68	1972.38	824.78	790.05	784.75	433.27	478.30	1531.84	1928.22	1926.71	964.16	607.10	671.40	762.35	756.16
474	603.79	759.53	1944.26	841.66	806.92	801.63	450.14	495.18	1548.71	1945.10	1943.59	901.02	819.89	688.28	807.74	798.99
486	1593.33	1749.07	2538.44	1334.70	1286.19	1178.55	1210.32	1141.70	1971.45	2408.00	2362.61	1881.82	1208.64	1081.16	958.83	984.03
489	1478.12	1633.87	2339.26	1135.52	1087.01	971.37	1095.12	1026.49	1735.94	2164.08	2126.70	1775.35	1052.31	965.95	759.65	794.86
530	939.44	1091.19	1951.93	734.15	685.64	589.60	699.55	540.92	1430.34	1837.11	1821.50	1232.67	607.87	480.38	558.13	551.94
539	963.84	1119.58	1867.73	649.95	601.43	505.40	525.35	456.72	1346.14	1752.91	1737.30	1261.06	523.67	396.18	462.64	467.73
549	1819.30	1975.05	3088.50	631.92	681.22	749.46	1037.36	1020.61	217.80	614.18	612.67	2120.86	795.67	888.50	939.80	926.91
585	1168.57	1322.32	1680.53	396.79	346.28	232.64	462.85	421.95	1878.94	1465.71	1470.10	1468.13	310.58	269.51	214.24	158.88
592	1142.31	1298.06	1677.04	473.30	424.79	389.15	503.85	442.56	1155.45	1562.22	1546.61	1499.54	395.09	298.52	152.86	171.28

Figura 31. Matriz de tiempos mínimos de traslado entre nodos con cicloestación asignada.

Los archivos que se crearon en la sección 3.1 que contienen el número de viajes entre cada par origen-destino, fueron exportados a TransCAD en forma de matriz origen-destino. En la Figura 32, se observa el formato de matriz origen-destino generado en TransCAD. Dicha matriz contiene el flujo promedio por hora pico entre cada pareja de nodos con una cicloestación asignada. Las columnas de la matriz se asignan a los orígenes, mientras que las filas a los destinos. Cada celda

muestra el flujo promedio entre un origen y un destino. Se crearon 4 matrices origen-destino de flujo, una para cada horario, de 7 a 10 am, de 1 a 4 pm, de 6 a 8 pm y sábado de 12 a 3 pm.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0.15	--	--	0.08	0.15	0.08	--	0.08	0.46	0.46	--	--	0.38	0.46	0.15	0.15	--	0.54	--
2	--	0.23	0.08	--	0.08	0.15	0.15	--	--	--	--	0.08	0.08	--	--	0.38	--	0.08	0.69
3	--	0.38	0.15	--	0.46	0.15	0.52	--	0.08	--	--	0.08	--	0.08	--	1.85	--	--	0.38
4	0.31	--	--	--	--	--	--	0.15	0.15	--	--	0.08	--	0.15	--	--	0.08	0.08	0.08
5	--	0.08	0.08	0.08	0.62	0.15	0.38	--	--	--	0.08	--	--	0.08	--	0.31	--	--	0.23
6	0.08	0.08	--	0.08	0.23	0.15	0.38	--	--	--	--	0.38	--	0.23	0.08	0.38	--	--	0.31
7	0.15	0.31	0.08	--	--	0.08	1.15	--	--	--	--	--	--	0.08	--	0.15	--	--	0.15
8	0.15	--	--	0.08	--	--	--	0.15	--	--	--	--	--	0.08	--	--	--	--	--
9	0.23	--	--	--	--	--	0.08	--	0.08	--	--	--	--	0.15	--	--	--	--	--
10	0.23	--	0.08	0.15	0.08	--	--	0.08	0.08	--	0.15	--	0.08	0.23	--	0.23	0.08	0.54	--
11	0.15	--	--	0.15	0.23	0.08	0.15	0.08	--	--	--	--	0.23	0.15	--	--	--	--	--
12	0.15	0.08	--	0.08	--	0.69	0.85	--	0.08	--	--	0.15	--	0.15	--	0.31	0.15	0.15	0.38
13	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.08	--	0.08	0.08	--	--	--	0.08	0.08
14	--	0.08	--	0.08	--	--	0.08	--	0.08	0.08	--	--	--	0.38	--	--	--	0.08	0.08
15	--	--	--	--	--	--	0.08	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16	0.15	0.62	0.15	0.15	0.15	0.08	0.38	--	--	--	--	--	--	--	--	0.38	--	--	0.08
17	0.08	--	--	--	--	--	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.08
18	0.31	0.08	--	0.15	0.08	0.23	0.08	0.23	--	0.08	0.08	--	0.23	0.31	0.08	--	0.08	0.08	--
19	--	0.38	0.23	--	0.92	0.54	1.62	--	--	--	--	--	--	0.08	0.08	2.23	--	--	0.62
20	--	--	--	0.23	0.08	0.15	0.08	--	0.08	--	--	--	0.08	0.38	0.08	0.23	0.31	0.46	--
21	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22	--	0.08	0.62	--	--	0.08	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	0.54	--	--	1.31
23	0.08	--	--	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.15	--	--	--	0.15	--
24	0.08	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.08
25	--	--	--	--	0.38	0.08	0.15	--	--	0.08	--	0.08	--	0.15	--	0.15	--	--	--
26	0.08	--	--	--	0.08	--	--	--	--	--	0.15	--	--	0.08	--	--	0.08	--	--
27	0.54	--	--	--	--	0.08	0.08	--	0.08	--	--	--	0.15	--	0.15	--	0.38	--	--
28	0.08	0.08	--	0.08	--	0.23	--	--	0.08	0.08	--	--	--	--	--	0.15	--	0.46	--
29	--	0.15	0.54	--	0.23	0.46	0.69	--	--	--	--	0.15	--	--	--	2.85	--	--	1.77
30	0.15	--	--	--	0.15	--	--	--	--	--	0.08	--	--	0.08	0.08	--	--	--	--
31	0.15	0.08	0.08	--	0.54	0.23	0.69	--	--	--	0.08	--	--	--	0.08	--	--	0.15	0.15
32	--	1.00	0.15	0.08	0.54	--	0.08	--	0.08	--	--	0.08	--	--	0.31	--	--	0.31	0.31
33	--	--	0.15	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
34	0.31	0.08	--	--	0.31	--	0.08	0.31	0.23	--	0.31	--	0.23	--	0.08	--	--	0.15	0.15
35	0.38	0.23	0.38	--	0.31	1.23	0.15	--	--	0.08	0.85	--	--	0.15	--	0.38	--	--	0.38
36	--	0.08	--	--	--	0.15	--	--	0.08	--	--	--	0.08	0.15	--	--	--	0.08	--
37	--	0.23	--	--	--	0.54	0.38	--	--	--	--	--	--	0.15	--	0.08	--	--	0.54
38	0.31	--	--	--	--	--	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.08	0.38	--
39	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.15	--	--	--	--	0.08	--	--	0.08	--
40	--	--	--	--	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.15	--	--	--	0.15
41	--	--	0.08	--	--	--	--	--	0.38	0.38	0.08	0.08	0.08	0.08	0.15	--	0.46	--	--
42	--	0.08	--	--	--	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.23	--	--	0.31
43	0.31	--	--	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	0.08	0.23	--	0.15	0.23	0.08	0.08
44	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.23	--	--	--	--
45	0.08	--	--	--	--	0.08	--	--	--	--	--	0.08	0.15	--	0.08	--	--	--	--
46	--	0.46	--	--	0.15	--	0.15	--	--	--	--	0.15	--	--	0.54	--	--	--	0.23
47	--	--	--	0.08	0.08	0.08	--	--	--	0.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--
48	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Figura 32. Captura de matriz de flujo entre cicloestaciones para un jueves de 7 a 10 am

Para cada uno de los horarios se realizó una asignación de tránsito todo o nada, con el fin de obtener el flujo total por horario en cada enlace. En la Figura 33, se muestra la ruta que hay que seguir en el menú de TransCAD para realizar la asignación, los pasos que realizaron son los siguientes:

- Ir al menú “Planning” y seleccionar la opción “Traffic Assingment” (Figura 33)
- En la ventana emergente, en el apartado “Method”, seleccionar la opción “All or Nothing”
- En el apartado “Matrix File” seleccionar la opción que corresponda a la matriz del horario para el que se vaya a realizar la asignación.
- En el apartado “Time”, se selecciona la opción tiempo, valor que corresponde a la velocidad de flujo libre dividida entre la distancia de cada vía.
- La velocidad de flujo libre fue tomada como 15 km/h. Según el Transportation Research Board (2000) la velocidad promedio de una bicicleta en flujo libre es de 21 km/h. Sin

embargo, en este trabajo se reduce a 15 km/h para considerar la falta de ciclovías y las malas condiciones del pavimento en la Ciudad de México.

- Finalmente hacer clic en “OK” para realizar la asignación.

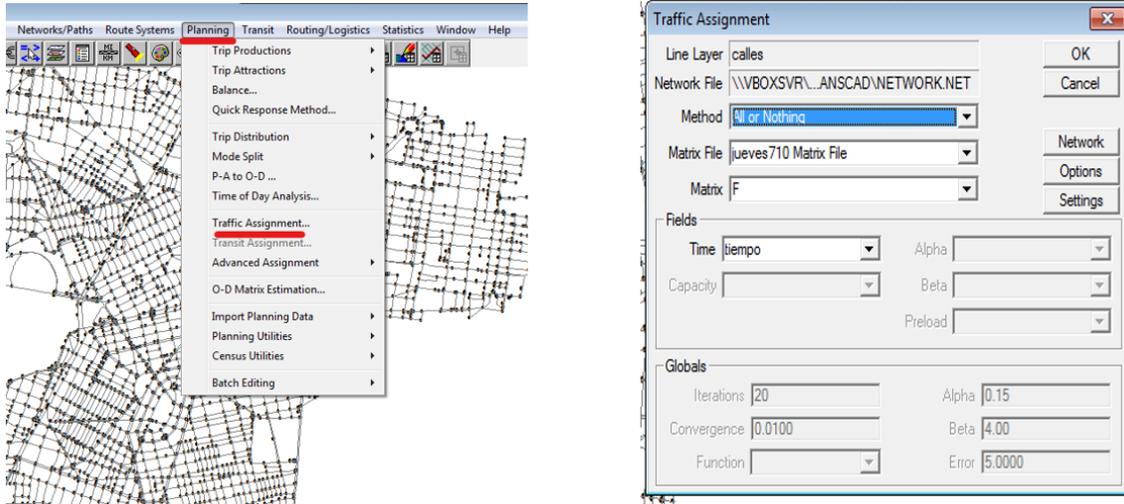


Figura 33. Captura de menú para realizar la asignación todo o nada

La Figura 34, muestra un ejemplo de los resultados de la asignación. La columna ID sirve para identificar cada enlace y la columna TOT-FLOW se refiere al flujo de bicicletas que transitan sobre cada vía durante un intervalo de tiempo dado.

