



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

ANÁLISIS DE NIVELES DE SERVICIO MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO HCM: ESTUDIO DE CASO MEGAMAXI CUENCA

Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniera Civil

Autor:

Denisse Andrea Molina Toledo

Director:

Diego Estuardo Correa Barahona

ORCID:  0000-0003-3551-5875

Tutor:

René Gustavo Estrella Maldonado

ORCID:  0000-0001-5871-6982

Cuenca, Ecuador
2024-09-24

Resumen

El estudio "Análisis de niveles de servicio mediante la aplicación del método HCM: Estudio de caso Megamaxi Cuenca" se centra en evaluar el impacto del centro comercial Megamaxi Wayra en la dinámica del tráfico vehicular en la Av. 24 de Mayo y sus alrededores en Cuenca, Ecuador. Utilizando conteos vehiculares manuales y automáticos, se analizaron los cambios en el flujo vehicular y los niveles de servicio antes y después de la apertura del centro comercial. La metodología empleada incluyó el cálculo del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA), la creación de matrices origen-destino y el uso del software de simulación SUMO para modelar diferentes escenarios de tráfico. Además, se evaluaron las fases semafóricas, la geometría de las intersecciones y la dinámica del parqueadero. El estudio identificó las condiciones operativas de las vías y subrayó la importancia de una planificación y gestión del tráfico adecuadas en áreas urbanizadas. Este análisis proporciona una base para futuras intervenciones viales y ofrece herramientas valiosas para los planificadores urbanos y autoridades de tránsito, facilitando la toma de decisiones informadas para mejorar la movilidad y reducir la congestión en la zona del Megamaxi Wayra.

Palabras clave del autor: flujo vehicular, simulación de tráfico, capacidad vial



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The study "Analysis of Service Levels Using the HCM Method: Case Study Megamaxi Cuenca" focuses on evaluating the impact of the Megamaxi Wayra shopping center on the traffic dynamics in Av. 24 de Mayo and its surroundings in Cuenca, Ecuador. Using manual and automatic vehicle counts, changes in traffic flow and service levels were analyzed before and after the opening of the shopping center. The methodology employed included calculating the Annual Average Daily Traffic (AADT), creating origin-destination matrices, and using the SUMO simulation software to model different traffic scenarios. Additionally, the traffic light phases and intersection geometry were evaluated. The study identified the operational conditions of the roads and highlighted the importance of adequate traffic planning and management in urbanized areas. This analysis provides a basis for future road interventions and offers valuable tools for urban planners and traffic authorities, facilitating informed decision-making to improve mobility and reduce congestion in the area surrounding the Megamaxi Wayra shopping center.

Author Keywords: Traffic flow, traffic simulation, road capacity



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Introducción	8
1.1. Antecedentes.....	9
1.2. Planteamiento del problema	10
1.3. Justificación	11
1.4. Objetivos	12
1.4.1 Objetivo general.....	12
1.4.2 Objetivos Específicos:.....	12
1.5. Alcance y limitaciones	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1. Conceptos básicos	14
2.1.1 Flujo vehicular.....	14
2.1.2 Capacidad vial	14
2.1.3 Demoras	14
2.1.4 Densidad	15
2.1.5 Saturación.....	15
2.2. Tipos de vías	15
2.3. Tipos de intersecciones	16
2.4. Tráfico Promedio Diario Anual	16
2.4.1 Cálculo del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA)	17
2.5. Niveles de Servicio	18
2.5.1 Intersecciones Semaforizadas	20
2.5.2 Cálculo de capacidad y demoras en estaciones semaforizadas.....	22
2.6. Modelación	24
3. Metodología.....	26
3.1. Descripción de la zona de estudio	26
3.2. Recopilación de Datos.....	27
3.2.1 Conteos manuales	28
3.2.2 Registro de placas	30
3.3. Simulación de Escenarios.....	34
4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	36
4.1. Tráfico Promedio Diario Anual	36
4.2. Obtención de la matriz origen-destino.....	42
4.3. Fases semafóricas obtenidos	45

4.4. Análisis de parqueaderos	46
4.4.1 Validación de datos	46
4.4.2 Tiempo de permanencia	46
4.4.3 Afluencia por horas.....	47
4.4.4 Origen y destino de los vehículos que ingresan al Supermaxi	48
5. Análisis de resultados	50
5.1. Aforos vehiculares y TPDA.....	50
5.2. Niveles de servicio.....	50
6. Conclusiones y Recomendaciones	53
ANEXOS.....	57

Índice de figuras

Figura 1 Zonas de interés alrededor del Megamaxi Wayra	10
Figura 2 Intersección Av. 24 de Mayo y Av. Del Paraíso antes de las intervenciones .	26
Figura 3 Delimitación de la zona de estudio.....	27
Figura 4 Plantilla conteo vehicular	28
Figura 5 Ubicación de las estaciones de conteo Noviembre 2023	28
Figura 6 Ubicación de las estaciones de conteo Abril 2024	30
Figura 7 Ubicación registro de placas Abril 2023 y Noviembre 2024	32
Figura 8 Detalle entradas y salidas al parqueadero del Megamaxi Wayra	33
Figura 9 Red vial realizada en SUMO	34
Figura 10 Ciclo semafórico Av. 24 de Mayo y Camino al Valle (horas valle)	45
Figura 11 Ciclo semafórico Av. 24 de Mayo y Camino al Valle (horas pico).....	45
Figura 12 Ciclo semafórico Av. 24 de Mayo y Av. Del Paraíso.....	45
Figura 13 Ciclo semafórico Av. 24 de Mayo semáforo peatonal.....	46
Figura 14 Tiempos de permanencia de los vehículos en el garaje del Megamaxi Wayra	47
Figura 15 Afluencia de vehículos Megamaxi Wayra.....	47
Figura 16 Distribución de viajes atraídos y generados.....	48
Figura 17 Comparación de aforos vehiculares entre 2023 y 2024.....	50
Figura 18 Niveles de servicio esperados, estudio realizado en 2022	50
Figura 19 Niveles de servicio obtenidos en SUMO (Datos 2023).....	51
Figura 20 Niveles de servicio obtenidos en SUMO (Datos 2024).....	51

Índice de tablas

Tabla 1 Niveles de eficiencia para la definición de los Niveles de servicio	19
Tabla 2 Niveles de servicio según la demora (HCM 2000).....	22
Tabla 3 Resumen aforo vehicular 2023.....	36
Tabla 4 Resumen aforo vehicular 2024.....	36
Tabla 5 Resultados conteo automático octubre 2019	39
Tabla 6 Consumo de combustible para la provincia del azuay 2021	40
Tabla 7 Factores de expansión para los aforos de 2023 y 2024	40
Tabla 8 ResultadosTPDA 2023.....	41
Tabla 9 Resultados TPDA 2024.....	41
Tabla 10 Volumen de diseño en la hora de máxima demanda 2023 y 2024	41
Tabla 11 Tamaño de muestra en función del flujo.....	43
Tabla 12 Validación de datos para Matriz OD 2023	43
Tabla 13 Validación de datos para Matriz OD 2024	44
Tabla 14 Muestra de matriz OD para vehículos livianos 12h00-13h00.....	44
Tabla 15 Validación de datos para aforo vehicular en parqueadero.....	46

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes me han brindado su amor incondicional, apoyo y sabiduría a lo largo de esta ardua jornada. Su confianza en mí y sus palabras de aliento han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis hermanos, gracias por estar siempre a mi lado, por su comprensión y por los momentos de alegría y distracción que me han permitido mantener el equilibrio durante este proceso. Su apoyo ha sido inestimable.

A mis directores de tesis, les agradezco profundamente por su guía, paciencia y sabios consejos. Su dedicación y compromiso han sido esenciales para la realización de este trabajo. Gracias por compartir su conocimiento y por su constante apoyo durante todo el proceso de investigación.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La ciudad de Cuenca, una de las principales urbes de Ecuador, ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas. Este crecimiento ha sido impulsado tanto por el aumento de la población como por el desarrollo económico. Cuenca se ha expandido no solo en su área urbana central, sino también en sus periferias, integrando nuevas zonas residenciales y comerciales. Este proceso de expansión ha traído consigo desafíos considerables en términos de movilidad y gestión del tráfico (Donoso Correa, 2016).

El crecimiento de la ciudad ha llevado a un aumento en el número de vehículos en circulación, según “El Mercurio” se calcula que en el cantón Cuenca el crecimiento del parque automotor es cuatro veces más rápido que el crecimiento poblacional (Naula, 2024). Lo que ha generado problemas de congestión en diversas áreas. La infraestructura vial de Cuenca, diseñada originalmente para un volumen de tráfico menor, ha tenido dificultades para adaptarse al creciente flujo vehicular. Este fenómeno no es único de Cuenca; muchas ciudades en crecimiento enfrentan desafíos similares al intentar equilibrar el desarrollo urbano con la capacidad de sus infraestructuras.

El barrio de “El Paraíso”, sobre todo la zona comprendida entre Quinta Bolívar, el colegio Garaicoa y el redondel del parque paraíso, ha sido históricamente un área residencial y comercial en la ciudad. Originalmente, la zona estaba compuesta por viviendas unifamiliares y pequeños comercios locales que servían a la comunidad residente. Además, la presencia del Colegio Garaicoa, influía en la dinámica de la zona, atrayendo a estudiantes y personal docente diariamente.

Desde la década de 1980, el área ha experimentado un crecimiento significativo debido a su ubicación estratégica y su accesibilidad a otras partes de la ciudad, actualmente es un corredor principal que une el sur y el este de la ciudad de Cuenca, además es una de las vías principales para acceder a las parroquias rurales de El Valle, Santa Ana, Quingeo y es una vía alternativa de salida de la ciudad para cantones como Gualaceo, Chordeleg y Sigüig. Además, en esta parte de la ciudad se encuentran centros de alta concurrencia como el ya antes mencionado Colegio Garaicoa, Colegio Fe y Alegría, Cedfi y el Hospital Vicente Corral. Con todos estos atractores, además del cambio de uso de suelo, la congestión vehicular ha incrementado en el sector del Paraíso. Este aumento en el tráfico ha creado desafíos para la movilidad y ha destacado la necesidad de mejoras en la infraestructura vial para manejar el flujo de vehículos.

1.2. Planteamiento del problema

En los últimos años, varios estudios han resaltado los problemas de tráfico en la zona. En 2024, un estudio realizado por la empresa Clipp Ecuador, identificó 23 zonas con Mayores complicaciones para el tránsito en Cuenca, una de ellas es la zona del Wayra Plaza (Naula 2024). Previamente, un estudio realizado en 2017 en el marco de una tesis de grado en la Universidad de Cuenca (Mejía, 2017), se evaluaron cuatro distintas intersecciones de la zona y se determinó que la más congestionada era la intersección de la Av. 24 de Mayo y Camino al valle, proponiendo así distintas soluciones para la congestión. Sin embargo, las soluciones propuestas no se implementaron en su totalidad, y la congestión durante las horas pico siguió siendo un problema persistente. En 2023, una tesis de la Universidad Politécnica Salesiana (Carpio & Mejía, 2023) analiza de igual manera una intersección del sector, en este caso el cruce de la Av. 24 de Mayo y el redondel de Gapal, llegando a la conclusión de que es una zona con nivel de servicio F, que requiere intervención.

En 2019 Corporación Favorita plantea la construcción de un centro comercial en la intersección de la Av. 24 de Mayo y Av. 10 de Agosto, en 2020, la Dirección de Gestión de Movilidad (Dirección de Gestión de Movilidad, 2020) aprueba la construcción del centro comercial además de la modificación del viario planteada por la entidad solicitante. En el siguiente gráfico se presenta una imagen en la cual se detallan todos los puntos de interés en un rango de 750m a la redonda del actual centro comercial.

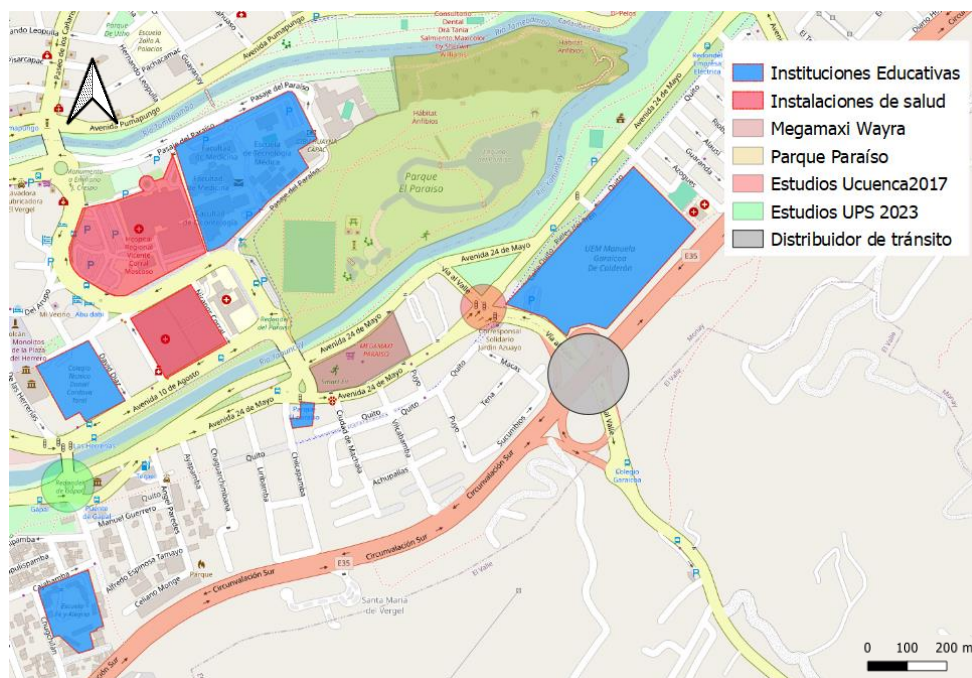


Figura 1
Zonas de interés alrededor del Megamaxi Wayra

En el marco de la planificación del centro comercial, un estudio de movilidad realizado por la consultora de transporte T-Cubo (2019) y con una actualización elaborada por OD studio (2022), esperando mejorar la maniobrabilidad y por lo tanto la eficiencia de la circulación vehicular, propuso la implementación de intervenciones viales, como la instalación de semáforos y la ampliación de carriles en la intersección del centro comercial.

Las áreas urbanas establecidas, como lo es la zona en estudio, suelen tener infraestructuras y patrones de tráfico consolidados. La introducción de un gran centro comercial puede alterar estas dinámicas preexistentes generando un aumento potencial en el flujo de vehículos debido al atractivo comercial, modificando los patrones de tráfico y los hábitos de movilidad de los usuarios.

Este proyecto de investigación propone un análisis comparativo del comportamiento vehicular antes y después de estas intervenciones propuestas en el marco del proyecto de construcción por corporación La favorita, centrándose en comprender el posible impacto en los patrones de tráfico y la dinámica vial en dicha zona mediante la determinación de niveles de servicio obtenidos por la metodología propuesto por el HCM.

1.3. Justificación

Los estudios de tráfico sirven para entender la dinámica de movilidad en una determinada área y para identificar los problemas existentes en el sistema de transporte. Estos estudios permiten anticipar los efectos de las intervenciones planificadas, ya sea la construcción de nuevas infraestructuras o la modificación de las existentes. El análisis pre y post intervenciones proporciona información sobre el impacto real de las acciones implementadas en el flujo vehicular y en la calidad de servicio de las vías. Esto permite evaluar la efectividad de las medidas tomadas y realizar los ajustes necesarios para optimizar el funcionamiento del sistema de transporte

La metodología desarrollada por el Highway Capacity Manual (HCM) se utilizará para llevar a cabo esta evaluación. Esta metodología, ampliamente utilizada para analizar la capacidad y el flujo vehicular en carreteras, combina datos de tráfico, geometría vial y comportamiento de conductores para modelar y predecir congestiones, tiempos de viaje y niveles de servicio. Además, se empleará un software de modelación para simular los cambios en la circulación, considerando variables como el flujo vehicular, los tiempos de espera y la eficiencia del sistema. Los resultados serán evaluados mediante niveles de servicio, proporcionando una visión clara de las condiciones actuales y proyectadas.

Este proyecto de investigación podrá servir como herramienta para los planificadores urbanos, autoridades de tránsito y diseñadores de infraestructuras, proporcionando un análisis fundamentado para la toma de decisiones. Los resultados del estudio pueden contribuir al diseño de futuras intervenciones viales efectivas, considerando no solo la instalación de semáforos y modificaciones geométricas, sino también la influencia de equipamientos en la dinámica del tráfico urbano en zonas consolidadas con vías a capacidad.

La metodología HCM, con su enfoque cuantitativo y basado en datos objetivos, ofrece una herramienta robusta para el análisis y la planificación vial, asegurando que las intervenciones propuestas sean efectivas y sostenibles a largo plazo. Este estudio proporcionará un modelo replicable para abordar problemas de tráfico en otras áreas urbanas con características similares.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar y comparar el posible impacto de la implementación de un nuevo centro comercial en la dinámica vial y movilidad del sector evaluando niveles de servicio mediante la metodología del HCM.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Examinar los datos provenientes de aforos automáticos y manuales, así como recuperar y analizar la información proyectada previa a la implementación del proyecto Megamaxi.
- Analizar la información recolectada en campo de conteos realizados en la zona, antes del funcionamiento del centro comercial, una vez que se realizaron los cambios geométricos en la vía y la implementación de semáforos.
- Determinar el impacto del centro comercial en los patrones de movilidad vehicular: Analizar el aumento o cambio en el flujo vehicular, considerando el atractivo comercial y la potencial modificación de rutas y patrones de desplazamiento de los usuarios.
- Realizar modelaciones de flujo vehicular: Utilizar software especializados para simular escenarios y comprender cómo las intervenciones cambian la dinámica de movilidad.
- Generar recomendaciones para la planificación urbana y gestión del tráfico: Basándose en los resultados obtenidos, proporcionar sugerencias y estrategias para mejorar la movilidad, la seguridad vial y la eficiencia del sistema de tráfico

en intersecciones similares, considerando tanto aspectos de infraestructura como la influencia de desarrollos comerciales en la dinámica vial urbana

1.5. Alcance y limitaciones

Este estudio se centrará en evaluar el impacto del centro comercial Megamaxi Wayra en la dinámica del tráfico vehicular de la Av. 24 de Mayo y sus alrededores. El análisis del tráfico vehicular antes y después de la apertura del Megamaxi Wayra, para identificar cambios en los patrones de flujo vehicular. Para esto, se utilizará la metodología del Highway Capacity Manual, con el fin de determinar los niveles de servicio de las vías circundantes, considerando factores como la velocidad de circulación, la densidad vehicular y el grado de congestión. Además, se emplearán software de modelación de tráfico para simular diferentes escenarios y evaluar el impacto de la apertura del centro comercial en la circulación vehicular, teniendo en cuenta variables como el flujo vehicular, los tiempos de espera y la eficiencia del sistema.

A pesar de los esfuerzos para garantizar la precisión y relevancia del estudio, existen ciertas limitaciones que deben ser consideradas. La precisión de los análisis depende de la disponibilidad y calidad de los datos de tráfico. Datos incompletos o inexactos pueden afectar los resultados del estudio, por lo que se hará un esfuerzo por obtener datos lo más completos y precisos posible, reconociendo que puede haber limitaciones en este aspecto. El estudio se limita a la Av. 24 de Mayo y sus inmediaciones; aunque se pueden inferir algunas conclusiones aplicables a áreas similares, los resultados específicos son pertinentes a esta zona y pueden no ser directamente aplicables a otras partes de la ciudad.

Otra limitación importante es la variabilidad en el comportamiento de los conductores, que puede variar significativamente y afectar los resultados de las simulaciones y análisis. Aunque los modelos de tráfico intentan capturar estas variaciones, no pueden prever todos los posibles comportamientos y situaciones.

A pesar de estas limitaciones, este estudio proporciona una visión valiosa y detallada del impacto del Megamaxi Wayra en la dinámica del tráfico en la Av. 24 de Mayo. Los resultados contribuirán a una mejor comprensión de cómo grandes desarrollos comerciales pueden influir en la movilidad urbana y servirán como referencia para estudios futuros en áreas urbanas con características similares.

2. Marco Teórico

2.1. Conceptos básicos

2.1.1 Flujo vehicular

El flujo vehicular se refiere al movimiento de vehículos a lo largo de las carreteras y puede clasificarse en diferentes tipos según las condiciones de circulación. El flujo ininterrumpido ocurre en carreteras sin intersecciones controladas por semáforos o señales de alto, permitiendo una circulación continua de vehículos. En contraste, el flujo interrumpido se da en áreas urbanas donde las intersecciones con semáforos o señales de alto regulan el tráfico, provocando paradas y arranques frecuentes. Y, el flujo libre se presenta cuando la densidad y el volumen de vehículos son bajos, permitiendo velocidades altas y condiciones de circulación óptimas. (Cal y Mayor, 2018)

En las vías urbanas se consideran tres factores los cuales intervienen directamente en las velocidades de los automotores en las vías urbanas:

- Las características geométricas y tipo de actividad en la carretera.
- La cantidad de vehículos, buses y auto, ya que los volúmenes de los mismos afectan el flujo en las intersecciones y entre señales de tránsito.
- Los controles de tráfico son necesarios para establecer el derecho de paso o preferencias, obligando a los vehículos a reducir su velocidad o a su vez detenerse. (Gualotuña Chiquito & Quishpe Jácome, 2022)

2.1.2 Capacidad vial

La capacidad de una infraestructura vial es el máximo número de vehículos que pueden pasar por un punto o sección uniforme de un carril durante un intervalo de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos de control (Cal y Mayor, 2018). Es importante recalcar que para la determinación de la capacidad vial se asume que no hay influencia del tránsito más adelante del punto que se está analizando.

2.1.3 Demoras

Las demoras hacen referencia al tiempo adicional que se tarda un vehículo en recorrer la red vial debido a distintos factores que alteren el flujo. Estas demoras pueden ser controladas, en el caso de semáforos o señales de tránsito o incontroladas en el caso de demoras producidas por las interacciones entre vehículos, la composición del flujo vehicular y maniobrabilidad. La demora total es la suma de las demoras tanto controladas como incontroladas.

2.1.4 Densidad

La densidad se define como el número de vehículos que ocupan una longitud específica de una vía en un momento dado. Generalmente, se expresa en vehículos por kilómetro (veh/km) y puede referirse a un solo carril o a todos los carriles de la calzada. (Cal y Mayor y Asociados, 2000)

2.1.5 Saturación

En ingeniería de tránsito se calcula el grado de saturación (x) de las vías como la razón entre el flujo de vehículos (q) que circula por ellas y su capacidad (s). Existe congestión evidente cuando x es superior a 0,7 y esta se califica de caótica a partir de 0,9. (Ortuzar, 2022)

2.2. Tipos de vías

Según Cal y Mayor (2018), las vías se clasifican en cuatro tipos principales: Autopistas y vías rápidas, que facilitan el movimiento rápido de grandes volúmenes de tráfico en áreas urbanas con acceso controlado y sin comunicación directa con propiedades colindantes. Calles principales, que permiten el movimiento del tráfico entre diferentes áreas de la ciudad, conectando con autopistas y vías rápidas y proporcionando servicio directo a los generadores principales de tráfico. Calles colectoras, que enlazan las calles principales con las locales, proporcionando acceso a las propiedades colindantes. Calles locales, que tienen acceso directo a propiedades residenciales, comerciales, industriales, facilitando el tránsito local y conectándose con calles colectoras o principales.

Según el Plan de Movilidad y Espacio Público 2015-2025 PMEP (2015) de la ciudad de Cuenca, las vías se dividen en Vías 50, diseñadas para viajes medianos y largos dentro de la ciudad y para conectar con la red estatal, permitiendo velocidades elevadas y siendo fundamentales para el tráfico de largo recorrido. Vías 40, que canalizan el tráfico desde las vías principales hacia los barrios y viceversa, facilitando la conectividad entre distintas zonas y el centro de la ciudad y suelen ubicarse en la periferia de los barrios. Calles 30, que distribuyen el tráfico motorizado dentro de los barrios, conectando la red básica urbana con la local, destinadas a viajes cortos y priorizando la movilidad peatonal. Calles 20, que aseguran el acceso directo a edificios e instalaciones y están diseñadas como espacios públicos para actividades recreativas y de paseo, con acceso vehicular limitado y principalmente para residentes.

Además, en el PMEP de la ciudad de Cuenca se especifican las características que debería tener cada tipo de vía. Ya que en este estudio interfieren solamente vías 40, se

describirán las características que deberían tener según el PMEP Cuenca. Las vías 40 tienen una velocidad máxima permitida de 40 km/h con densidades menores a 500 vehículos por hora por carril. La distribución modal es 70% motorizado y 30% no motorizado, con posibilidad de infraestructura propia para ciclistas. En general, estas vías cuentan con dos carriles, uno por sentido, cada uno con un ancho de 3,20 metros, y la posibilidad de integrar plataformas propias para el transporte público

2.3. Tipos de intersecciones

Una intersección es un punto donde dos o más vías se cruzan, permitiendo el cambio de dirección de los vehículos y la interacción entre diferentes flujos de tráfico.

Existen varios tipos de intersecciones, entre las cuales se incluyen las semaforizadas, que están controladas por semáforos para regular el flujo de vehículos y garantizar la seguridad; las de flujo libre, donde no existen controles de tráfico como semáforos o señales de alto, permitiendo un movimiento continuo de vehículos; y los redondeles o rotondas, que son intersecciones circulares donde el tráfico fluye alrededor de una isla central, con prioridad generalmente para los vehículos que ya están circulando dentro de la rotonda.

En las estaciones semaforizadas también existen diferentes tipos de semáforo según las necesidades. En la zona de estudio se tienen tres tipos de semáforos: semáforos peatonales, los cuales no tienen como fin regular el tráfico, sino que solo cambian a rojo por un corto período de tiempo permitiendo el cruce de peatones, que sería complicado sin este dispositivo. Semáforos fijos, que tienen la misma duración de ciclo durante todo el día y semáforos variables que según la hora en la que se encuentren varían sus tiempos.

2.4. Tráfico Promedio Diario Anual

El Tráfico promedio diario anual (TPDA) surgió de la necesidad de las autoridades de transporte y planificadores urbanos de tener una comprensión consistente del uso de las carreteras, superando las limitaciones de las mediciones puntuales que no reflejaban las variaciones estacionales o diarias. Por lo tanto, es una medida que representa el promedio del volumen de tráfico diario en una carretera o sección de carretera a lo largo de un año, calculado dividiendo el total anual de vehículos entre 365 días. Esta métrica es esencial para la planificación y gestión del transporte, proporcionando una evaluación consistente y uniforme del uso de las carreteras.