ID	Length/Dir	tiempo	ID1	AB_Flow	BA_Flow	TOT_Flow	AB_Time	BA_Time	MAX_Time
1	38.89 1	9.33	1	14.6700	--	14.6700	9.3346	--	9.3346
2	18.07 1	4.34	2	22.5200	--	22.5200	4.3370	--	4.3370
3	17.27 1	4.14	3	25.6300	--	25.6300	4.1448	--	4.1448
4	152.28 1	36.55	4	31.1200	--	31.1200	36.5469	--	36.5469
5	78.41 1	18.82	5	1.5400	--	1.5400	18.8192	--	18.8192
6	80.28 1	19.27	6	7.8500	--	7.8500	19.2682	--	19.2682
7	35.13 1	8.43	7	113.8300	--	113.8300	8.4306	--	8.4306
8	19.65 1	4.72	8	8.6800	--	8.6800	4.7159	--	4.7159
9	112.52 1	27.00	9	19.0200	--	19.0200	27.0042	--	27.0042
10	106.85 1	25.64	10	23.5400	--	23.5400	25.6428	--	25.6428
14	17.55 1	4.21	14	31.1300	--	31.1300	4.2127	--	4.2127
15	97.92 1	23.50	15	22.2500	--	22.2500	23.4997	--	23.4997
16	5.51 1	1.32	16	12.5200	--	12.5200	1.3220	--	1.3220
18	25.74 1	6.18	18	12.2900	--	12.2900	6.1771	--	6.1771
19	4.39 1	1.05	19	5.2400	--	5.2400	1.0529	--	1.0529
26	176.78 1	42.43	26	4.0200	--	4.0200	42.4271	--	42.4271
29	121.49 1	29.16	29	0.0000	--	0.0000	29.1574	--	29.1574
30	133.98 1	32.16	30	0.0000	--	0.0000	32.1559	--	32.1559
31	136.89 1	32.78	31	6.6500	--	6.6500	32.7827	--	32.7827
32	142.94 1	34.30	32	10.6100	--	10.6100	34.3046	--	34.3046
40	107.20 1	25.73	40	5.7900	--	5.7900	25.7279	--	25.7279
42	104.40 1	25.06	42	18.4400	--	18.4400	25.0566	--	25.0566
43	23.01 1	5.52	43	6.8600	--	6.8600	5.5233	--	5.5233
44	108.59 1	26.06	44	5.0600	--	5.0600	26.0612	--	26.0612
45	159.22 1	38.21	45	76.9300	--	76.9300	38.2118	--	38.2118
46	119.63 1	28.71	46	81.2000	--	81.2000	28.7123	--	28.7123
47	213.44 1	51.23	47	77.8000	--	77.8000	51.2255	--	51.2255
48	110.39 1	26.49	48	77.0600	--	77.0600	26.4940	--	26.4940
49	109.53 1	26.29	49	78.2100	--	78.2100	26.2868	--	26.2868
50	95.96 1	23.03	50	61.3800	--	61.3800	23.0293	--	23.0293
51	7.31 1	1.76	51	61.4400	--	61.4400	1.7595	--	1.7595
52	90.39 1	21.63	52	65.8800	--	65.8800	21.6341	--	21.6341
53	15.54 1	3.73	53	67.9500	--	67.9500	3.7302	--	3.7302
54	14.11 1	3.39	54	67.7100	--	67.7100	3.3861	--	3.3861
55	4.29 1	1.15	55	39.8700	--	39.8700	1.1495	--	1.1495
56	89.78 1	21.55	56	40.8700	--	40.8700	21.5482	--	21.5482
57	30.46 1	7.31	57	41.0200	--	41.0200	7.3113	--	7.3113

Figura 34. Captura de resultado de asignación todo o nada para un jueves de 7 a 10 am señalando el flujo total en cada calle

Finalmente, usando la columna TOT-FLOW, se generaron mapas temáticos de flujo que muestran el volumen de bicicletas en cada calle. El mapa, que se muestra en la Figura 35, despliega el flujo de bicicletas del polígono *Ecobici* para un horario de 7 a 10 am. Las líneas rojas representan las vías con flujos de 70.1 a 140 bicicletas, las azules de 30.1 a 70, las verdes de 10.1 a 30, las negras de 1.1 a 10 y las grises de 0 a 1. En la siguiente sección se presentan los resultados y análisis de las asignaciones.

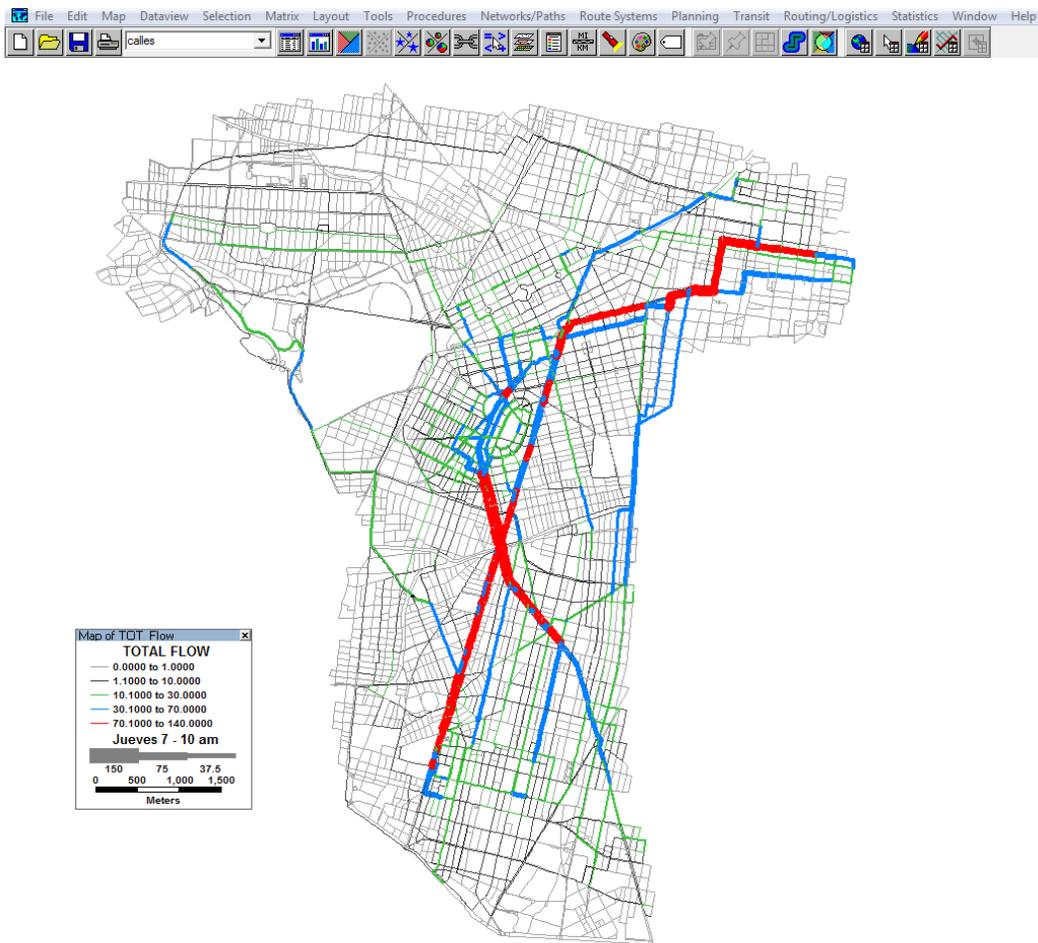


Figura 35. Captura muestra de un mapa de resultado de flujo.

## 4 RESULTADOS

El procedimiento empleado en el Capítulo 3, permitió generar 4 mapas representativos del flujo de bicicletas dentro de los horarios pico. Se demuestra a simple vista que entre cada uno de los horarios existen comportamientos distintos, lo cual permite hacer un análisis por separado y un análisis general.

En esta sección, se presentan los cuatro mapas de flujo de bicicletas en el polígono *Ecobici* obtenidos con la asignación. Cada mapa corresponde a cada horario de análisis. En la Figura 36, se muestra la asignación para los jueves de 7 a 10 am. La Figura 38 muestra la asignación para los jueves de 1 a 4 pm. En la Figura 40, se muestra el jueves de 6 a 8 pm y la Figura 42 muestra un sábado de 12 a 3 pm. En cada mapa las líneas rojas representan las vías con flujos de 70.1 a 140 bicicletas, las azules de 30.1 a 70, las verdes de 10.1 a 30, las negras de 1.1 a 10 y las grises de 0 a 1.

En los 4 mapas, se observa la misma delimitación geográfica. Un polígono delimitado por el Circuito Interior al sur, abarcando colonias como Portales, Colonia del Valle y Vertiz. El este del polígono está delimitado por Avenida Cuauhtémoc y División del norte, con colonias como la Narvarte, Roma sur y norte, Buenavista, entre otras. Al oeste, está delimitado por la avenida Revolución, se encuentran colonias como Nápoles, Condesa, Hipódromo, Escandón y Chapultepec. Finalmente, al norte, el polígono está delimitado por colonias como Polanco, Anzures, Cuauhtémoc, San Rafael, Juárez y Centro.

El mapa resultante de la asignación todo o nada para los jueves de 7 a 10 am se muestra en la Figura 36. Entre los 4 mapas, el del horario de 7 a 10 am es donde se observa mayor flujo de bicicletas en avenidas como Avenida Insurgentes, División del Norte, Chapultepec, Juárez, Calle Artículo 123 y Eje 1 Sur. Dichas avenidas están marcadas en el mapa de color rojo, lo que representa un flujo de 70.1 a 140 bicicletas. Se ven flujos menores, pero igualmente elevados en secciones de avenidas principales del polígono, como Avenida Reforma, Cuauhtémoc, algunas secciones de Insurgentes y División del Norte. Estas vías están marcadas de color azul, las cuales representan flujos entre 30.1 y 70 bicicletas.

Los flujos entre 30 y 140 bicicletas se deben a que se encuentran en zonas en donde existe una gran cantidad de oficinas y residencias o vías en donde se puede acceder a diferentes cicloestaciones.

Las vías marcadas en verde, las cuales representan un flujo de 10.1 a 30 bicicletas, se ven concentradas mayormente dentro de colonias como, Centro, Condesa y Colonia del Valle. Estos viajes pueden representar los viajes internos para recoger o dejar bicicletas que se realizan dentro de estas colonias. Este nivel de flujo, de 10.1 a 30 bicicletas, también se ve en secciones de Avenida Reforma, donde de igual forma se realizan viajes internos.

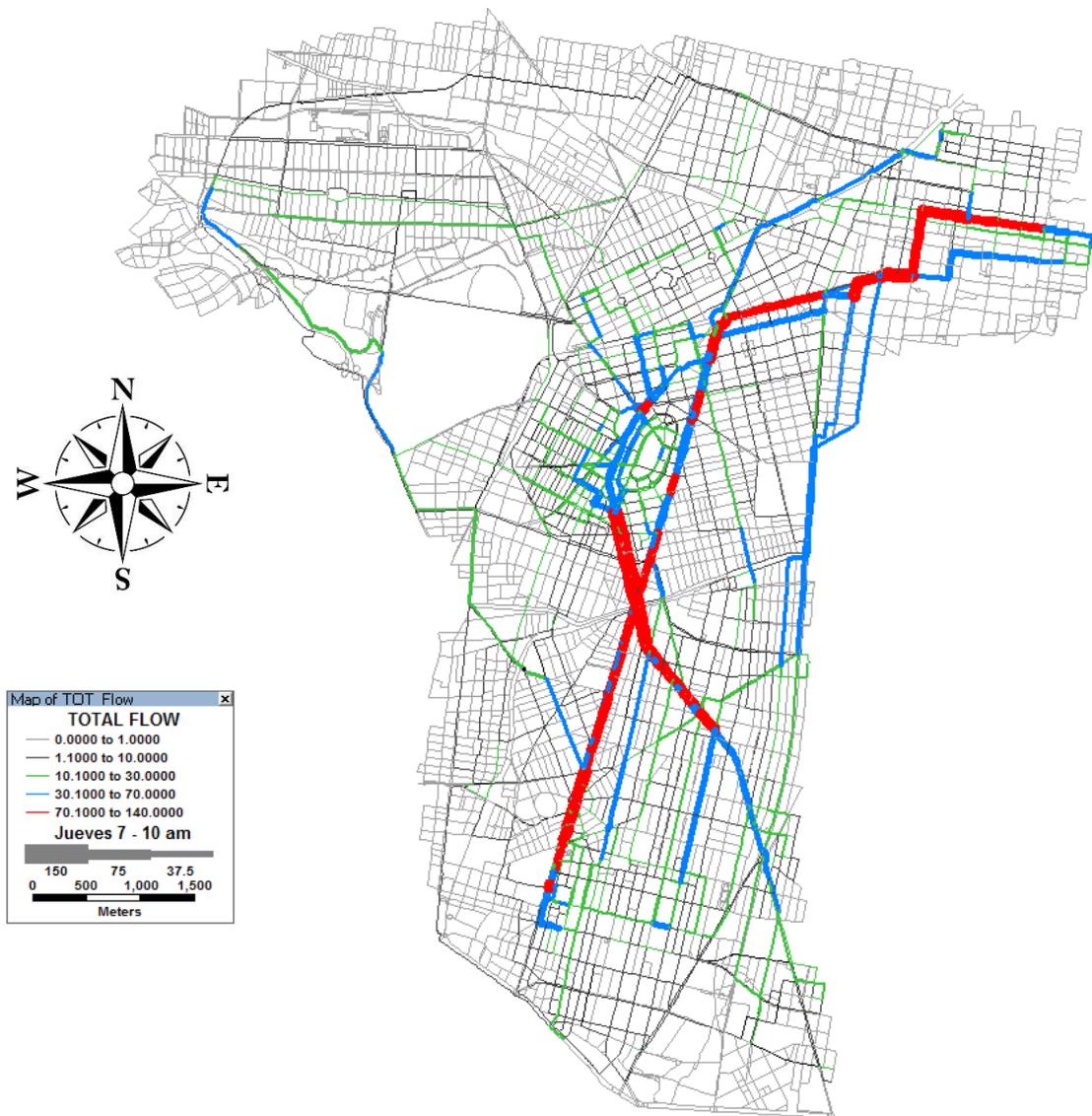


Figura 36. Asignación todo o nada para jueves de 7 a 10 am

Ya que en el horario de 7 a 10 am son las entradas laborales, el flujo es mayor en las vías que conectan mayor número de colonias y zonas de trabajo. La Figura 37 muestra un acercamiento del mapa que se muestra en la Figura 36 donde se puede ver marcada en rojo la Avenida Insurgentes Sur, a la altura de la estación de Metrobús Ciudad Deportiva. El flujo más concentrado, predomina en la dirección sur-norte, y presenta un flujo de 107 bicicletas. El flujo es más elevado en la dirección sur-norte debido a que esta dirección conecta la sección sur del polígono con la colonia Condesa, la cual, según la encuesta *Ecobici* (2020), es uno de los destinos más frecuentes.

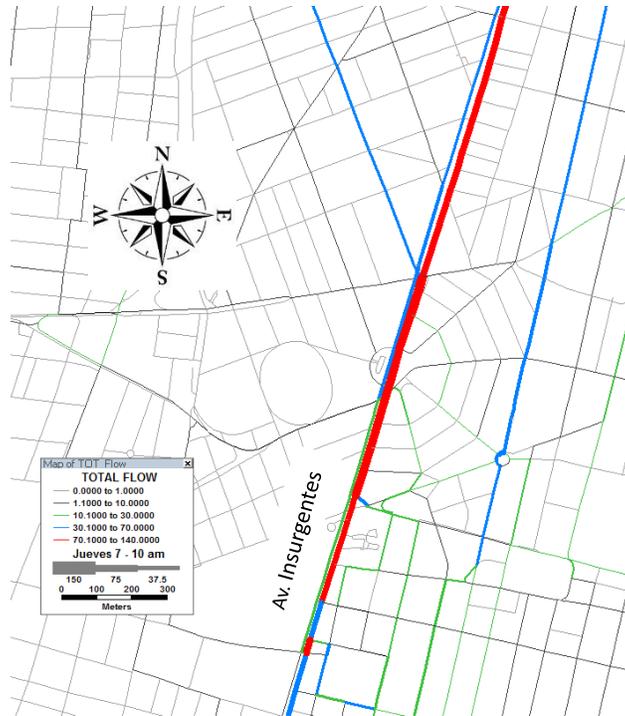


Figura 37. Sección de Avenida Insurgentes sur

El mapa resultante de la asignación todo o nada para los jueves de 1 a 4 pm se muestra en la Figura 38. Durante este horario se presentan la hora de la comida y algunas salidas laborales. Este horario presenta similitudes con el horario matutino, ya que también las avenidas Insurgentes, División del Norte, Cuauhtémoc y Calle Artículo 123 tienen flujos considerables. Sin embargo, se nota una ligera disminución de flujo en las avenidas Insurgentes y División del Norte. Ya que este horario no es de entrada ni salida laboral, lo viajes que se realizan son mayormente dentro de las colonias. Se observa un aumento de flujo dentro de colonias como Centro, Condesa o Narvarte, debido a que los viajes internos son usualmente para ir a comer.

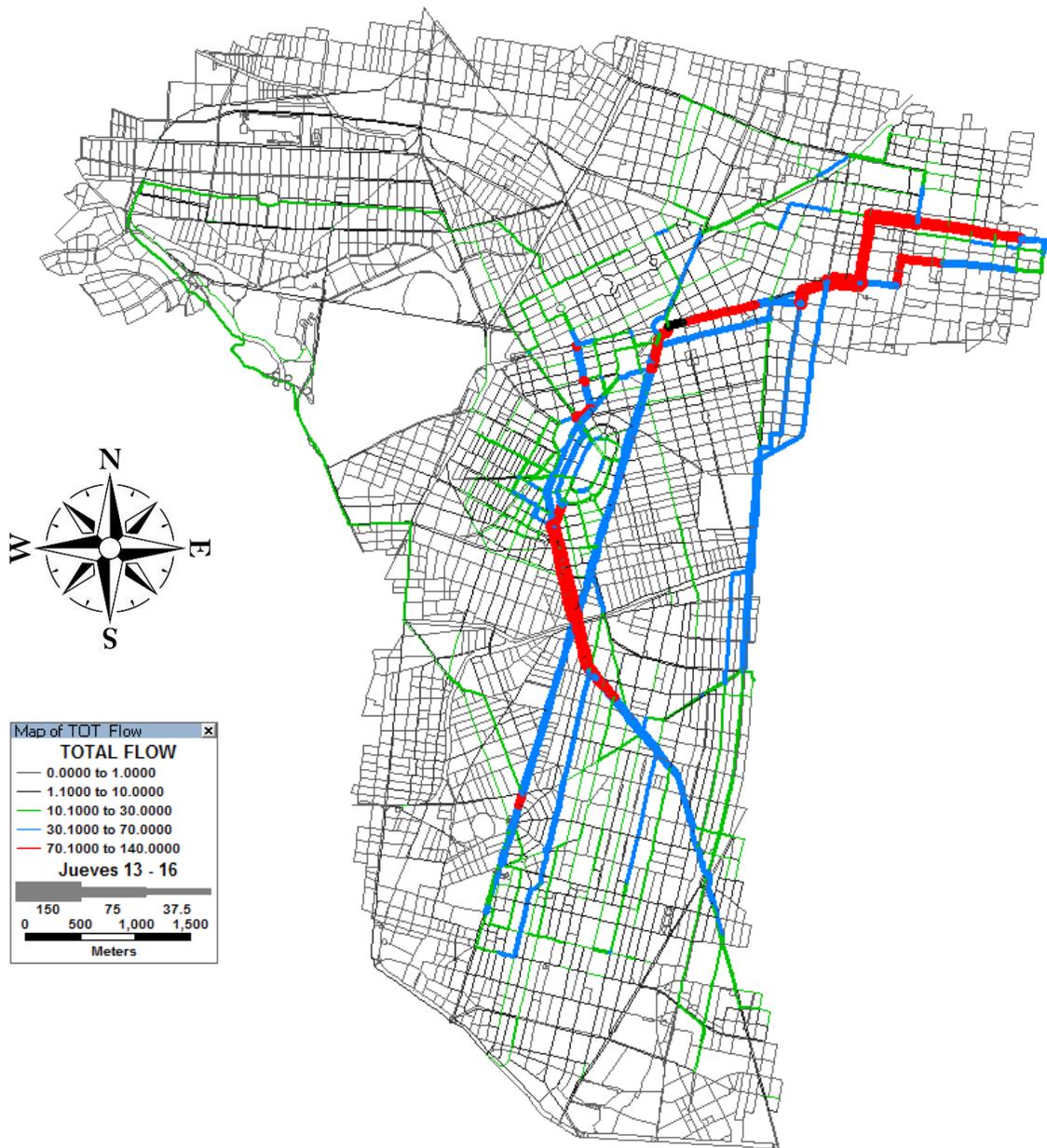


Figura 38. Asignación todo o nada para jueves de 1 a 4 pm

En la Figura 39 se muestra un acercamiento de la Figura 38 en la avenida División del Norte (marcada en rojo), a la altura de Avenida Insurgentes (marcada en azul). Se nota que esta sección de División del Norte presenta un alto flujo a la altura de Insurgentes, oscilando entre las 100 y 120 bicicletas. Este fenómeno se puede deber a que esta sección es donde comienza la colonia Condesa, donde suele haber más viajes internos en el horario de 1 a 4 pm, ya que es una zona que presenta una alta oferta de lugares para comer.

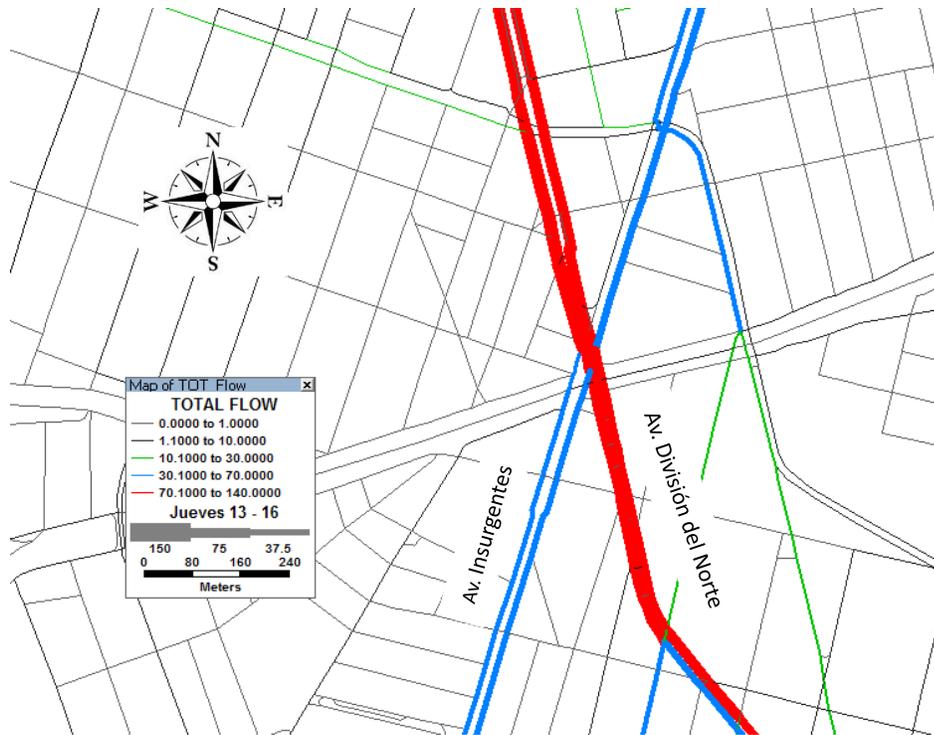


Figura 39. Sección de Avenida División del Norte en cruce con Avenida Insurgentes

El mapa resultante de la asignación todo o nada para los jueves de 6 a 8 pm se muestra en la Figura 40. En este horario, al ser comúnmente de salida laboral, se debería de observar un comportamiento similar al horario matutino, pero en dirección opuesta. Sin embargo, avenidas principales como División del Norte, Insurgentes y Chapultepec muestran un flujo menor. Esto puede indicar que las personas que usan *Ecobici* en algún tramo de su viaje al trabajo, utilizan en menor medida este sistema para sus viajes hacia el hogar.