El TPDA se utiliza en la planificación y diseño de infraestructura, permitiendo a ingenieros y planificadores dimensionar carreteras, puentes y otros componentes para

manejar el volumen de tráfico esperado. También es crucial para programar y priorizar el mantenimiento de las carreteras, identificando áreas de alto tráfico propensas al desgaste.

Las proyecciones del TPDA permiten prever el crecimiento del tráfico, ayudando a planificar expansiones futuras de la infraestructura vial y la construcción de nuevas carreteras. También facilitan la asignación eficiente de recursos y el desarrollo de estrategias para mitigar la congestión, como la implementación de sistemas de gestión del tráfico y el fomento del transporte público alternativo.

Para la determinación del TPDA es necesaria la recolección de información, que en nuestro medio se hace de dos maneras principalmente:

- **Conteos Automáticos:** Se realizan mediante dispositivos neumáticos que registran el paso de los vehículos. Estos dispositivos se instalan en puntos estratégicos y registran datos durante una semana completa, 24 horas al día.
- **Conteos Manuales:** Complementan los conteos automáticos y se realizan en días específicos durante las horas pico gracias a personas que, por medio de videos, o estando en la zona a ser analizada cuentan uno por uno los vehículos que pasan por la intersección.

2.4.1 Cálculo del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA)

El TPDA se calcula ajustando el tráfico observado con varios factores de corrección. La fórmula general es:

$$TPDA = TO \times Fh \times Fd \times Fs \times Fm \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

TO (Tráfico Observado): Es el tráfico medido durante el periodo de conteo.

Fh (Factor Horario): Ajusta el tráfico medido en un periodo de horas a un día completo.

Fd (Factor Diario): Ajusta el tráfico de un día específico a un día promedio de la semana.

Fs (Factor Semanal): Ajusta el tráfico de una semana a un mes promedio.

Fm (Factor Mensual): Ajusta el tráfico de un mes específico a un año completo.

Determinación de Factores de Corrección

Factor Horario (Fh): Calculado a partir del conteo automático que registra el tráfico cada hora durante una semana.

$$Fh = \frac{\text{Trafico Total en 24 horas}}{\text{Trafico medido en el periodo de conteo}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Factor Diario (Fd): Ajusta las variaciones del tráfico diario.

$$Fd = \frac{\text{Trafico semanal}}{\text{Trafico diario en el dia especifico}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Factor Semanal (Fs): Ajusta las variaciones del tráfico semanal. Este factor se puede calcular considerando el número de semanas en cada mes y ajustando por la variabilidad semanal.

$$Fs = \frac{\text{Promedio del trafico semanal del mes}}{\text{Trafico semanal}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Factor Mensual (Fm): Ajusta las variaciones del tráfico mensual, utilizando datos de consumo de combustibles como proxy para la movilidad vehicular.

$$Fm = \frac{\text{Consumo mensual de combustibles}}{\text{Consumo promedio mensual}} \quad (\text{Ec. 5})$$

2.5. Niveles de Servicio

El nivel de servicio es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación dentro de un flujo vehicular y su percepción por el conductor y el pasajero. Estas condiciones se suelen describir en términos de velocidad y tiempo de recorrido, libertad de maniobra, interrupciones del tráfico, comodidad, seguridad vial y sobre todo en términos de demoras.

El Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) define seis niveles de servicio, designados por las letras de la “A” a la “F”. El nivel de servicio “A” representa las mejores condiciones de operación, mientras que el nivel de servicio “F” indica las peores. Cada nivel representa un rango y percepción de los conductores respecto a las condiciones de operación. El HCM distingue diferentes tipos de vías: autopistas, multicarril, simple carril y semaforizada, para cada tipo de vía existen diferentes parámetros, en este caso se detallarán solamente los niveles de servicio para carreteras multicarril, carretera simple carril y semaforizadas ya que son las que se encuentran en la zona de estudio.

Según el tipo de vía, el HCM propone medidas de eficiencia para la determinación de los niveles de servicio, que se presentan a continuación:

Tabla 1**Niveles de eficiencia para la definición de los Niveles de servicio**

Fuente: HCM 2000

Tipo de Infraestructura vial	Medidas de eficiencia
Autopistas	Densidad (veh.lig / km / carril)
Segmentos básicos de autopista	Velocidad media de recorrido (km/h)
Entrecruzamientos	Tasa de flujo (veh.lig /h)
Rampas de enlace	
MCarreteras	
Multicarriles	Densidad (veh.lig. /km/carril)
De dos carriles	Demora porcentual (%) y velocidad media de recorrido
Intersecciones con semáforo	Demora media individual por paradas (seg/veh)
Intersecciones sin semáforo	Capacidad remanente (veh.lig/h)
Arterias	Velocidad media de recorrido (km/h)
Transporte colectivo	Factor de carga (pers/asiento)
Peatones	Espacio (m2/ peatón)

Carreteras Multicarril

Las carreteras multicarril son aquellas que tienen dos o más carriles por dirección. Para carreteras de múltiples carriles, la capacidad y los niveles de servicio se analizan teniendo en cuenta varios factores, como las condiciones geométricas, que incluyen el ancho de los carriles, la presencia y el ancho de acotamientos, y las pendientes; las condiciones de tránsito, como la composición del tráfico (proporción de vehículos pesados), la velocidad de operación y los flujos vehiculares; y las condiciones ambientales, como la visibilidad, el clima y el estado de la superficie de rodamiento. El análisis de capacidad utiliza la metodología del Manual de Capacidad Vial (Highway Capacity Manual, HCM), que define una capacidad base bajo condiciones ideales y aplica factores de ajuste para adaptarla a condiciones reales, considerando el efecto de vehículos pesados, el ancho de los carriles y acotamientos, y las interrupciones en el flujo de tráfico.

Carreteras de Doble Carril

Las carreteras de doble carril son aquellas que tienen un carril por dirección. Las carreteras de doble carril, comunes en áreas rurales y suburbanas, se clasifican en

función del tráfico y las condiciones geométricas, y presentan desafíos específicos debido a la interacción constante entre vehículos que circulan en direcciones opuestas. El análisis de capacidad para estas carreteras incluye condiciones base, considerando una carretera en recta con condiciones ideales de tráfico y sin interrupciones, y factores de ajuste, adaptando la capacidad base para reflejar condiciones reales como curvas, pendientes y la presencia de vehículos pesados. La metodología del HCM incluye la evaluación de la "proporción de tiempo de seguimiento" y la "proporción de tiempo de retraso", indicadores clave para determinar el nivel de servicio en estas carreteras. La capacidad se ajusta considerando estos factores y se evalúa la operación para determinar el nivel de servicio.

2.5.1 Intersecciones Semaforizadas

En las intersecciones semaforizadas la capacidad y nivel de servicio dependen de la eficiencia del sistema semafórico (fases y ciclos) y del diseño geométrico de la intersección. Para poder seguir con el análisis es importante manejar los conceptos de fase y ciclo. (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000)

- Fase: Tiempo en el cual uno o varios semáforos de la intersección permanecen en verde.
- Ciclo: Tiempo necesario para que se desarrollen todas las fases incluyendo tiempos de todo rojo y ámbar. El tiempo total de un ciclo se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$C = \sum_{i=1}^n V_i + n(Y + D) \quad (6)$$

Donde:

n = número de fases

V_i = Cada una de las fases del ciclo

Y = tiempo en ámbar

D = tiempo en todo rojo

El análisis de capacidad para intersecciones semaforizadas considera las fases del semáforo, que incluyen la longitud del ciclo, la distribución de tiempo por fase y el número de fases. También se analiza la geometría de la intersección, considerando el número y ancho de carriles, la presencia de carriles exclusivos para giro y los radios de giro. Además, se toman en cuenta las condiciones de tránsito, como los volúmenes de tráfico en cada dirección, la proporción de giros y la presencia de peatones y ciclistas.

El HCM proporciona un enfoque detallado para analizar estas intersecciones mediante el cálculo del "tiempo de demora promedio por vehículo", que considera el volumen de tráfico, la distribución del ciclo del semáforo y las características geométricas. Las intersecciones se evalúan en términos de nivel de servicio, basado en el tiempo de demora.

Niveles de servicio en intersecciones semaforizadas:

Nivel de servicio A: Operación con demoras muy bajas, menores de 10 segundos por vehículo. La Mayoría de los vehículos llegan durante la fase verde y no se detienen por completo. Los ciclos cortos contribuyen a demoras mínimas.

Nivel de servicio B: Operación con demoras entre 10 y 20 segundos por vehículo. Algunos vehículos comienzan a detenerse.

Nivel de servicio C: Operación con demoras entre 20 y 35 segundos por vehículo. La progresión del tránsito es regular y algunos ciclos comienzan a fallar.

Nivel de servicio D: Operación con demoras entre 35 y 55 segundos por vehículo. Las demoras pueden deberse a la mala progresión del tránsito, llegadas en la fase roja, ciclos largos, o altas relaciones de v/c. Muchos vehículos se detienen y los ciclos fallidos se hacen más notables.

Nivel de servicio E: Operación con demoras entre 55 y 80 segundos por vehículo. Considerado como el límite aceptable de demoras. Las demoras son causadas por progresiones pobres, ciclos muy largos y altas relaciones de v/c.

Nivel de servicio F: Operación con demoras superiores a 80 segundos por vehículo. Los flujos de llegada exceden la capacidad de la intersección, lo que ocasiona congestión y una operación saturada.

En la siguiente tabla se resumen los valores de demoras correspondientes a cada nivel de servicio.

Tabla 2
Niveles de servicio según la demora (HCM 2000)

Nivel de servicio	Demora s/veh)
A	≤ 10
B	De 10 a 20
C	De 20 a 35
D	De 35 a 55
E	De 55 a 80
F	>80

2.5.2 Cálculo de capacidad y demoras en estaciones semaforizadas

La metodología desarrollada por el HCM, proporciona las siguientes fórmulas de análisis para el cálculo de capacidad y demoras.

Capacidad:

La capacidad para cada grupo de carriles viene dada por:

$$c_i = s_i \times \frac{g_i}{C}$$

Donde:

S es el flujo de saturación

G es el verde efectivo

C es el tiempo de duración del ciclo

El grado de saturación se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$X_i = \frac{v_i}{c_i}$$

Donde:

V= volumen en el grupo i

c= capacidad en el grupo i

Para toda la intersección el grado de saturación es el siguiente:

$$X_c = \sum \frac{v_i}{s_i} \times \frac{C}{C - L}$$

Donde:

V= volumen en el grupo i

s= flujo de saturación en el grupo i

c= longitud del ciclo

L= tiempo perdido total

Demoras:

Para el cálculo de las demoras, se toma en cuenta la demora uniforme, donde se asume un flujo estable sin fila inicial, y las demoras incrementales, donde las demoras no son uniformes y existe una sobresaturación.

Las demoras se calculan de la siguiente a partir de la siguiente fórmula:

$$d = d1 (PF) + d2 + d3$$

A continuación, se detallan las fórmulas para d1, d2 y d3

$$d1 = \frac{0,5 C (1 - \frac{g}{C})}{1 - \min(1, X) \frac{g}{C}}$$

Donde

d1: demora uniforme (s/veh)

C: longitud del ciclo (s)

g: verde efectivo para el grupo(s)

X: grado de saturación para el grupo

$$PF = \frac{(1 - P)f_{PA}}{1 - \frac{g}{C}}$$

PF: ajuste por tipo de progresión (dispersión)

P: proporción de vehículos que arriban en verde

fPA: ajuste adicional por pelotón arribando en verde

$$d2 = 900 T [(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}}]$$

D2: demora incremental (s/veh)

C: capacidad del grupo

X: grado de saturación para el grupo

T: período de análisis

I: filtro señales anteriores (1.0 para aisladas)

K: factor que depende del tipo de controlador (0.5 para fijos)

Finalmente para el cálculo de d_3 se toma en cuenta las demoras de una fila residual.

2.6. Modelación

A partir de los conceptos antes mencionados, se han desarrollado varios programas de simulación de tráfico vehicular, teniendo como base principal el análisis de niveles de servicio. Incluso el HCM, tiene su propia versión llamada HCS+, sin embargo, muchos de estos programas, como SYNCHRO, trabajan con intersecciones aisladas. Para este estudio, es más conveniente utilizar programas especializados en macro-simulación, es decir, que puedan abarcar la interacción entre varias intersecciones con distintas geometrías y propiedades. Para este caso, el programa AIMSUN es uno de los más utilizados, pero, al ser un programa que requiere licencia para su utilización, se optó por realizar la modelación en el programa SUMO (Simulation of Urban Movelity).

SUMO es un software de simulación de tráfico vehicular desarrollado en 2001 por el Instituto de Tecnología de Karlsruhe y el Centro Alemán de Investigación en Inteligencia Artificial (DFKI). Este programa de código abierto es utilizado en la investigación y la planificación del tráfico, ofreciendo una plataforma accesible para analizar y modelar redes de transporte urbano. (Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad [PUCE], 2023).

Sumo trabaja modelando cada vehículo individualmente, lo que permite un análisis detallado del tráfico. Además, es flexible y escalable, capaz de simular desde pequeñas intersecciones hasta grandes redes urbanas. El software soporta la simulación de diferentes modos de transporte, como vehículos privados, transporte público, bicicletas y peatones, permitiendo un análisis integral de la movilidad urbana. Además, consta de varias herramientas complementarias para la edición de redes, generación de tráfico y visualización de resultados.