El flujo en las avenidas con mayor flujo en el horario matutino (Insurgentes, Chapultepec y División del Norte) disminuye de 70.1-140 a 30.1-70 bicicletas en el horario nocturno. Sin embargo, el flujo aumento en avenidas como Cuauhtémoc y Coyoacán, donde se ven flujos de 70.1 a 140 pero por distancias cortas. Estos ligeros cambios del horario nocturno con respecto del matutino se pueden deber, a que, al ser de noche, los usuarios pueden optar por no realizar trayectos largos en bicicleta y utilizar otro modo de transporte.

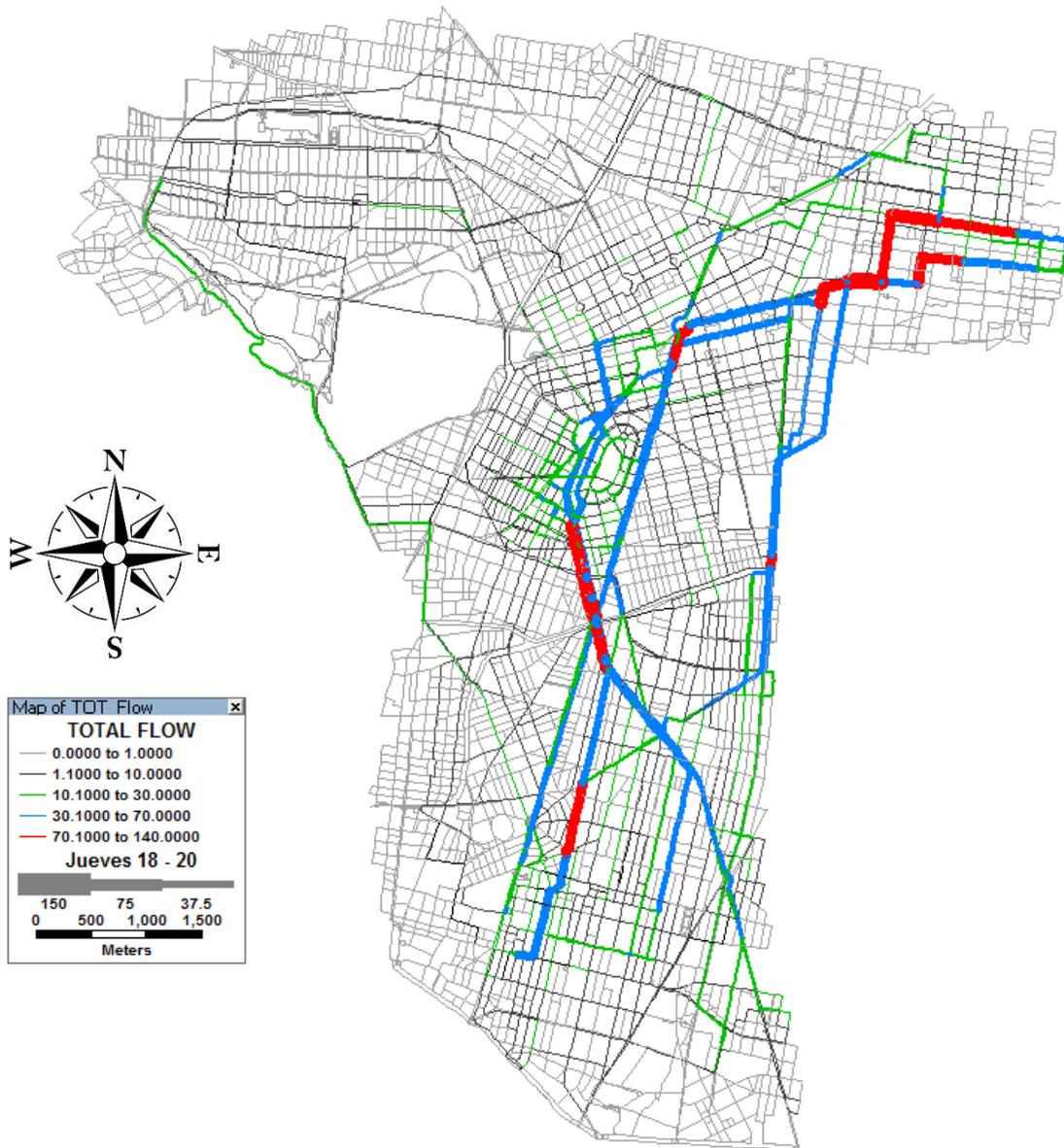


Figura 40. Asignación todo o nada para jueves de 6 a 8 pm

La Figura 41 muestra un acercamiento de la Figura 40. En esta figura se puede ver en rojo una sección de la Avenida Cuauhtémoc, sección que va en dirección norte-sur e interseca con el Viaducto Presidente Miguel Alemán (en azul). Resulta conveniente ver cómo es que esta sección, que está pasando metro Centro Médico y que es la que conecta con la colonia Narvarte, es en donde se presente mayor flujo, entre 70 a 78 bicicletas. En la Figura 41 se aprecia que hay un enlace rojo, sobre la Avenida Cuauhtémoc. Antes de convertirse en un enlace color rojo, el flujo es de 68 bicicletas, este aumento de flujo se debe a que una calle antes de Viaducto existe una vía que se integra Av. Cuauhtémoc con un flujo de 1.1 a 10 bicicletas.

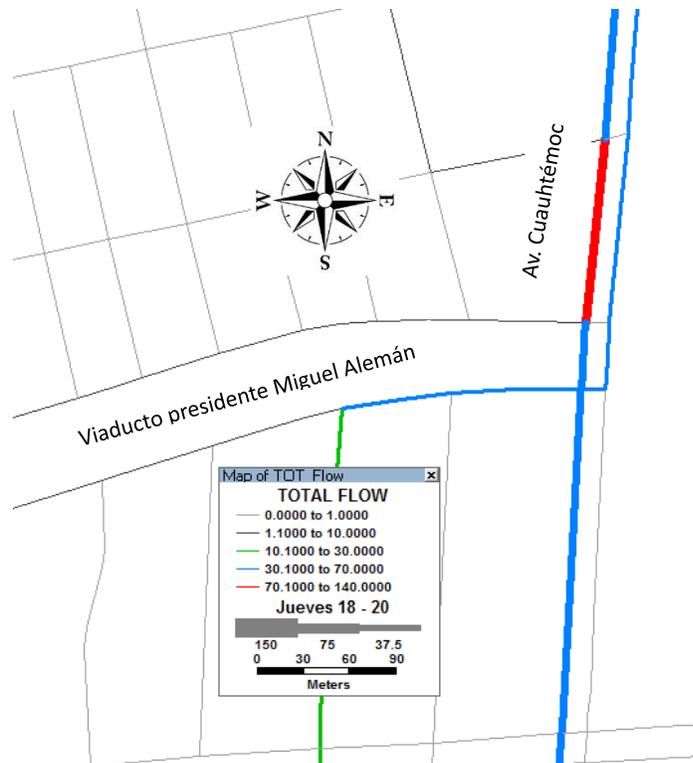


Figura 41. Sección de Avenida Cuauhtémoc en cruce con Viaducto Pte. M. Alemán

El mapa resultante de la asignación todo o nada para los sábados de 12 a 3 pm se muestra en la Figura 42. Para los días sábado se puede identificar un flujo mucho menos concentrado que el de un día hábil. El flujo concentrado de 70.1 a 140 ciclistas se ve marcado únicamente en la Colonia Centro y Avenida Cuauhtémoc. Mientras que, en las vías de otras zonas con alta concentración entre semana, como Colonia Condesa, Narvarte, Avenida Insurgentes y División del Norte, no sobrepasa un flujo de 70 bicicletas. Es un comportamiento de esperarse ya que el sábado es un día de descanso laboral para muchos trabajadores, por lo que muchas oficinas están cerradas.