Dentro del programa existen tres tipos de simulaciones de acuerdo al nivel de detalle que se desea analizar. Macroscópica: un modelo general que incluye información de múltiples vehículos sin ahondar en detalles específicos; Mesoscópica: un modelo algorítmico de Mayor especificidad enfocado en flujos y corrientes vehiculares grupales con una misma dirección y velocidad; y Microscópica: un análisis de la interacción de los elementos en la red vial, arrojando información por cada vehículo, como su velocidad y emisión (Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad [PUCE], 2023). En este estudio se aplica una simulación microscópica.

Para poder iniciar con la modelación se requiere una red vial, que puede ser descargada de la página web de SUMO, la cual está vinculada a un open street map. La página web ofrece un gran nivel de detalle sobre los elementos que se desean descargar incluyendo vías de emergencia, vías primarias, secundarias, vías de tren, etc. Al descargar la red vial, la geometría se simplifica a nodos, que son las intersecciones y arcos, que representan las calles. Además, se incluyen elementos editables como semáforos, zonas de generación de tráfico, parqueaderos, entradas de emergencia, etc. Estos elementos descargados pueden ser modificados gracias al editor que incluye SUMO llamado netedit.

Además de la geometría, se tienen que especificar los datos de flujo vehicular, en donde se especifican los tipos de vehículo con sus propiedades y sus orígenes y destinos. SUMO también da la opción de que el usuario imponga la ruta que cada vehículo va a recorrer para llegar a su destino, si esta ruta no se especifica, SUMO asignará la ruta que considere más rápida para cada par origen-destino.

Finalmente se corre la modelación en un lapso de tiempo dado, lo cual permite ver de manera gráfica el paso de los vehículos y como interactúan entre ellos. También se genera una matriz en la cual se pueden obtener las demoras en cada arco, la velocidad media de los vehículos, la densidad, entre otras propiedades.

Este software destaca por su rapidez y facilidad para analizar posibles problemas de tránsito, como el cierre de vialidades, el cambio de dirección en vías establecidas, la afluencia del transporte público y la creación de nuevas rutas. Estas características lo convierten en una herramienta invaluable para mejorar la movilidad urbana, permitiendo a los planificadores evaluar y optimizar el sistema de transporte de manera eficiente.

3. Metodología

3.1. Descripción de la zona de estudio

El centro comercial Megamaxi se encuentra ubicado en la intersección entre la Av 24 de Mayo y la Av. Del paraíso y ocupa un área de 13.744 m^2 su construcción inició en julio 2023 y su inauguración fue el 24 de Noviembre de 2023.

El proyecto es exclusivamente comercial, con seis plantas y un área total de construcción de 52000 m^2 . Las plantas incluyen subsuelos para bodegas y estacionamientos, y niveles superiores para locales comerciales. En el subsuelo existen 700 plazas de estacionamiento, de los cuales 21 son para personas en condiciones de vulnerabilidad y 16 para vehículos eléctricos. Los accesos al centro comercial están ubicados al norte por la Av. 24 de Mayo sentido este-oeste y al sur por la Av. 24 de Mayo sentido oeste-este.

El proyecto está sujeto a la normativa municipal de Cuenca. El sistema de autoservicio se abastece diariamente desde Quito en horarios nocturnos para no interferir con el tráfico de clientes. El horario de atención al público es de 10h00 a 21h00.

En el marco de la planeación del centro comercial, el Ing. Juan Avilés, propuso mediante un estudio, ciertos cambios geométricos en la intersección entre la Av. Del Paraíso y la Av. 24 de Mayo con el fin disminuir las colas en los accesos al centro comercial y evitar perturbaciones en el tráfico. Estos cambios incluyeron un acceso a la zona del Megamaxi y la incorporación de semáforos.



Figura 2
Intersección Av. 24 de Mayo y Av. Del Paraíso antes de las intervenciones
Fuente: Google Earth (2022)

Para este análisis se busca determinar el impacto del centro comercial en el tráfico del rededor. La zona de estudio busca abarcar todas las vías de entrada y salida posibles a la zona del centro comercial. Por lo tanto, el estudio abarca por la parte norte desde la Av 10 de agosto, la llegada al redondel del paraíso, por el sur la calle camino al valle, por el este la av. 24 de Mayo (Colegio Garaicoa) y por el oeste la Av 24 de Mayo (Quinta Bolívar) y la Av. 10 de Agosto (SOLCA). Todas las vías a ser analizadas son vías 40 según el Plan de Movilidad y Espacio Público (2015) de la ciudad de Cuenca o vías arteriales según la clasificación de Cal y Mayor (2018).



Figura 3:
Delimitación de la zona de estudio

3.2. Recopilación de Datos

Los datos fueron recolectados en dos instancias. En la primera, antes del funcionamiento del Megamaxi en noviembre 2023 los conteos y registros de placas fueron realizados por los estudiantes de séptimo ciclo de la carrera de ingeniería civil de la universidad de Cuenca. En la segunda instancia, una vez que el centro comercial fue inaugurado y su aforo se estabilizó, en abril 2024, los datos fueron tomados por los estudiantes de octavo ciclo de la carrera de ingeniería civil de la Universidad del Azuay. Los datos que se buscaba obtener eran conteos manuales durante todo el día, registro de placas en las horas pico, registro de ingresos y salidas al parqueadero del centro comercial y la medida de los ciclos semafóricos en las distintas intersecciones.

Para los conteos manuales se utilizó el siguiente formato, en el cual se registraban los vehículos livianos, buses y busetas, taxis, camiones de dos ejes, tres ejes y cuatro ejes, motos y bicicletas. Este registro se hacía en intervalos de tiempo de 15 minutos.

[illegible]

En la primera recolección de datos, los conteos manuales se realizaron el día viernes 27 de octubre de 2023 por catorce horas, de 7h00 a 20h00. En 5 estaciones principales (1-5) y dos estaciones de control (6-7). En cada estación se encontraban de dos a tres personas con el fin de que el conteo se acerque lo más posible a la realidad. Además, el conteo se realizó en dos turnos de seis horas. Las estaciones se especifican en la siguiente figura:



Denisse Andrea Molina Toledo

Detalle de las estaciones:

Estación 1: Ubicada en la Av. Del Paraíso dirección Norte-Sur, frente al parqueadero del parque Paraíso, cuenta los vehículos que giran a la derecha hacia la Av. 10 de agosto, los que van recto continuando en Av. Del Paraíso y los que del redondel giran en u y regresan por la Av. Del Paraíso dirección Sur-Norte.

Estación 2: Ubicada en la Av. 10 de agosto dirección Oeste-Este. En esta estación se realizó el aforo de los vehículos que giran a la derecha hacia la Av. Del Paraíso (Norte-Sur), los que giran a la izquierda hacia la Av. Del Paraíso (Sur-Norte) y los que giran en u nuevamente hacia la Av. 10 de agosto (Este – Oeste).

Estación 3: Se encuentra en la Av. 24 de Mayo en dirección Oeste-Este. En esta estación se contaron los vehículos van recto y los vehículos que giran a la izquierda hacia la Av. Del Paraíso.

Estación 4: Situada en Camino al Valle, dirección Sur-Norte. Aquí se registraron los vehículos que giran a la derecha, hacia la Av. 24 de Mayo dirección Oeste-Este y los que seguían recto, para unirse a la Av. 24 de Mayo dirección Este-Oeste.

Estación 5: Se encuentra en la Av. 24 de Mayo, frente al colegio Garaicoa, se registraron los vehículos que van recto (para luego girar hacia Camino al Valle) y los que van a la derecha, continuando la Av. 24 de Mayo dirección Este-Oeste.

Estación 6: Ubicada en la Av. 24 de Mayo, frente al parque de mascotas. En esta estación se contaron los vehículos que van por el paso a desnivel, para continuar en la Av. 24 de Mayo dirección Este-Oeste y los vehículos que van sobre el paso a desnivel para empalmar con la Av. Del Paraíso dirección Sur-Norte.

Estación 7: Se encuentra en la Av. 24 de Mayo, frente a la farmacia San Sebastián. Se aforaron los vehículos que giraban a la derecha hacia Camino al Valle, los que continuaban recto en la Av. 24 de Mayo dirección Oeste-Este y los que giraban a la derecha para unirse a la Av. 24 de Mayo dirección Este-Oeste.

La siguiente recolección de datos se realizó el día 14 de abril de 2024, una vez que el centro comercial ya estaba inaugurado y su afluencia estaba regulada. El conteo se hizo durante un período de catorce horas, de 6h00 a 20h00. En esta ocasión se decidió implementar una estación de control más, ubicada en el semáforo de la av. 10 de agosto.

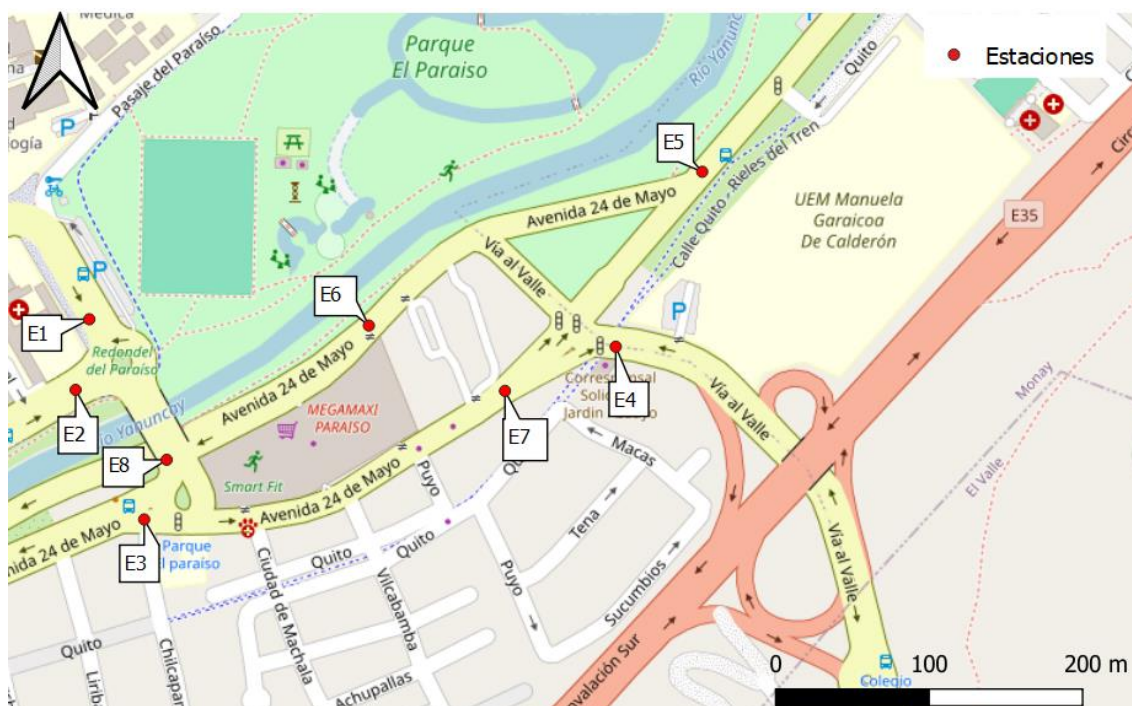


Figura 6
Ubicación de las estaciones de conteo Abril 2024

Para este conteo se realizaron varios turnos de 3h a 5h cada uno. En la siguiente figura se detalla la ubicación de cada estación.

Estación 8: Ubicada en la Av. Del Paraíso, en su intersección con la Av. 24 de Mayo. En esta estación se contaron los vehículos que giraban hacia la derecha, a la Av. 24 de Mayo dirección Este-Oeste, los que giraban a la izquierda a la Av. 24 de Mayo dirección Oeste-Este y los que giraban en U hacia la Av. Del Paraíso dirección Sur-Norte o hacia la entrada 1 del Megamaxi Wayra (Ver figura 6).

Una vez realizado el conteo, se procedió a contrastar la información de las estaciones principales y las de control. En el conteo realizado en abril 2024, se encontraron inconsistencias entre estas dos estaciones para los vehículos livianos en el horario de 16h00 a 20h00 por lo tanto se decidió repetir el conteo el día viernes 05 de Mayo de 2024 en las estaciones 6 y 8 con el fin de corroborar los conteos obtenidos o modificarlos en el caso de ser necesario.

3.2.2 Registro de placas

El registro de placas vehiculares es una técnica clave utilizada en la recopilación de datos para construir matrices origen-destino (OD), especialmente en zonas con múltiples intersecciones donde es difícil seguir un vehículo para determinar su dirección final. Las matrices OD son una herramienta importante en la planificación y gestión del

tráfico urbano. Representan el número de viajes realizados entre diferentes zonas dentro de un área de estudio, categorizando los viajes según su punto de origen y destino. Estas matrices se utilizan para analizar la demanda de transporte, modelar y simular el tráfico, evaluar la efectividad de la infraestructura existente, planificar rutas de transporte público y realizar estudios de impacto de tráfico. La información para construir estas matrices puede provenir de encuestas de viajes, conteos de tráfico, tecnologías de seguimiento como GPS y datos de teléfonos móviles. En este caso, se procedió a realizar un registro de placas solamente en las potenciales horas pico para superar la dificultad de seguimiento en una zona con varias intersecciones.

Para el registro de placas se ubicaron aforadores en las entradas y salidas de toda la zona a ser estudiada (Ver figura 7). En estos puntos, gracias a un dispositivo celular con grabador de voz, los aforadores registraron las placas de los vehículos livianos y pesados que pasaban. Para los vehículos livianos, como muestra representativa se eligieron los carros blancos, grises y taxis y para los vehículos pesados se tomaron las placas de todos los buses y camiones.

En los datos tomados antes de la apertura del centro comercial las lecturas se realizaron el mismo día que los aforos manuales y en los siguientes intervalos:

- 6h30 a 9h00
- 11h30 a 14h00
- 4h30 a 7h00

Para los datos tomados después de la inauguración del Megamaxi Wayra, los intervalos de registro de placas fueron los siguientes:

- 6h00 a 8h00
- 12h00 a 14h00
- 18h00 a 20h00

Una vez tomados los datos, se procedió a digitalizarlos en una matriz discretizándolos por hora y tipo de vehículo. Posteriormente se cruzaron los datos de las entradas y salidas con el fin de obtener el lugar de origen y destino de cada vehículo.

La ubicación del conteo de placas se puede observar en las siguientes figuras



Figura 7
Ubicación registro de placas Abril 2023 y Noviembre 2024

3.2.3 Registro de ingresos y salidas del centro comercial

Finalmente, también se realizó un registro exhaustivo de todos los vehículos que ingresaban y salían del centro comercial Megamaxi Wayra. Este registro se llevó a cabo en intervalos de 15 minutos, con el fin de obtener datos detallados sobre la afluencia vehicular en diferentes momentos del día. Este procedimiento permitió extender la matriz origen-destino, incluyendo el Megamaxi Wayra como un nodo significativo en el análisis del tráfico. Además, se registraron los tiempos de permanencia de los vehículos dentro del centro comercial, lo cual puede ayudar a comprender mejor los patrones de comportamiento de los usuarios, identificar las horas pico de mayor congestión y evaluar la capacidad de los estacionamientos.

El registro se realizó de 10h00 a 20h00 y se discretizó por acceso. En la siguiente figura se puede distinguir las diferentes entradas y salidas.



Figura 8
Detalle entradas y salidas al parqueadero del Megamaxi Wayra

Detalles:

Entrada 1: Los vehículos ingresan por la Av. Del Paraíso

Salida 1: Los vehículos se incorporan a la Av del paraíso y se dirigen hacia el redondel del Paraíso

Entrada 2: Los vehículos ingresan por la Av. 24 de Mayo sentido Oeste-Este.

Salida 2: Los vehículos se incorporan a la Av. 24 de Mayo sentido Oeste-Este.

Entrada 3: Los vehículos ingresan junto al paso a desnivel por la Av. 24 de Mayo sentido Este-Oeste.

3.2.4 Determinación del ciclo semafórico.

En la zona de estudio se encuentran 3 semáforos de naturalezas diferentes, un semáforo fijo en la intersección entre la Av. 24 de Mayo y Av. Del Paraíso, un semáforo peatonal en la Av. 24 de Mayo a la altura del centro comercial y un semáforo con ciclos variables durante el día en la intersección entre la Av. 24 de Mayo y Camino al Valle.

Con un cronómetro se realizó la medición de los distintos semáforos, en horas pico y en horas valle para obtener las fases correctamente para la modelación.

3.3. Simulación de Escenarios

3.3.1 Definición de la red vial

Por medio de la extensión de SUMO OSM Wizzard se procede a elegir la información necesaria para la simulación, en este caso se descargaron las vías principales y vías de servicio (parqueaderos) de la zona. Una vez descargada se proceden a revisar el número de carriles, los giros permitidos para cada vía y se eliminan estructuras que no son relevantes en el estudio. Además, se añaden los tiempos semafóricos según las fases medidas en campo.

Para los vehículos que iban en dirección hacia el Megamaxi Wayra, se tuvo que crear una zona TAZ (Traffic assignment zone) que permite que los vehículos lleguen y salgan de ahí, sin necesidad de que exista una conexión vial (SUMO, 2024). En la figura 9 se puede apreciar esta zona en azul.

La red vial se puede modificar en cualquier momento de la simulación ya que es ahí cuando se detectan problemas que quizás solo en la edición no eran perceptibles.

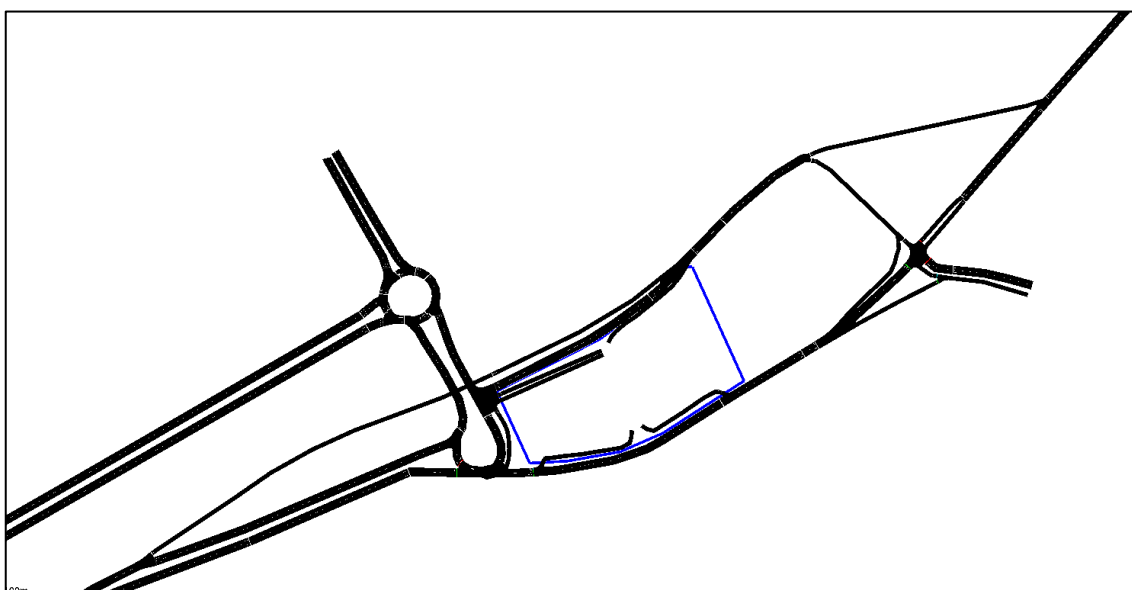


Figura 9
Red vial realizada en SUMO

3.3.2. Implementación del tráfico

Para cargar los datos de los vehículos, es necesario crear un archivo con extensión .xml, en el que se indique:

- Tiempo de simulación: 1 hora.
- Tipos de vehículos: livianos, buses, camiones (de 2, 3 y 4 ejes).

- Origen y destino de cada vehículo.
- Posibilidad de que aparezca cada tipo de vehículo.

En este documento también se pueden cargar datos de las rutas, sin embargo, ya que para cada par origen-destino, existe una sola ruta posible, se permitió que SUMO asigne el recorrido para cada vehículo.

En anexos se puede encontrar el documento .xml para cada simulación según las matrices origen-destino obtenidas.

3.3.3 Simulación y resultados

Durante la simulación en la interfaz de SUMO, es posible observar el flujo de los vehículos a medida que se desplazan por las vías. Si se presentan inconvenientes durante la simulación, el sistema abre automáticamente una pestaña de advertencia que notifica sobre problemas específicos, como vehículos estancados o intersecciones sin conexión adecuada. Estas alertas son esenciales para identificar y corregir fallos en el modelo, permitiendo a los usuarios realizar los ajustes necesarios. Este proceso de refinamiento se repite hasta que el modelo simulado refleja con alta precisión las condiciones del mundo real.

A partir de esta simulación detallada, se pueden extraer una variedad de datos relevantes sobre el comportamiento del tráfico y las características de las vías. Entre los datos obtenidos se incluyen la velocidad media de los vehículos, la densidad del tráfico en diferentes segmentos, la frecuencia y los patrones de cambio de carril, el tiempo total de viaje de los vehículos y las demoras experimentadas en diversas partes del trayecto. Estos datos sirven como indicadores de cómo está funcionando la vía y son los que permiten la determinación del nivel de servicio de cada vía.

4. Resultados obtenidos

4.1. Tráfico Promedio Diario Anual

Como se ha mencionado anteriormente el tráfico es una medida que fluctúa mucho dependiendo el horario y el día en el que se mida. Para llevar el volumen aforado a un volumen equivalente se calcula el tráfico promedio diario anual gracias a factores de expansión. En el siguiente apartado se detalla su cálculo.

4.1.1 Resumen de los conteos vehiculares

Tabla 3
Resumen aforo vehicular 2023

Resumen aforo manual 2023					
	LIVIANOS	BUSES	CAMIONES	Motos	Bicis
E1	7546	350	121	315	18
E2	9881	254	122	367	95
E3	12560	552	318	672	15
E4	11378	556	204	561	47
E5	11514	418	292	660	37
Total	52879	2130	1057	2575	212
	56066				

Tabla 4
Resumen aforo vehicular 2024

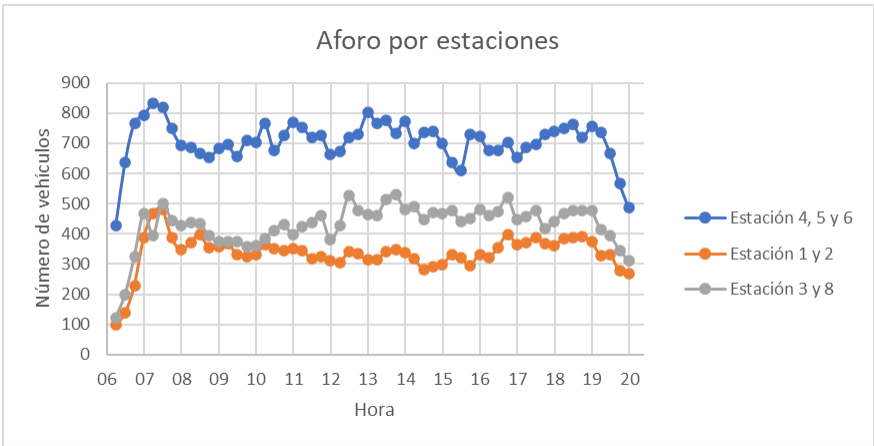
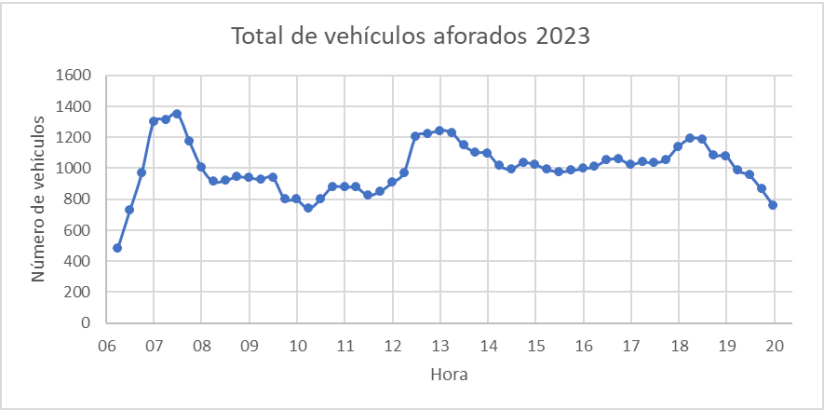
Resumen aforo manual 2024					
	LIVIANOS	BUSES	CAMIONES	Motos	Bicis
E1	8278	354	121	315	16
E2	11596	320	154	356	155
E3	13101	715	379	684	28
E4	9480	662	340	771	19
E5	10834	545	298	826	49
Total	53289	2596	1292	2952	267
	57177				

Determinación de la hora pico: En la zona de estudio se tienen 3 intersecciones principales, a continuación, se detallan los volúmenes aforados de cada intersección. Como se puede ver en la intersección de la estación 1 y 2 (redondel del paraíso) y en la intersección de las estaciones 4, 5 y 6 (Av. 24 de Mayo y Camino al Valle), la hora pico es a las primeras horas de la mañana, mientras que la intersección de la estación 3 y 8 (Av. 24 de Mayo y Av. Del Paraíso) tiene un volumen constante con pequeños picos a de 7h00 a 7h30, de 12h00 a 14h00 y de 17h30 a 18h30. Si se juntan los tres gráficos de cada intersección se distingue que las estaciones 4, 5 y 6, son las más representativas ya que durante todo el día, el volumen de vehículos que pasa por la estación es Mayor, teniendo en cuenta que la capacidad de la vía también es Mayor. Si

se toman en cuenta los valores de toda la zona, la hora pico sería en las primeras horas de la mañana, y el análisis se realizará con esos valores, sin embargo, para la modelación se tomarán las matrices OD de los rangos de tiempo más representativos, es decir los ya mencionados anteriormente de 6h45 a 7h45, de 12h00 a 14h00 y de 18h00 a 20h00.