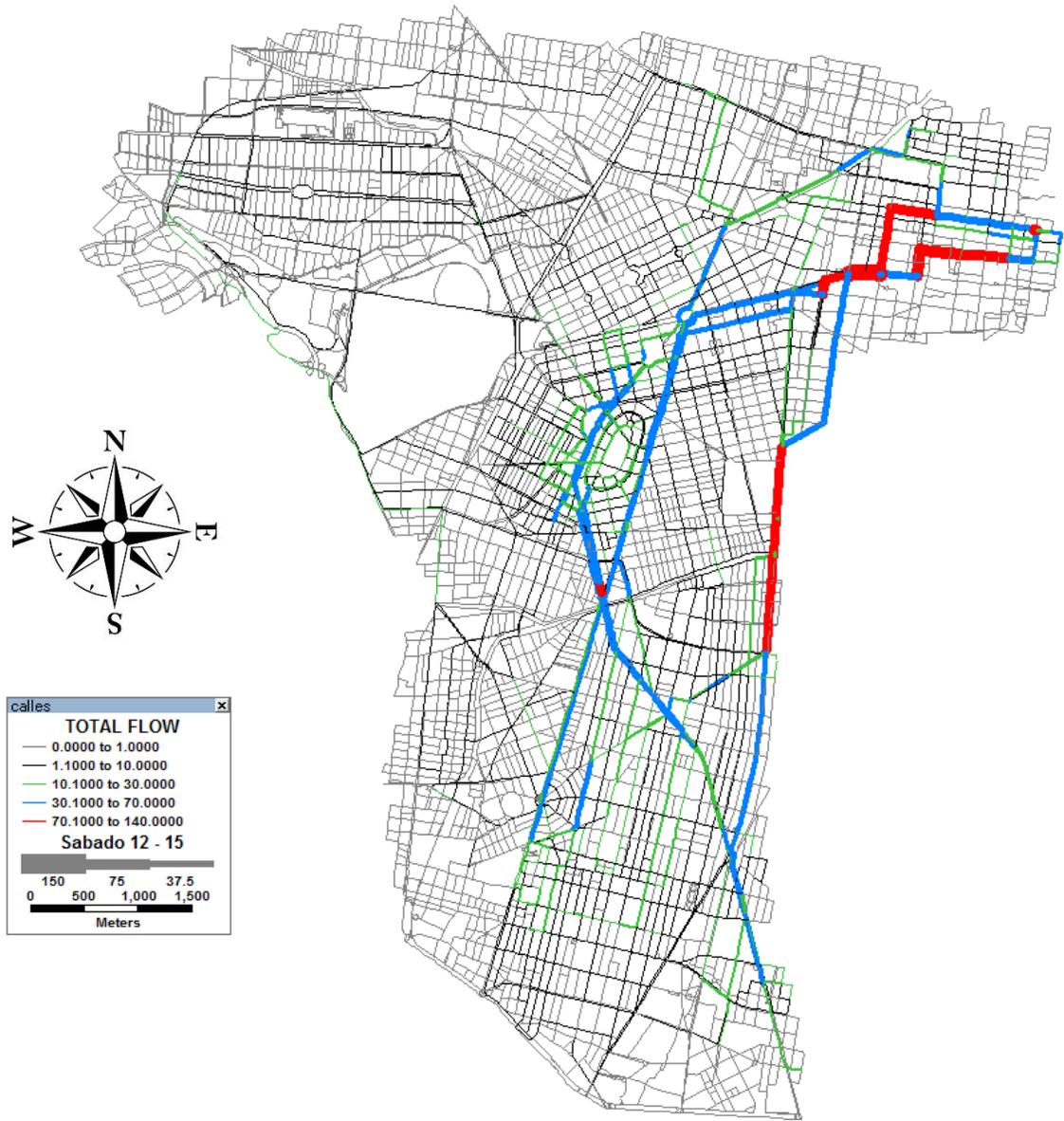


Figura 42. Asignación todo o nada para sábado de 12 a 3 pm

En la Figura 43, se puede ver una sección de la Figura 42 en la colonia centro donde la calle marcada en rojo corresponde a la Calle Artículo 123. Esta calle es de un solo sentido (oeste-este) y presenta un flujo promedio de entre 90 y 110 bicicletas. Este flujo resulta un tanto inesperado ya que no es una de las avenidas principales del centro. Sin embargo, si tiene una función útil ya que conecta Eje 1 Pte. y Eje Central.

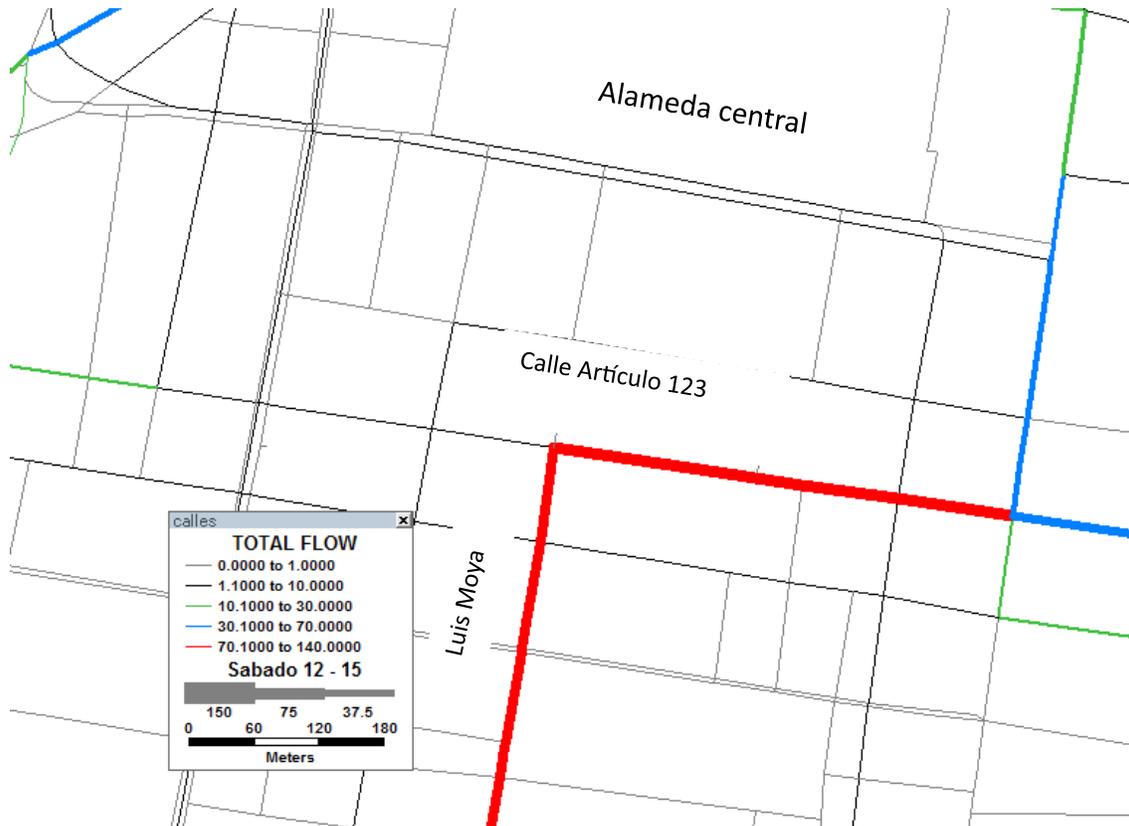


Figura 43. Sección de Colonia Centro con Calle Artículo 123 marcada en rojo.

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las avenidas que tienen mayor concentración de flujo son las que conectan más colonias y de mayor tamaño, como lo son Avenida Insurgentes, División del Norte, Cuauhtémoc, Chapultepec, Reforma, entre otras. Las colonias con mayor flujo son Colonia del Valle, Condesa, Narvarte, Hipódromo, Centro, Cuauhtémoc y Juárez.

En los 4 mapas que se presentaron en la sección anterior, se logra ver una mayor concentración de flujo en el este del Polígono de Ecobici, en particular, en la zona sureste. Por ejemplo, en la figura 44 se muestra el mapa de un jueves de 6 a 8 pm donde está señalado con un recuadro amarillo la dicha concentración en la zona sureste.

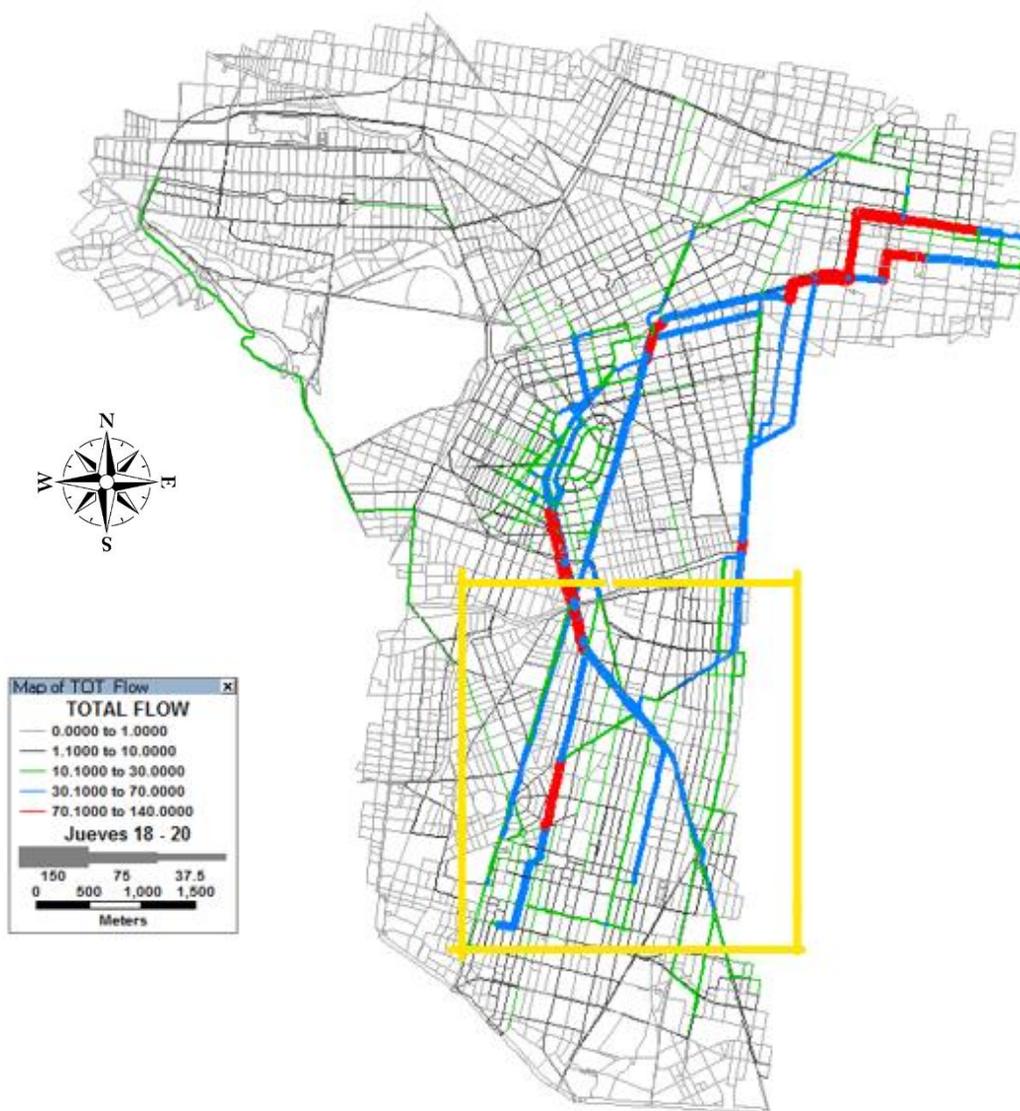


Figura 44. Mapa con sección sureste resaltada

La concentración de viajes hacia la zona sureste puede ser un indicador útil para decidir hacia donde es más conveniente expandir el polígono *Ecobici*. Resulta lógico pensar que es más conveniente expandir el sistema hacia las zonas que tienen más concentración de viajes.

Para corroborar que los resultados de la asignación representen la realidad, se realizaron aforos manuales. Estos aforos fueron realizados en 5 puntos. Se seleccionaron 3 puntos que tienen un flujo elevado según el modelo de asignación y 2 puntos de la red que cuentan con una buena infraestructura ciclista.

Las ubicaciones donde se realizaron los aforos son:

- Avenida Cuauhtémoc, dirección norte-sur en cruce con Viaducto presidente Miguel Alemán (ver cuadrado rojo en la Figura 45).

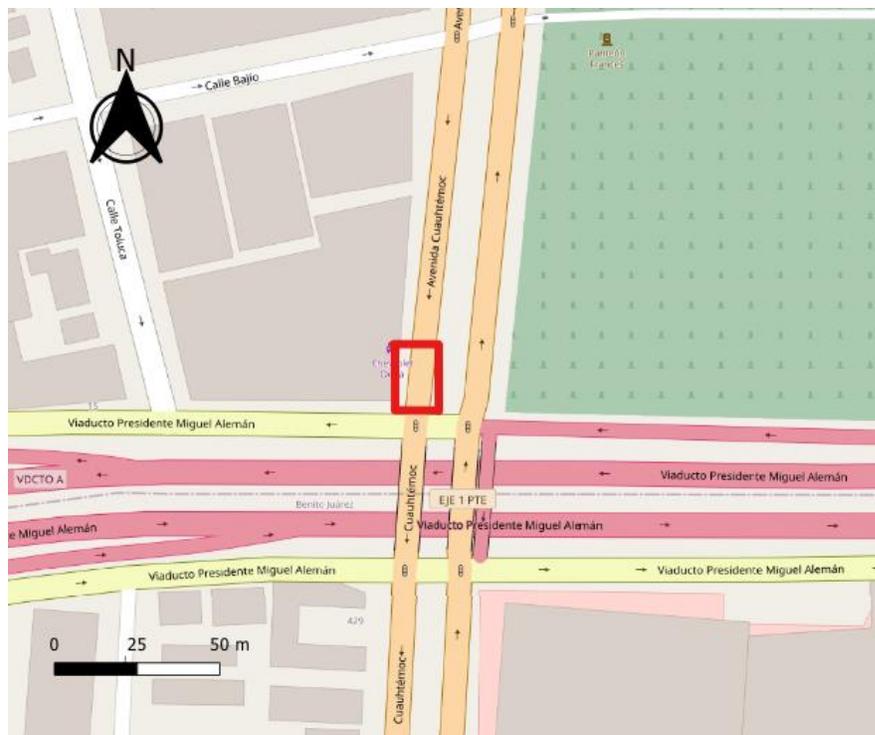


Figura 45. Sección aforada de Avenida Cuauhtémoc (OpenStreetMaps, 2023)

- Avenida Horacio, dirección oeste-este, en cruce con Calle Lope de Vega (ver cuadrado rojo en la Figura 46).