Resumen aforo 27 de octubre de 2023

Hora	Aforo
6:15	410
6:30	720
6:45	1095
7:00	1362
7:15	1380
7:30	1295
7:45	1154
8:00	1254
8:15	1180
8:30	1147
8:45	1125
9:00	1109
9:15	1118
9:30	1047
9:45	1107
10:00	1047
10:15	1128
10:30	1108
10:45	1115
11:00	1077
11:15	1021
11:30	1046
11:45	1001
12:00	996
12:15	1133
12:30	1208
12:45	1195
13:00	1076
13:15	1081
13:30	1108
13:45	1057
14:00	1061
14:15	977
14:30	981
14:45	996
15:00	1057
15:15	1103
15:30	1115
15:45	1220
16:00	1233
16:15	1147
16:30	1153
16:45	1094
17:00	1073
17:15	1076
17:30	1094
17:45	1120
18:00	1139
18:15	1151
18:30	1125
18:45	1085
19:00	965
19:15	1088
19:30	1125
19:45	1093
20:00	966



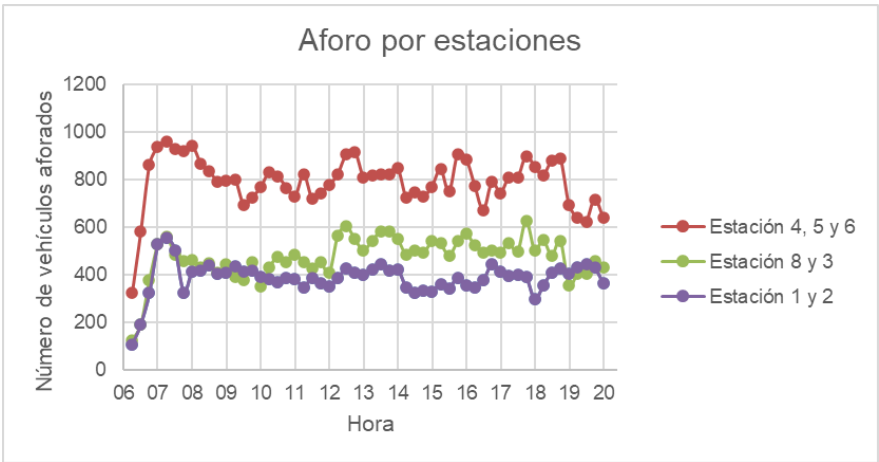
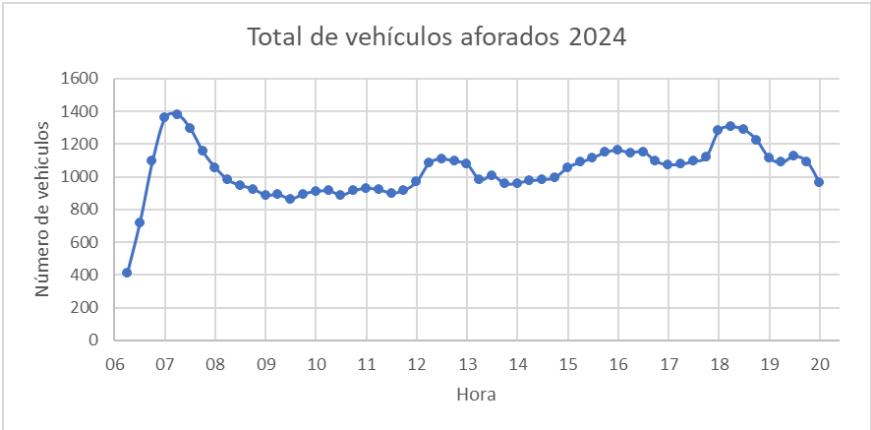
Comportamiento hora pico 6h45-7h45		
Hora	Volumen	%Volumen
6H45-7H00	1300	25%
7H00-7H15	1315	26%
7H15-7H30	1349	26%
7H30-7H45	1175	23%
TOTAL	5139	100%
FHP	0.952	

Composición de vehículos		
Tipo	Total	%Total
Liviano	4531	91.44%
Bus	159	3.21%
Camión	65	1.31%
Moto	176	3.55%
Bici	24	0.48%
Total	4955	1

Al igual que en el aforo realizado en 2023, se puede apreciar que el tráfico es máximo a primeras horas de la mañana en la Mayoría de estaciones. En este caso, hay una variación con el aforo realizado en 2023, ya que en lugar de que las horas de la tarde, de 15h00 a 17h00 sean horas valle, hay un incremento de tráfico que puede ser explicado por la implementación del centro comercial en la zona, sin embargo, esa es información que se verificará posteriormente en este estudio.

Resumen aforo 14 de abril de 2024

Hora	Aforo
6:15	410
6:30	720
6:45	1095
7:00	1362
7:15	1380
7:30	1295
7:45	1154
8:00	1254
8:15	1180
8:30	1147
8:45	1125
9:00	1109
9:15	1118
9:30	1047
9:45	1107
10:00	1047
10:15	1128
10:30	1108
10:45	1115
11:00	1077
11:15	1021
11:30	1046
11:45	1001
12:00	996
12:15	1133
12:30	1208
12:45	1195
13:00	1076
13:15	1081
13:30	1108
13:45	1057
14:00	1061
14:15	977
14:30	981
14:45	996
15:00	1057
15:15	1103
15:30	1115
15:45	1220
16:00	1233
16:15	1147
16:30	1153
16:45	1094
17:00	1073
17:15	1076
17:30	1094
17:45	1120
18:00	1139
18:15	1151
18:30	1125
18:45	1085
19:00	965
19:15	1088
19:30	1125
19:45	1093
20:00	966



Comportamiento hora pico 6h45-7h45			Composición de vehículos		
Hora	Volumen	%Volumen	Tipo	Total	%total
6h45-7h00	1362	26%	Liviano	4576	88.15%
7h00-7h15	1380	27%	Bus	245	4.72%
7h15-7h30	1295	25%	Camión	77	1.48%
7h30-7h45	1154	22%	Moto	251	4.84%
TOTAL	5191	100%	Bici	46	0.89%
FHP	0.953		Total	5195	100%

4.1.2 Cálculo del TPDA

El factor horario y el factor diario se determinarán a partir del conteo automático realizado en octubre de 2019 en la Av. 24 de Mayo. Debido a que los dos aforos de abril y de noviembre fueron tomados el mismo día de la semana y en el mismo rango horario, f_h y f_d serán iguales.

Tabla 5
Resultados conteo automático octubre 2019

Conteo automático Av. 24 de mayo								
20/10/2019 - 27/10/2019								
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Total
00:00-00:59	47	29	36	38	67	201	253	671
01:00-01:59	66	91	112	150	201	370	408	1398
02:00-02:59	63	29	61	66	110	239	277	845
03:00-03:59	47	29	36	38	67	201	253	671
04:00-04:59	32	29	23	25	45	124	167	445
05:00-05:59	54	41	49	52	53	116	80	445
06:00-06:59	157	165	163	186	181	187	133	1172
07:00-07:59	941	956	966	977	967	442	299	5548
08:00-08:59	1569	1490	1521	1587	1491	783	465	8906
09:00-09:59	1375	1375	1495	1375	1395	1138	664	8817
10:00-10:59	1295	1241	1311	1273	1300	1149	814	8383
11:00-11:59	1414	1350	1348	1307	1309	1332	1034	9094
12:00-12:59	1374	1410	1408	1400	1360	1426	1196	9574
13:00-13:59	1526	1525	1495	1585	1572	1550	1301	10554
14:00-14:59	1756	1777	1852	1713	1689	1570	1179	11536
15:00-15:59	1420	1412	1427	1462	1474	1792	1050	10037
16:00-16:59	1380	1402	1478	1398	1524	1768	1072	10022
17:00-17:59	1561	1575	1093	1564	1668	1749	1120	10330
18:00-18:59	1580	1616	812	1269	1506	1631	1097	9511
19:00-19:59	1295	1120	802	1517	1459	1657	1083	8933
20:00-20:59	1161	1115	691	1500	1329	1366	1067	8229
21:00-21:59	1179	1229	593	1291	1367	1152	908	7719
22:00-22:59	955	924	468	1113	1286	835	622	6203
23:00-23:59	523	639	345	736	840	675	329	4087
TOTAL	22770	22569	19585	23622	24260	23453	16871	153130

Según la Ecuación 2:

$$f_h = \frac{24260}{18895} = 1.28$$

Según la Ecuación 3:

$$f_d = \frac{21875}{24260} = 0.90$$

Para el factor semanal determinamos el número de semanas que tiene el mes en el cual se hizo el conteo vehicular y dividimos para 28. De esta manera según la Ecuación 4:

$$f_{s \text{ oct}} = \frac{31}{28} = 1.107$$

$$f_{s \text{ abr}} = \frac{30}{28} = 1.071$$

Finalmente, para el factor mensual, ya que no se dispone de un conteo de todos los meses del año, se procede a realizar un equivalente a partir del total de combustible vendido durante el año.

Tabla 6

Consumo de combustible para la provincia del azuay 2021

Fuente: ARCHH

Consumo de combustible Azuay 2021				
MES	87 octanos	92 octanos	Diesel	SUMA
ENERO	4775844	429077	3880425	9085346
FEBRERO	4948490	412440	3304785	8665715
MARZO	5170699	404948	3767804	9343451
ABRIL	4574423	326243	3565984	8466650
MAYO	4420854	299146	4178804	8898804
JUNIO	5155097	372108	4714578	10241783
JULIO	5421990	411595	4827320	10660905
AGOSTO	5391276	403056	4713002	10507334
SEPTIEMBRE	5237703	372716	4743268	10353687
OCTUBRE	4896828	357575	3987030	9241433
NOVIEMBRE	5479903	402645	4704750	10587298
DICIEMBRE	5912326	419071	4954034	11285431
TOTAL	61385433	4610620	51341784	117337837

Según la Ecuación 5:

$$fm_{oct} = \frac{9778153}{9241433} = 1.07$$

$$fm_{abr} = \frac{9778153}{8366650} = 1.16$$

En resumen:

Tabla 7:

Factores de expansión para los aforos de 2023 y 2024

Factores		
Año	2023	2024
fh	1.28	1.28
fd	0.90	0.90
fs	1.11	1.07
fm	1.07	1.16
Total	1.38	1.44

Para el TPDA de cada año se afecta cada aforo por el factor correspondiente y se obtienen los siguientes valores:

Tabla 8
Resultados TPDA 2023

TPDA 2023						
	LIVIANOS	BUSES	CAMIONES	Motos	Bicis	Total
E1	10386	482	167	434	25	11494
E2	13599	350	168	506	131	14754
E3	17286	760	438	925	21	19430
E4	15660	766	281	773	65	17545
E5	15847	576	402	909	51	17785
Total	72776	2932	1455	3544	292	80999
	77163					

TPDA 2024						
	LIVIANOS	BUSES	CAMIONES	Motos	Bicis	Total
E1	11950	512	175	455	24	13116
E2	16739	462	223	514	224	18162
E3	18912	1033	548	988	41	21522
E4	13685	956	491	1113	28	16273
E5	15639	787	431	1193	71	18121
Total	76924	3748	1866	4262	386	87186
	82536					

4.1.4 Volúmenes de diseño

Para realizar el análisis de la zona, se opta por trabajar con los datos más representativos, es decir con los datos correspondientes a las horas de máxima demanda que en los dos conteos coinciden de 6h45-7h45, de 12h00-13h00 y de 18h00-19h00. A los aforos obtenidos se les afecta por los factores de expansión determinados para el TPDA y se obtienen los siguientes datos:

Tabla 10
Volumen de diseño en la hora de máxima demanda 2023 y 2024

Noviembre 2023					
6h45-7h45					
0	Livianos	Taxis	Buses	Camiones	TOTAL
E1	815	118	32	7	972
E2	1229	69	30	7	1335
E3	1164	76	47	26	1313
E4	1576	98	69	22	1765
E5	959	132	41	28	1160
Total	5743	493	219	90	6545

12h00-13h00					
0	Livianos	Taxis	Buses	Camiones	TOTAL
E1	596	133	50	15	794
E2	795	120	29	18	962
E3	1281	116	72	58	1527
E4	976	70	59	19	1124
E5	1188	157	44	33	1422
Total	4836	596	254	143	5829

18h00-19h00					
0	Livianos	Taxis	Buses	Camiones	TOTAL
E1	659	85	37	18	799
E2	1087	128	21	3	1239
E3	1255	99	70	14	1438
E4	1024	116	33	21	1194
E5	1149	168	44	17	1378
Total	5174	596	205	73	6048

Abril 2024				
6h45 - 7h45				
	Livianos	Buses	Camiones	Total
E1	1090	49	3	1142
E2	1493	43	10	1546
E3	1493	111	24	1628
E4	1247	82	40	1369
E5	1367	68	26	1461
Total	6690	353	103	7146

12h00 - 13h00				
0	Livianos	Buses	Camiones	Total
E1	966	40	23	1029
E2	1109	25	22	1156
E3	1552	56	37	1645
E4	999	88	26	1113
E5	1298	46	25	1369
Total	5924	255	133	6312

18h00 - 19h00				
0	Livianos	Buses	Camiones	Total
E1	814	30	1	845
E2	1324	38	6	1368
E3	1325	97	37	1459
E4	969	55	20	1044
E5	1041	17	24	1082
Total	5473	237	88	5798

4.2. Obtención de la matriz origen-destino

4.2.1 Validación de datos

Para poder determinar si la muestra que hemos tomado, es verdaderamente representativa de la población, se verifican los datos por medio del tamaño de muestra para una distribución normal, en la que es necesario un nivel de confianza, y un margen de error. (Montgomery & Runger, 2018) Este margen de error representa el porcentaje de variación que existe en los resultados.

Para determinar el tamaño de la población requerido para un nivel de confianza de 95%, se utiliza la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N \times Z \times p \times q}{e^2 (N-1) + Z \times p \times q} \quad (7)$$

Donde:

n: Tamaño de muestra buscado

N: Tamaño de la población, en este caso, total de vehículos aforados en el período de tiempo de toma de muestra

Z: la cantidad de desviaciones estándar que una proporción determinada se aleja de la media, en este caso para un nivel de confianza de 95%, $z=1.96$

p: probabilidad de que ocurra el evento esperado, se utiliza un factor de 0.5 ya que con esta probabilidad, el resultado es el máximo, es decir, más conservador.

q: probabilidad de que no ocurra el evento $q=1-p$

Además, Juan de Dios Ortuzar proporciona la siguiente tabla para determinar el tamaño de muestra según el flujo horario estimado.

Tabla 11
Tamaño de muestra en función del flujo

Flujo horario estimado (pasajeros / período)	Tamaño de muestra (%)
900 o más	10,0 (1 de cada 10)
700 a 899	12,5 (1 de cada 8)
500 a 699	16,6 (1 de cada 6)
300 a 499	25,0 (1 de cada 4)
200 a 299	33,3 (1 de cada 3)
1 a 199	50,0 (1 de cada 2)

Según lo mencionado anteriormente, para las matrices origen destino, según la Ecuación 7 se obtiene:

Tabla 12
Validación de datos para Matriz OD 2023

Validación de datos Matriz OD 2023						
Hora	Tipo de vehículo	Volumétrico	Requerido	Margen de error	Muestra	Porcentaje
6h00-8h00	Livianos	7614	1050	2.8%	922	12%
	Pesados y taxis	1194	799	2.0%	865	72%
12h00-14h00	Livianos	6901	1269	2.5%	1694	25%
	Pesados y taxis	1317	851	2.0%	910	69%
18h00-20h00	Livianos	6392	1250	2.5%	1561	24%
	Pesados y taxis	1328	713	2.5%	749	56%

Tabla 13
Validación de datos para Matriz OD 2024

Validación de datos Matriz OD 2024						
Hora	Tipo de vehículo	Volumétrico	Requerido	Margen de error	Muestra	Porcentaje del aforo
6h00-8h00	Livianos	7670	1838	2.0%	2009	26%
	Buses	471	171	6.0%	198	42%
	Pesados	132	63	9.0%	61	46%
12h00-14h00	Livianos	7886	1283	2.5%	1694	21%
	Buses	375	232	4.0%	202	54%
	Pesados	188	97	7.0%	107	57%
18h00-20h00	Livianos	7391	1273	2.5%	1461	20%
	Buses	379	130	7.0%	147	39%
	Pesados	98	37	12.0%	39	40%

Como se puede observar en la tabla, los datos tienen un margen de error de entre 2 y 3% para los vehículos livianos y de 2 a 12% para los buses y vehículos pesados. En todos los casos el porcentaje de muestra, respecto al total de viajes es Mayor al 10%, por lo tanto, los valores obtenidos en el registro de placas para la realización de las matrices origen-destino son confiables y se puede seguir trabajando con ellos para la obtención de los niveles de servicio.

Cabe recalcar que, para el conteo realizado en octubre 2023, se realizó la discretización de livianos, contando los vehículos blancos y grises, y pesados incluyendo taxis, buses y camiones. Para la creación de las matrices origen destino se separarán estos datos gracias al porcentaje que se tiene en el conteo de cada tipo de vehículo en el horario respectivo.

4.2.2 Matrices origen destino

Con los resultados obtenidos en el registro de placas, en el aforo vehicular y en el registro de placas en los parqueaderos del centro comercial, se procede a cruzar toda la información para obtener las matrices O-D en número de vehículos que entran y salen por cierta intersección. Estos vehículos están discretizados en livianos, buses y

Tabla 14
Muestra de matriz OD para vehículos livianos 12h00-13h00

Matriz OD LIVIANOS 12H00-13H00									
	S1	S2	S3	S4	S5	EW1	EW2	EW3	Total
E1	240	150	186	227	109	27	27	0	966
E2	493	123	96	123	239	11	25	0	1110
E3	169	169	118	461	562	28	45	0	1552
E4	287	160	130	15	399	0	3	6	1000
E5	329	361	250	108	186	8	5	51	1298
SW1	44	43	13	0	8	0	0	0	108
SW2	7	7	7	19	33	0	0	0	73

camiones. En la siguiente tabla se muestra una matriz O-D para el aforo realizado en abril 2024, de los vehículos livianos en el horario de 12h00-13h00

Como se puede apreciar, en esta matriz están incluidas las entradas y salidas al centro comercial. El detalle de todas las matrices O-D en porcentajes, y sus valores en vehículos / hora se encuentran en anexos.

4.3. Fases semafóricas obtenidos

En horas valle

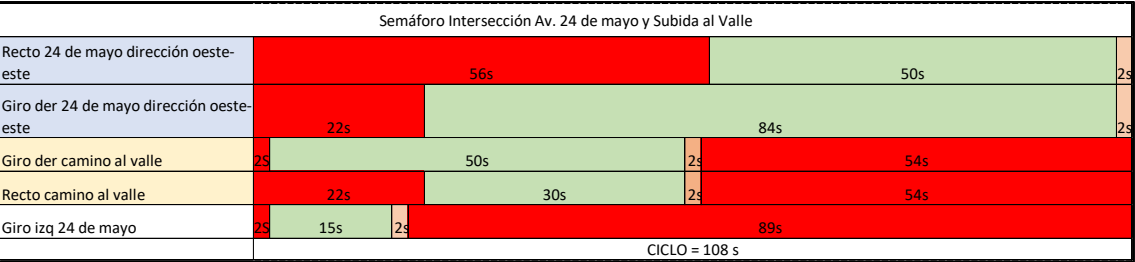


Figura 10
Ciclo semafórico Av. 24 de Mayo y Camino al Valle (horas valle)

En horas pico

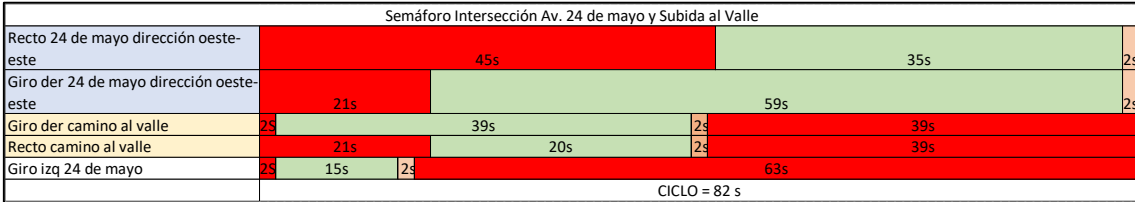


Figura 11
Ciclo semafórico Av. 24 de Mayo y Camino al Valle (horas pico)

Semáforo de la Av. Del Paraíso

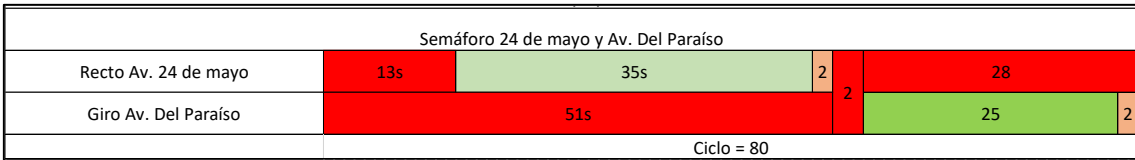


Figura 12
Ciclo semafórico Av. 24 de Mayo y Av. Del Paraíso

Semáforo Peatonal Av. 24 de Mayo

Semáforo Av. 24 de mayo		
2	12s	66

Figura 13**Ciclo semafórico Av. 24 de Mayo semáforo peatonal****4.4. Análisis de parqueaderos****4.4.1 Validación de datos**

Al igual que para la determinación de las matrices OD, se realiza previamente una verificación de los conteos, que nos indique si la muestra que hemos tomado es representativa. Se utiliza la misma metodología, aplicando la fórmula (7) y los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 15**Validación de datos para aforo vehicular en parqueadero**

Total aforado entrada	1428
Total aforado salida	1630
Total coincidencias	786
% aforado	51%
Volumen requerido	629
Margen de error	3%

La muestra presenta un nivel de confianza del 95% con un margen de error del 3%, por lo tanto, los valores si son representativos y podemos continuar con el análisis.

4.4.2 Tiempo de permanencia

Para determinar el tiempo que los vehículos se quedan en los parqueaderos del centro comercial, se realizó una matriz en la cual se cruzan los datos de las placas y horas de entrada de cada vehículo, con las de salida y se obtiene el tiempo de permanencia de cada par (entrada-salida).

Como se puede observar en la figura 14, la Mayoría de vehículos permanecen entre 15 y 30 minutos en el parqueadero. Bajando después progresivamente el tiempo de permanencia hasta llegar a 2h15 para una muestra representativa. Posteriormente se tiene pocas excepciones en las que los vehículos se quedan hasta 8h15 en las instalaciones del Megamaxi.

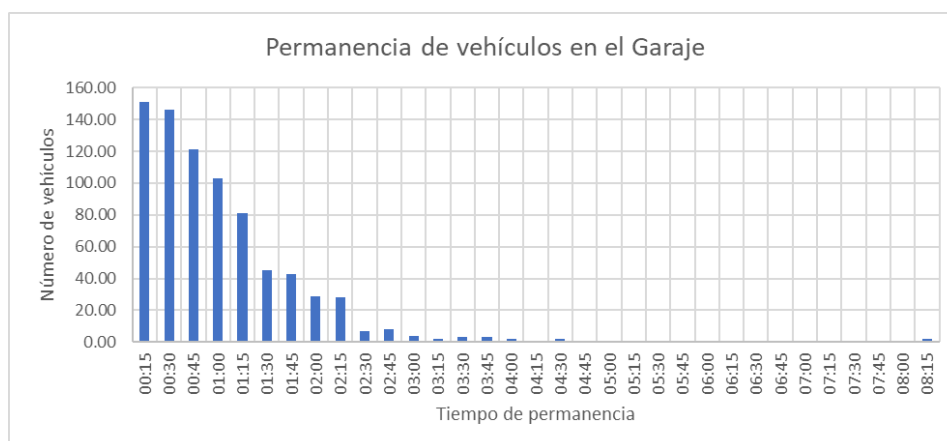


Figura 14
Tiempos de permanencia de los vehículos en el garaje del Megamaxi Wayra

4.4.3 Afluencia por horas

Con los datos obtenidos también se pudo determinar la cantidad de vehículos que entran y salen del parqueadero cada hora, con el fin de determinar en qué horario existe Mayor atracción de flujo vehicular y en que horario se aporta tráfico a las calles aledañas al centro comercial.

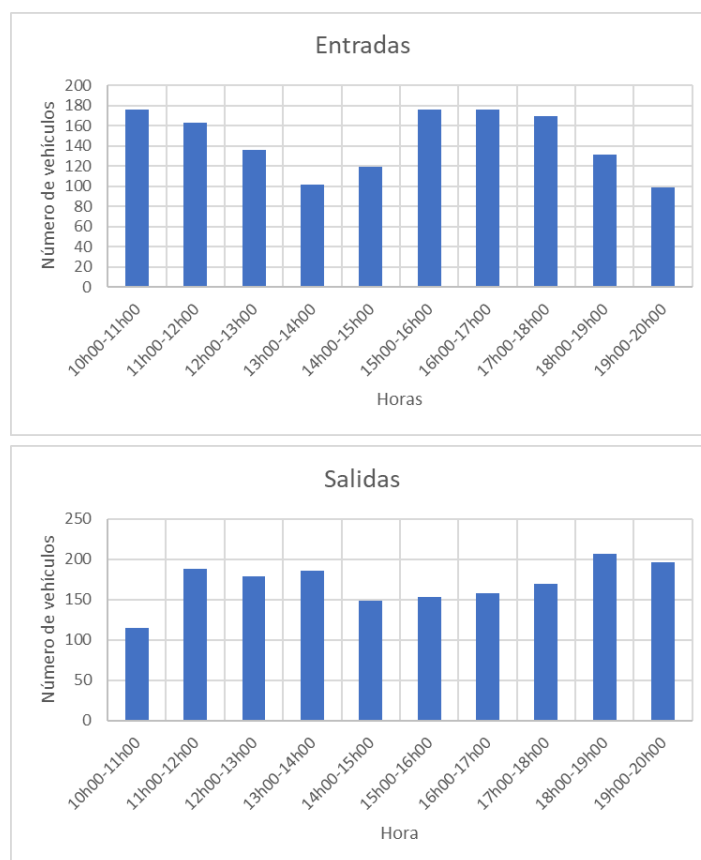


Figura 15
Afluencia de vehículos Megamaxi Wayra

En la figura 15, se puede ver que las horas a las que entra una Mayor cantidad de carros a los parqueaderos es en la apertura del Megamaxi, es decir de 10h00 a 12h00 y en las horas de la tarde de 15h00 a 17h00, con un mínimo de entradas de 13h00 a 14h00 y de 19h00 a 20h00.

En cuanto a las salidas de vehículos, son un poco más estables, con ligeros picos de 11h00 a 14h00 y de 18h00 a 20h00. Mientras que el mínimo se encuentra a la hora de apertura de 10h00 a 11h00.

4.4.4 Origen y destino de los vehículos que ingresan al Supermaxi

Gracias al conteo de placas se pudo determinar la procedencia y el destino de los vehículos que ingresan al Megamaxi, permitiendo un análisis detallado del flujo vehicular en la zona.



Figura 16
Distribución de viajes atraídos y generados

En el gráfico se puede observar que la mayor cantidad de viajes atraídos por el Megamaxi proviene de la parte este y sur de la ciudad. En particular, se destaca que el 40% de los vehículos ingresan desde la Av. 24 de Mayo (dirección este-oeste), reflejando una significativa afluencia desde esa dirección. Asimismo, un 21% de vehículos ingresan desde la Vía al Valle, mostrando también un considerable movimiento desde el sur de la ciudad. Adicionalmente, un 13% de los vehículos ingresan desde la Av. Del Paraíso, 15% desde la Av. 10 de agosto y un 11% desde la Av. 24 de mayo (dirección oeste-este).