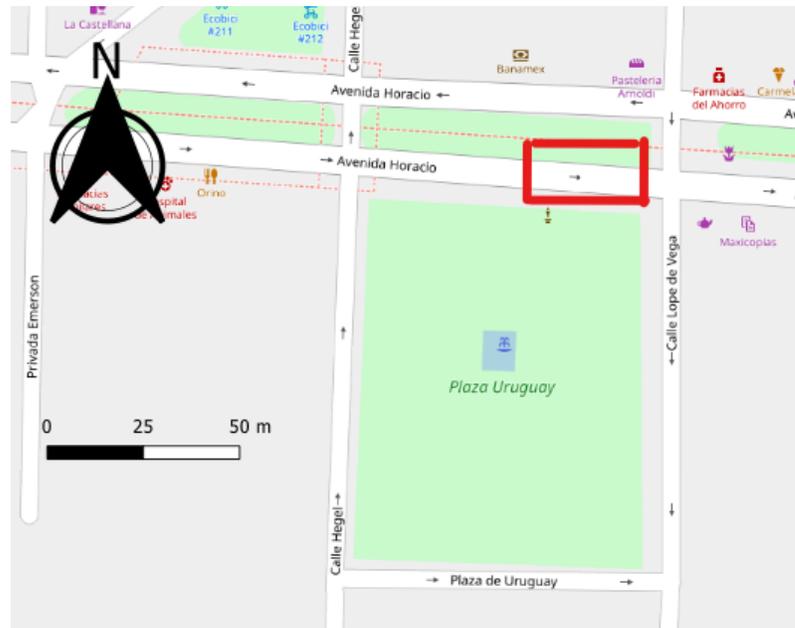


Figura 46. Sección aforada de Avenida Horacio (OpenStreetMaps, 2023)

- Avenida Insurgentes sur, dirección sur-norte a la altura de Metrobús Ciudad de los Deportes (ver cuadrado rojo en la Figura 47).

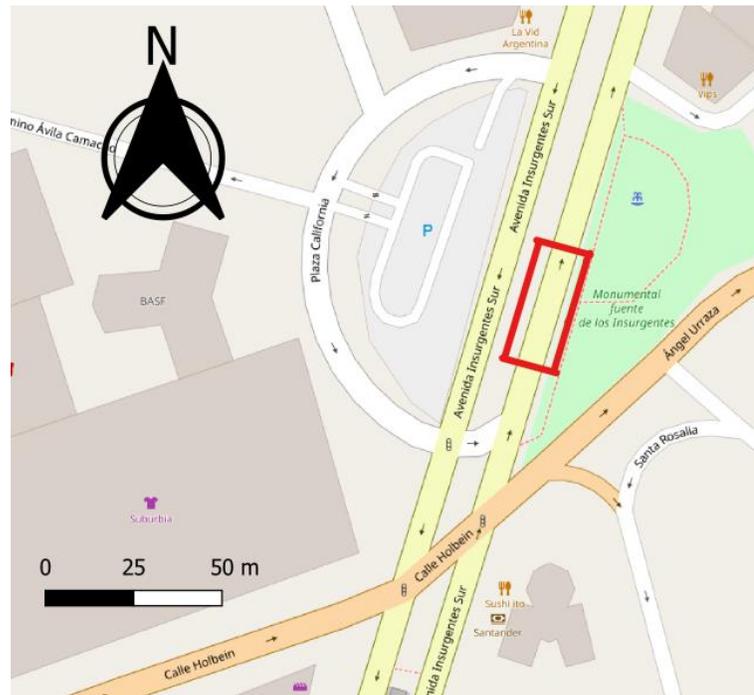


Figura 47. Sección aforada de Avenida Insurgentes (OpenStreetMaps, 2023)

- Avenida División del Norte, dirección sur-nordeste a la altura de Avenida Insurgentes (ver cuadrado rojo en la Figura 48).

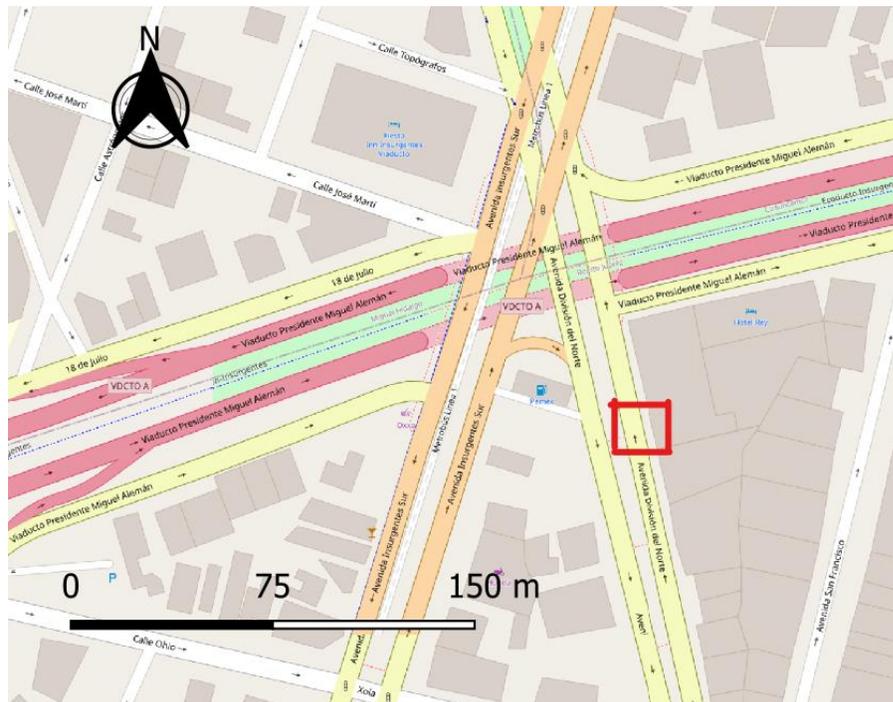


Figura 48. Sección aforada de Avenida División del Norte (OpenStreetMaps, 2023)

- Calle Artículo 123, en cruce con Calle Luis Moya (ver cuadrado rojo en la Figura 49).

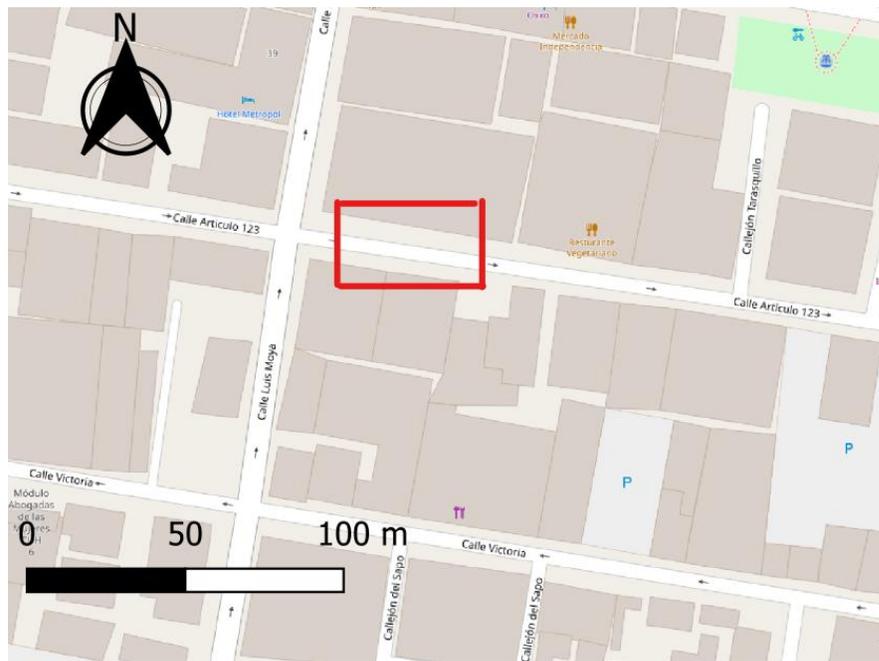


Figura 49. Sección aforada de Calle Artículo 123 (OpenStreetMaps, 2023)

Los resultados del aforo en los 5 puntos seleccionados se muestran en la Tabla 3. La primera columna de la tabla muestra el nombre de la vía aforada. La segunda columna muestra el horario de aforo. La tercera columna muestra el flujo de *Ecobicis* que resultan de la asignación todo o nada. La cuarta columna muestra el número de *Ecobicis* aforadas. La quinta columna muestra el porcentaje de error de la asignación con respecto a las bicicletas aforadas. La sexta columna muestra el flujo de bicicletas privadas aforadas. La séptima columna muestra la suma del aforo de *Ecobicis* y bicicletas privadas. La octava columna muestra la calidad de ciclovia observada. La novena columna muestra el porcentaje de *Ecobicis* con respecto al total de bicicletas aforado. Finalmente, la décima columna muestra el porcentaje de bicicletas privadas con respecto al total de bicicletas aforado.

Para denominar la calidad de la ciclovia existente se estableció la siguiente clasificación. La ciclovia inexistente es cuando la vía no cuenta con ningún elemento que contribuya al flujo seguro de bicicletas. La ciclovia excelente es la que cuenta con elementos de confinamiento, señalización en la banqueta y pintura en el pavimento que demarque la ciclovia. La ciclovia buena es la que cuenta con señalización y pintura en el pavimento mas no cuenta con elementos que confinen y brinden seguridad al flujo de bicicletas.

Vía	Horario	<i>Ecobicis</i> en el modelo	Aforo <i>Ecobici</i>	Error del modelo	Aforo Bicicleta privada	Aforo total	Calidad de ciclovia	Porcentaje de <i>Ecobicis</i>	Porcentaje de bicicletas privadas
Cuauhtémoc	Jueves 6 – 8 pm	73	67	8.96 %	113	180	Inexistente	37.22 %	62.78 %
Horacio	Jueves 1 -4 pm	23	38	39.47 %	43	81	Excelente	46.91 %	53.09 %
Insurgentes sur	Jueves 7 - 10 am	105	121	13.22 %	134	255	Excelente	47.45 %	52.55 %
División del Norte	Jueves 1 – 4 pm	113	80	29.2 %	101	181	Buena	44.2 %	55.8 %
Calle Artículo 123	Sábado 12 - 3 pm	87	16	81.6 %	96	112	Inexistente	14.29 %	85.71 %

Tabla 3. Aforo manual de bicicletas en Avenidas seleccionadas

En la Tabla 3 se observa que el error del modelo de asignación no supera el 30% para las avenidas Cuauhtémoc, Insurgentes sur y División del Norte. En la avenida Cuauhtémoc el error es del 8.96%, en la avenida Insurgentes sur del 13.22% y en la avenida División del Norte del 29.2%. En la calle Artículo 123 y Avenida Horacio el modelo no tiene tan buenos resultados como en las otras avenidas, donde hay un error de 39.47% para Horacio y de 81.6% para Calle Artículo 123.

El error en la estimación de flujo de *Ecobicis* para la Calle Artículo 123 es grande. Durante el aforo se observó que el flujo de bicicletas en esta colonia es algo diferente a las demás. En el Centro hay muchas calles paralelas que tienen la misma dirección. Además, se observó que los viajes que pasan por esta zona se realizan en vías paralelas (a Artículo 123) que cuentan con una mejor calidad de ciclovia. Tal es el caso de la Avenida Juárez, que cuenta con una ciclovia en perfecto

estado y un flujo estimado de 10 bicicletas. En esta zona falla la asignación, pues los usuarios no usan la ruta más rápida si no la más segura (la que cuenta con ciclovía).

El modelo de asignación presentado no considera preferencias por calidad de ciclovías. Sin embargo, ya que en otros puntos de la red el error de la asignación es pequeño, es lógico suponer, que sería un éxito la implementación de una ciclovía en la Calle Artículo 123. Ya que esta calle tiene la mejor conexión con los destinos más frecuentes.

La Avenida Cuauhtémoc no cuenta con ciclovía implementada y el error de la asignación es pequeño. Este caso es diferente al de la Calle Artículo 123, debido a que la Avenida Cuauhtémoc es amplia, conecta la Colonia Roma Sur y la Colonia Del Valle y no cuenta con vías paralelas como alternativa. El implementar una ciclovía en esta Avenida sería benéfico para los usuarios ya que su flujo es considerable y no cuenta con alternativas más seguras para llegar a los destinos que están al sur del polígono.

El error de la asignación en Avenida División del Norte se puede considerar aceptable, es solo del 29%. La sección aforada de esta avenida cuenta con una ligera pendiente en subida y sin elementos de confinamiento. Esta avenida se ubica en la Colonia del Valle, que tiene una amplia red de ciclovías. Por lo tanto, los usuarios pueden optar por transitar vías alternativas que tengan la misma dirección que División del Norte, pero sin pendiente y mayor seguridad.

Para el caso de Avenida Insurgentes el modelo tiene un error del 13.22%. Para Avenida Horacio un error del 39.47%. En estas avenidas están subestimados los flujos. El error es bajo en insurgentes pues es una vía que, además de ser la opción más rápida para los viajes en esta zona, cuenta con ciclovía. El error es un poco más alto en Horacio, pues a pesar de no ser la opción más rápida para los viajes en esta zona, tiene muy buena infraestructura que atrae ciclistas.

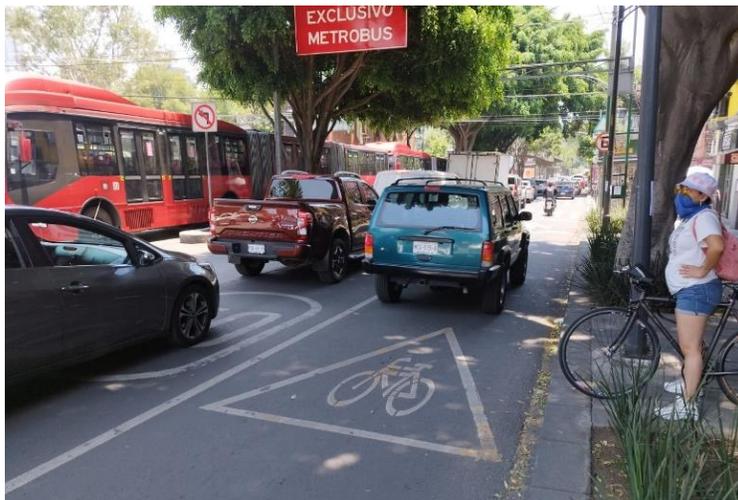
En la Tabla 3 se observa que, en vías con ciclovía implementada, el flujo de bicicletas privadas aforadas es similar al flujo aforado de *Ecobici*. Tal vez es posible extrapolar de alguna forma el resultado del modelo de asignación y estimar también el flujo total de bicicletas dentro del polígono *Ecobici* para aquellas vías que cuenten con ciclovías. Sin embargo, más estudios son necesarios para saber cómo realizar correctamente esta extrapolación.

Por otro lado, se realizó un estudio de campo para hacer una inspección de la infraestructura ciclista que existe en las inmediaciones de las avenidas aforadas. Para la Avenida Insurgentes Sur a la altura del Metrobús Ciudad Deportiva dirección sur-norte se estima un flujo promedio de 78 bicicletas durante las horas pico. Se puede observar, en la Figura 50, que esta sección de Insurgentes Sur cuenta con infraestructura ciclista desarrollada. Tiene una ciclovía confinada en ambos sentidos y suficiente señalización. Aunque la ciclovía está bien implementada, el pavimento cuenta con desgaste e irregularidades que podrían mejorarse. En algunas secciones el pavimento cuenta con grietas y desniveles debido a las raíces de los árboles en la banqueta.



*Figura 50. Sección de ciclovía en avenida Insurgentes sur dirección sur-norte*

En Avenida Insurgentes, entre Avenida Álvaro Obregón y Avenida Reforma, en la colonia Roma Sur, existe un tramo donde no se encuentra ningún tipo de infraestructura ciclista. Este tramo es difícil de transitar para los ciclistas, y tiene un flujo estimado promedio de 74 bicicletas. En la Figura 51 podemos ver una fotografía de dicha zona.



*Figura 51. Avenida Insurgentes sur en la colonia Roma Sur*

Para el caso para la Avenida Horacio, y la mayor parte de la Colonia Polanco, se cuenta con una buena infraestructura ciclista en ambos sentidos, existe la señalización adecuada y una ciclovía confinada en buen estado. Existe señalización en el pavimento y en la banqueta. En la Figura 52 se muestra una fotografía de la infraestructura ciclista que se encuentra a lo largo de toda la Avenida y en la mayor parte de la colonia. El flujo estimado promedio en esta avenida es de solo 21 bicicletas. Sería ideal implementar esta calidad de ciclovías en avenidas que cuenten con un mayor flujo.



*Figura 52. Sección de ciclovía en Av. Horacio en la colonia Polanco*

La Avenida División del Norte a la altura de Avenida Insurgentes, como se muestra en la Figura 53, cuenta con una ciclovía convencional en ambos sentidos. Según el modelo de asignación, esta avenida tiene un flujo estimado promedio de 103 bicicletas en cada sentido en horas pico. Ya que la demanda en esta avenida es alta sería de mucha utilidad una infraestructura ciclista en estado óptimo y elementos de confinamiento que brinden suficiente seguridad para los usuarios ciclistas.



*Figura 53. Sección de ciclovía en Avenida división del Norte en la colonia Del Valle*

Para el caso de la colonia Centro, existen varias vías que cuentan con infraestructura ciclovial adecuada. Por ejemplo, la Avenida Juárez (ver Figura 54) cuenta con una ciclovía confinada y buena señalización. Según el modelo de asignación esta avenida cuenta con un flujo estimado promedio de 10 bicicletas. Al ser esta calle paralela a Artículo 123, es posible que el flujo real de bicicletas sea mayor, debido a la seguridad que brinda la ciclovía.



Figura 54. Ciclovía en Avenida Juárez en la colonia Centro

Según el modelo de asignación el Eje Central (ver Figura 55) cuenta con un flujo estimado promedio de 38 bicicletas. Este eje cuenta con una ciclovía compartida con el transporte público en ambos sentidos. Esta ciclovía compartida tiene una señalización adecuada en el pavimento, pero se podría implementar mejor señalización en la banqueta.



Figura 55. Ciclovía en Eje Central en la colonia Centro

Según el modelo de asignación en la calle Artículo 123 (ver Figura 56) circulan en promedio 94 bicicletas en horas pico. Esta calle es de un solo sentido y no cuenta con una ciclovía. La calle Independencia (ver Figura 57), tiene un flujo estimado promedio de 9 bicicletas. Esta calle es paralela a la calle Artículo 123 en sentido opuesto y tiene las mismas dimensiones. La calle Independencia tiene una ciclovía implementada de forma correcta, es posible que el flujo real de bicicletas sea mayor al estimado.

El flujo promedio estimado en el modelo de asignación de la calle Artículo 123 es superior al de la calle Independencia. Es posible que Artículo 123 atrayera más viajes si tuviera mayor seguridad, ya que por esta calle está la ruta más corta de muchos usuarios que transitan por esta zona. Por lo tanto, hubiese sido mejor opción para los ciclistas implementar una ciclovía en calle Artículo 123 en lugar de Independencia.



*Figura 56. Calle Artículo 123 en la colonia Centro*



*Figura 57. Ciclovía en calle Independencia en la colonia Centro*

En colonia Centro, el Eje 1 Pte. con dirección norte-sur, es una avenida que cuenta con flujo estimado promedio de 27 bicicletas en horas pico y no cuenta con infraestructura ciclista. Al igual que Avenida Insurgentes o Eje central, Eje 1 Pte. es una avenida con alto flujo de transporte público. Aunque, en el Eje 1 Pte. no se implemente una ciclovía, podría implementarse una

señalización que permita que las bicicletas compartan la vía, de forma más segura, con el transporte público. En la Figura 58, se puede observar una fotografía donde se muestra una sección de Eje 1 Pte. a la altura de calle Ayuntamiento.



*Figura 58. Eje 1 en la colonia Centro*

Continuando por Eje 1 Pte. en dirección norte-sur, se convierte en Avenida Cuauhtémoc. A partir de este punto no existe una ciclovía implementada. Las bicicletas transitan por el carril de la derecha o por el carril del Metrobús, pero sin ninguna señalización ni elementos que confinen su flujo. En la Figura 59, se muestra una sección de la avenida Cuauhtémoc a la altura de Viaducto Presidente Miguel Alemán. Esta sección no cuenta con ciclovía y tiene un flujo estimado promedio de 73 bicicletas en sus horas pico en dirección norte-sur. Debido a su alto flujo sería ideal implementar una ciclovía en esta vía.



Figura 59. Avenida Cuauhtémoc cruce con Viaducto Pte. M. Alemán

En la Figura 60 se puede ver otra sección de Avenida Cuauhtémoc (a la altura de Centro Médico) donde sucede lo mismo; se estima un alto flujo de *Ecobicis* y no hay ciclovías. Esta sección tiene un flujo estimado promedio de 69 bicicletas en sus horas pico para ambos sentidos. Para ser una avenida con un flujo ciclista tan elevado, sería bastante conveniente el implementar una ciclovía confinada o convencional.



Figura 60. Avenida Cuauhtémoc colonia Roma Sur

## 6 CONCLUSIÓN

El objetivo de este trabajo fue realizar una asignación de tránsito de bicicletas dentro del polígono *Ecobici* utilizando el criterio todo o nada. La asignación propuesta sirve para estimar el flujo de bicicletas *Ecobici* y tener un entendimiento del comportamiento de los usuarios; por donde circulan y la concentración del flujo en diferentes puntos de la red. Este entendimiento permite hacer propuestas de mejora y expansión del sistema *Ecobici*.

Cabe destacar que no existe en la literatura una estimación de flujo dentro del polígono *Ecobici*. Por lo que el desarrollo de este trabajo es original y permite obtener resultados que sirven para evaluar la infraestructura ciclista en función de su uso y entender por dónde se mueven los usuarios de *Ecobici* dentro del polígono.

En esta investigación se encontró que las colonias Narvarte, Centro, Condesa, Colonia del Valle, e Hipódromo tienen un gran flujo de viajes en *Ecobici*. Mientras que las avenidas Insurgentes Sur, División del Norte, Calle Artículo 123 y Cuauhtémoc, tienen el mayor flujo de viajes en *Ecobici*.

Aunque en avenidas como Insurgentes u Horacio existe buena infraestructura ciclista, en otras partes del polígono *Ecobici* hay oportunidades de mejora. Existen zonas donde la implementación de infraestructura sería ideal, ya que cuentan con un flujo ciclista elevado. Se infiere que sería conveniente hacer mejoras a la infraestructura ciclista en las avenidas Cuauhtémoc, División del Norte y Calle Artículo 123.

Con la realización de aforos manuales, se logró notar que algunas vías con mejor infraestructura ciclista atraen un mayor número de viajes que los que estima el modelo, tal es el caso de avenida Horacio. Para las vías que no cuentan con infraestructura de ciclovías en zonas donde existen rutas alternas con ciclovía, se notó que el flujo aforado es menor al estimado por el modelo de asignación, tal es el caso de la calle Artículo 123. Lo anterior puede ser un indicativo, de que los usuarios optan por transitar en vías con mejor calidad de ciclovías, aunque tomar dichas rutas no represente el camino más rápido. Las ciclovías sirven para promover la movilidad de bicicleta creando entornos amigables para los ciclistas y así fomentar un transporte sostenible.

La asignación tiene errores bajos en vías que, aparte de ser las más rápidas entre los pares origen-destino, también cuentan con buena infraestructura ciclista. Como lo es el caso de avenida Insurgentes y División del Norte. La asignación tiene estimaciones muy aproximadas a la realidad en vías con estas características.

Para la avenida Cuauhtémoc, la asignación también tiene un error muy bajo. Esta avenida no cuenta con ciclovía ni vías alternas, pero si representa la opción más rápida para múltiples viajes. Por lo tanto, es posible que el modelo de asignación calcule buenas estimaciones de flujo en las vías dentro de zonas que no cuentan con buena infraestructura ciclista.

Por otra parte, resultados de esta asignación ayudan a señalar las vías en las que se debe implementar infraestructura ciclista. Si en una vía se estima un flujo elevado, es porque es la mejor opción en términos de tiempo. Además, si esta vía no cuenta con ciclovías, es probable que

el flujo real este por debajo del estimado, pues, en caso de existir ciclovías en rutas alternas, los usuarios preferirán usar estas vías. Esto no descarta el hecho de que implementar ciclovías en vías con flujos estimados altos sea benéfico para los ciclistas.

Se observó, mientras se realizaban los aforos de bicicletas privadas y *Ecobici*, que ambas tienen un comportamiento parecido en algunas ocasiones. Por ejemplo, en vías con ciclovía implementada, el número de bicicletas privadas con respecto al total de bicicletas se mantiene muy cerca del 50%. Analizar el flujo de bicicletas *Ecobici*, podría servir en ciertos casos como un aproximado para entender el flujo de bicicletas privadas, en vías que cuenten con buena infraestructura ciclista. Sin embargo, es necesario hacer más estudios o tomar otros datos que nos ayuden a entender si existe una relación entre el flujo de *Ecobicis* y el de bicicletas privadas.

Tomando en cuenta todo el polígono *Ecobici*, se nota una mayor carga de flujo en la sección este del polígono; tanto en la parte central-este (Colonia Centro), como en la parte sureste, (Colonia del Valle y Narvarte). Considerar esta carga de flujo es importante, pues a partir de esta información, se puede argumentar a favor de expandir el polígono a hacia el este y sureste de la Ciudad de México.

A principios de 2023, comenzó una expansión hacia el norte y sur del polígono. Esta expansión cumple parcialmente con las conclusiones de este trabajo, pues el modelo de asignación estima que la parte sur del polígono presenta más demanda que otras zonas. La parte norte del polígono presenta poco flujo según los resultados del modelo de asignación, por lo que podría ser de mayor utilidad que se dirigiera hacia el este la expansión del 2023.

Al considerar las limitaciones de este trabajo, el enfoque de "todo o nada" asume que los usuarios siempre elegirán la ruta más rápida en términos de tiempo. Esto puede sobre estimar flujos en vías que carecen de ciclovía, debido a ser la opción más rápida. Por otra parte, puede subestimar flujos en vías que no sean parte de rutas más rápidas pero que cuenten con ciclovías implementadas. Hay vías que cuentan con ciclovías implementadas que, si bien no son la opción más rápida, son muy utilizadas debido a su seguridad.

El modelo de asignación todo o nada, presentado en esta tesis, está limitado a ciudades como la Ciudad de México donde no existe congestión de bicicletas. Por lo tanto, esta asignación puede ser útil para ciudades específicas, pero no se puede generalizar. También, se tomó una velocidad promedio 15km/h para todas las vías, sería conveniente, en trabajos futuros, hacer un estudio de campo con velocidades promedio de cada calle para así mejorar las estimaciones de la asignación.

Los aforos a pequeña escala presentan una limitante para la validación y corrección del modelo. Se necesita un equipo de trabajo más grande para realizar un aforo a mayor escala. Los datos recabados en aforos de mayor escala ayudarían a construir un modelo de asignación con errores más pequeños.

Como línea de investigación se recomienda mantenerse actualizado con respecto a los viajes y tamaño del sistema *Ecobici*. Se pueden continuar haciendo estimaciones de flujo en función del crecimiento del polígono. Se propone, en trabajos futuros, realizar una asignación de flujo utilizando un modelo de asignación multicriterio (Ryu et al., 2020) donde se consideren múltiples factores como la calidad o existencia de ciclovía, seguridad y pendientes. Otra línea de investigación sería considerar una asignación estocástica, en donde los flujos de un origen a un destino se distribuyan en múltiples rutas y el volumen asignado a cada ruta dependa de la probabilidad de que la ruta sea elegida o no (Nielsen, 2000).

## 7 REFERENCIAS

- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2011). Linear programming and network flows. (4ta Ed.) Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons.
- Boucadair, M. (2015). Handbook of research on redesigning the future of Internet architectures. Estados Unidos de América: IGI Global.
- Caliper (2023). Documentación oficial de TransCAD. Consultado el 4 de marzo de 2023 en: <http://www.caliper.com/transcad>
- Caliper (2023a). What is Traffic Assignment, Mapping Software and GIS Glossary. Consultado el 21 de septiembre de 2023 en: <https://www.caliper.com/glossary/what-is-traffic-assignment.htm>
- Chen, A., Zhou, Z., & Bekhor, S. (2012). C-logit stochastic user equilibrium model: formulations and solution algorithm. *Transportmetrica*, 8(1), 17-41.
- de Buen, K. R. (2021). Can't drive today? The impact of driving restrictions on bikeshare ridership in Mexico City. *Transportation research part D: transport and environment*, 91, 102652.
- Ortúzar, J., & Willumsen, L. G. (2011). Modelling transport. Chichester, Inglaterra. John Wiley & sons.
- Ecobici (2020), Encuesta ECOBICI 2020. Secretaria de Movilidad de la Ciudad de México consultado el 25 de abril de 2023 en: <https://ecobici.cdmx.gob.mx/encuestas-y-estudios-de-uso/>
- Ecobici (2022), Biciestacionamientos. Secretaria de Movilidad de la Ciudad de México. Consultado el 29 de septiembre de 2023 en: <https://www.semovi.cdmx.gob.mx/tramites-y-servicios/bicis-y-parquímetros/bicicletas/biciestacionamiento-y-cicloviás/informacion-biciestacionamientos>
- Ecobici (2022a), Conoce Ecobici. Secretaria de Movilidad de la Ciudad de México. Consultado el 10 de mayo de 2023 en: <https://ecobici.cdmx.gob.mx/conoce-sistema/>
- Ecobici (2022b). Cicloviás. Secretaria de Movilidad de la Ciudad de México. Consultado el 25 de septiembre de 2023 en: <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/cicloviás/>
- EcuRed (2023) Algoritmo de Dijkstra. Consultado el 19 de septiembre de 2023 en: [https://www.ecured.cu/Algoritmo\\_de\\_Dijkstra](https://www.ecured.cu/Algoritmo_de_Dijkstra)
- Gallego, J. G., Labrador, E. R., Cabanillas, F. J., & Pintor, J. P. (2013). Diseño de un modelo de asignación de viajes con aplicaciones SIG para la gestión de planes de movilidad urbana sostenibles en ciudades medias. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (13\_1), 1-21.
- Hall, F. L. (1996). Traffic stream characteristics. *Traffic Flow Theory*. US Federal Highway Administration, 36.

- Hernández García, S., Devesa Varas, H. D., Torres Vargas, G., Cruz González, G., Arroyo Osorno, J. A., & González García, J. A. (2020). Guía para la ejecución de trabajos de campo para la determinación de la oferta y la demanda de los estudios de tránsito para el transporte carretero. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica, (581). Sanfandila Querétaro.
- López, R. P. (2013). El sistema de bicicletas públicas" Ecobici": del cambio modal al cambio social. *Espacialidades*, (5), 104-124.
- Márquez, H. R. G., Bracho, R. L., & Ramirez-Nafarrate, A. (2021). A simulation-optimization study of the inventory of a bike-sharing system: The case of Mexico City Ecobici's system. *Case Studies on Transport Policy*, 9(3), 1059-1072.
- Martínez C. (2014) Guía de Diseño Urbano de Ciclovías: Consejos de NACTO para un ciclismo urbano eficiente y seguro. Plataforma urbana. Consultado el 4 de marzo de 2023 en: <https://www.plataformaurbana.cl/archive/2014/10/03/guia-de-diseno-urbano-de-ciclovias-consejos-de-nacto-para-un-ciclismo-urbano-eficiente-y-seguro/>
- Martínez, G., Benitez, S., & Guzmán, A. (2022). Visualization of the Regular Mobility of Trips Between Bike Stations in the ECOBICI System. In *International Congress of Telematics and Computing* (pp. 76-99). Cham: Springer International Publishing.
- Meyer, M. D. (2016). *Transportation planning handbook*. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons.
- Moncayo Martínez, L. A. (2020). Analysing Data Set of the Bike-Sharing System Demand with R Scripts: Mexico City Case. In *Intelligent Systems and Applications: Proceedings of the 2019 Intelligent Systems Conference (IntelliSys) Volume 2* (pp. 90-105). Springer International Publishing.
- Moreno Quintero, E., Rico Galeana, Ó., & Bustos Rosales, A. (2014). *Funciones Volumen-Demora en la Modelación de Flujos Vehiculares*. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica No. 427. Sanfandila Querétaro.
- National Association of City Transportation Officials (2023). *Urban Bikeway Design Guide*. Consultado el 10 de marzo de 2023 en: <https://nacto.org/publication/urban-bikeway-design-guide/bike-lanes/>
- Nielsen, O. A. (2000). A stochastic transit assignment model considering differences in passengers utility functions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(5), 377-402.
- Ortiz, P. R. B. (2017). *Análisis macroscópico de la movilidad en bicicleta en la ciudad de Sevilla*. Tesis de Grado de Ingeniería Civil. Universidad de Sevilla.
- PBSC Urban Solutions (2022) "¿Qué es un sistema de bicicletas compartidas y cómo funciona?", consultado el 3 de abril de 2023 en: <https://www.pbsc.com/es/blog/2022/01/what-is-a-bike-share-program-and-how-does-it->