En cuanto a los vehículos que salen del Supermaxi, el gráfico indica que en su mayoría se dirigen hacia la Avenida del Paraíso, la Avenida 24 de Mayo en dirección oeste-este, y la Vía al Valle. Específicamente, un 33% de los vehículos salen hacia la Av. Del Paraíso, mientras que un 22% se dirigen hacia la Av. 24 de Mayo (dirección oeste-este).

Otro 21% de los vehículos que salen toman la Vía al Valle hacia el sur, reflejando un patrón de dispersión significativo hacia esta ruta. Además, un 8% de los vehículos que salen lo hacen por la Avenida 10 de Agosto en dirección sur, y un 16% toman la Avenida 24 de Mayo hacia el oeste.

5. Análisis de resultados

5.1. Aforos vehiculares y TPDA

En la siguiente figura se presentan los aforos obtenidos en el conteo vehicular de 2023 y 2024, los dos aforos son muy similares en las primeras horas del día, siendo el aforo de 2024 ligeramente Mayor hasta las 15h00, donde se puede apreciar una diferencia más significativa entre 2024 y 2023. Esta hora coincide con las horas de Mayor ingreso de vehículos al centro comercial, como se muestra en la figura 15, después las curvas vuelven a ser similares hasta las 19h00 donde se vuelve a notar un ligero aumento del tráfico en 2024 a comparación del de 2023.



Figura 17
Comparación de aforos vehiculares entre 2023 y 2024
Fuente: Autor

5.2. Niveles de servicio



Figura 18
Niveles de servicio esperados, estudio realizado en 2022
Fuente: Ing. Juan Avilés OD studio



Figura 19
Niveles de servicio obtenidos en SUMO (Datos 2023)



Figura 20
Niveles de servicio obtenidos en SUMO (Datos 2024)

En las figuras 18, 19 y 20 se muestran los diferentes niveles de servicio encontrados en los diferentes estudios realizados en 2022, 2023 y 2024 respectivamente

Entre 2023 y 2024 se puede ver que en la Av. 10 de Agosto, y en la Av. 24 de Mayo el nivel de servicio de las vías ha disminuido de C a D, en el primer caso y de B a C en el segundo. Se ve también una disminución del nivel de servicio en el desvío de la Av. 24 de Mayo, hace Camino al Valle y en la Av. 24 de Mayo hace el redondel del Paraíso.

Para la vía Camino al Valle, a pesar de que la simulación muestra un nivel de servicio D, en el conteo vehicular se observó que, en algunos intervalos de tiempo, la intersección operaba a plena capacidad, con colas que ocasionalmente se extendían hasta la Av. Del Paraíso. Esto se debe a que, según la definición de capacidad, se asume que no hay influencia del tráfico más allá del punto analizado. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la vía Camino al Valle ya es una zona conflictiva. Aunque los modelos sugieren que no debería haber tanto tráfico, en realidad se trata de un flujo vehicular que se acumula desde puntos más elevados, los cuales no fueron considerados en este estudio.

En relación al estudio anterior realizado en 2022 se puede decir que a pesar de los cambios geométricos y las instalaciones semaforicas las expectativas no se han cumplido, ya que se esperaban niveles de servicio B en las zonas más conflictivas, por el contrario, la zona del Megamaxi, sobre todo la Av. 24 de Mayo, sigue representando un problema de movilidad para el sector.

6. Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio, se evaluó el impacto del centro comercial Megamaxi Wayra en la dinámica del tráfico vehicular en la Av. 24 de Mayo en el tramo comprendido entre el redondel de Gapal y el colegio Garaicoa y sus alrededores en Cuenca, Ecuador. A través de conteos manuales y registro de placas, así como simulaciones utilizando el software SUMO y la metodología del HCM, se analizaron los cambios en el flujo vehicular y los niveles de servicio antes y después de la apertura del centro comercial. Se identificaron incrementos en el tráfico vehicular y disminuciones en los niveles de servicio, especialmente en las horas pico. Este análisis proporcionó una visión clara de las condiciones operativas y destacó la necesidad de mejoras en la infraestructura y gestión del tráfico.

El estudio realizado ha permitido evaluar de manera exhaustiva el impacto del centro comercial Megamaxi Wayra en la dinámica del tráfico vehicular en la Av. 24 de Mayo y sus alrededores. La metodología HCM ha demostrado ser una herramienta eficaz para este tipo de análisis, proporcionando una visión clara de las condiciones operativas de las vías antes y después de la apertura del centro comercial. La metodología permite una comprensión detallada de los niveles de servicio y proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas. La integración con herramientas de simulación como SUMO complementa el análisis, proporcionando una visión más completa del comportamiento del tráfico y las posibles soluciones.

Los resultados indican que las intervenciones viales implementadas, aunque han contribuido a mejorar algunos aspectos de la circulación, no han sido suficientes para mitigar por completo la congestión en la zona. La intersección de la Av. 24 de Mayo y Camino al Valle sigue representando un desafío considerable debido al alto volumen de tráfico y la limitada capacidad de la infraestructura vial existente. Además, las proyecciones de TPDA han mostrado un crecimiento continuo del tráfico, subrayando la necesidad de planes de gestión del tráfico más robustos y sostenibles.

La implementación de centros comerciales en zonas ya saturadas de tráfico es un tema que merece una profunda discusión. Aunque estos desarrollos comerciales pueden ofrecer beneficios económicos y sociales significativos, como la creación de empleos y la mejora de servicios, también pueden exacerbar problemas preexistentes de congestión vehicular. Este estudio ha demostrado que la apertura del Megamaxi Wayra ha incrementado considerablemente el tráfico en la Av. 24 de Mayo, un área que ya enfrentaba desafíos significativos en términos de movilidad.

Dado estos resultados, se proponen las siguientes recomendaciones con el fin de abordar de manera efectiva los problemas identificados y mejorar la situación del tráfico en la zona estudiada.

- Ajuste de Ciclos Semafóricos: Implementar ajustes dinámicos en los ciclos semafóricos basados en el volumen de tráfico en tiempo real para optimizar la sincronización y reducir las demoras.
- Desarrollo de Planes de Movilidad Integral: Crear planes de movilidad que integren el desarrollo comercial con la infraestructura vial, asegurando que las nuevas construcciones no exacerben los problemas de tráfico existentes.
- Monitoreo y Evaluación Continua: Establecer sistemas de monitoreo continuo del tráfico para evaluar la efectividad de las intervenciones y hacer ajustes según sea necesario.
- Fomentar transportes alternativos: se recomienda incrementar la frecuencia y cobertura del transporte público en la zona para reducir la dependencia de vehículos particulares. Además, es esencial desarrollar infraestructuras seguras y accesibles para ciclistas y peatones, promoviendo el uso de medios de transporte alternativos.
- Se pueden implementar campañas de concienciación y programas de incentivos para promover el uso de bicicletas, transporte público y compartir vehículos.

Referencias

- Avilés, J. (2020). Estudio de movilidad proyecto Megamaxi Cuenca. T-Cubo consultora
- Avilés, J. (2022). Estudio de movilidad proyecto Megamaxi Cuenca. ODStudio
- Bañón blázquez, Luis; BEVIÁ GARCÍA, José Francisco. Manual de carreteras. Alicante : Ortiz e Hijos, Contrastista de Obras, S.A., 2000. Vol. 1. ISBN 84-607-0267-7
- Cal y Mayor y Asociados. (2000). *Análisis del flujo vehicular*. México: Cal y Mayor y Asociados, S.C.
- Cal y Mayor, R., , & Cárdenas, J. (2018). Ingeniería de Tránsito - Fundamentos y Aplicaciones (9a. ed.). Alfaomega.
- Carpio Quizhpi, J. D., & Mejía Carpio, I. A. (2023). *Estudio de tráfico y soluciones al congestionamiento vehicular (intersección Av. 24 de Mayo y Av. Gapal)*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Dirección de Gestión de Movilidad. (2020). *Oficio Nro. GM-0985-2020*. Cuenca.
- Donoso Correa, M. E. (2016). *Análisis crítico de la planificación urbana de la Ciudad de Cuenca*. MASKANA, 7(1), 107-117.
- GAD Municipal de Cuenca. (2015). Plan de Movilidad de la Ciudad de Cuenca 2015-2025.
https://www.cuenca.gob.ec/system/files/PMEP_CUENCA_2015_tomo_II.pdf
- Gualotuña Chiquito, N. E., & Quishpe Jácome, A. V. (2022). *Análisis de tráfico y propuesta de mejoramiento de la movilidad vehicular en la intersección Av. Cardenal de la Torre y Av. Ajaví del Distrito Metropolitano de Quito*. Universidad Politécnica Salesiana.

- Mejía Regalado, I. A. (2017). Análisis y propuesta de solución integral al congestionamiento vehicular que se produce en la Av. 24 de Mayo y Vía al Valle, de la ciudad de Cuenca . Recuperado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28111>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Naula Herembás, P. (2023, 12 de noviembre). El 24 de noviembre se abre el primer Megamaxi en Wayra Plaza en Cuenca. *El Mercurio*. <https://elmercurio.com.ec/2023/11/12/megamaxi-inauguracion-cuenca-24-noviembre-2023/>
- Naula Herembás, P. (2024, junio 3). Se identifican 23 zonas de congestionamiento vehicular en Cuenca. *El Mercurio*. <https://elmercurio.com.ec/2024/06/03/transito-calles-cuenca-congestionamiento-vehicular/>
- Ortúzar Salas, J. de D. (2018). *Modelos de demanda de transporte* (2ª ed.). Alfaomega. ISBN 978-958-778-021-5
- Primicias. (2023, Mayo 25). Wayra Plaza en Cuenca incluye un Megamaxi y La Favorita. Primicias. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/wayra-plaza-cuenca-megamaxi-favorita/>
- Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad (PUEC). (2023). Programa de simulación de tránsito SUMO, útil para mejorar la movilidad urbana. *PUEC UNAM*. Recuperado de: <https://www.puec.unam.mx/index.php/component/content/article/2220-programa-de-simulacion-de-transito-sumo-util-para-mejorar-la-movilidad-urbana.html?catid=57&Itemid=101>
- SUMO. (2024). *Importing O/D Matrices*. Retrieved from https://sumo.dlr.de/docs/Demand/Importing_O/D_Matrices.html
- Transportation Research Board. (2000). Highway capacity manual (HCM 2000). National Academy of Sciences

ANEXOS

Anexo A – Matrices OD

En porcentaje 2023

Matriz origen destino 6-8am					
Livianos					
	S1	S2	S3	S5	Total
E1	28.70	9.26	4.63	3.70	100
E2	62.84	10.09	4.59	6.88	100
E3	16.59	14.69	4.74	18.48	100
E4	47.77	26.32	1.62	16.60	100
E5	23.19	41.30	3.62	6.52	100

Pesados					
	S1	S2	S3	S5	Total
E1	14.04	17.98	33.15	11.80	100
E2	31.62	8.82	25.74	18.38	100
E3	3.85	5.77	4.33	45.19	100
E4	18.79	23.03	18.18	32.12	100
E5	11.24	16.29	33.15	9.55	100

Matriz origen-destino 12-2pm						
Livianos						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	18.29	12.20	31.30	32.93	5.28	100
E2	57.04	11.60	8.40	13.09	9.88	100
E3	16.52	9.40	11.68	35.61	26.78	100
E4	33.50	23.86	13.20	8.12	21.32	100
E5	14.44	29.78	30.44	22.44	2.89	100

Pesados						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	6.42	8.56	47.06	21.39	16.58	100
E2	21.43	4.29	39.29	17.14	17.86	100
E3	7.48	8.66	11.42	32.68	39.76	100
E4	6.98	6.20	30.23	14.73	41.86	100
E5	14.00	4.50	36.50	31.00	14.00	100

Matriz origen-destino 6-8pm						
Livianos						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	9.47	10.53	37.37	34.74	7.89	100
E2	46.23	10.69	9.75	18.24	15.09	100
E3	8.99	9.21	12.13	37.53	32.13	100
E4	21.21	20.61	20.00	6.06	32.12	100
E5	12.19	31.15	33.86	20.77	2.03	100

Pesado						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	4.48	9.70	35.82	29.85	20.15	100
E2	24.00	4.00	32.00	13.00	27.00	100
E3	8.53	9.95	8.06	26.54	46.92	100
E4	12.40	10.08	10.85	20.16	46.51	100
E5	6.29	6.86	36.00	34.29	16.57	100

En porcentaje 2024

Matriz origen destino 6-8am 2024						
Livianos						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	9.15	21.90	43.14	13.73	12.09	100
E2	24.94	21.66	25.44	4.28	23.68	100
E3	3.45	14.56	17.42	11.11	53.45	100
E4	9.43	32.08	28.30	2.83	27.36	100
E5	5.24	23.60	59.55	2.43	9.18	100

Buses						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	12.50	4.17	79.17	4.17	0.00	100
E2	81.40	2.33	13.95	0.00	2.33	100
E3	11.54	38.46	7.69	13.46	28.85	100
E4	24.59	63.93	9.84	0.00	1.64	100
E5	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100

Camiones						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100
E2	38.46	23.08	7.69	0.00	30.77	100
E3	4.76	19.05	4.76	14.29	57.14	100
E4	5.26	10.53	15.79	0.00	68.42	100
E5	14.29	28.57	42.86	0.00	14.29	100

Matriz origen-destino 12-2pm 2024									
Livianos									
	S1	S2	S3	S4	S5	EW1	EW2	EW3	Total
E1	24.88	15.49	19.25	23.47	11.27	2.82	2.82	0.00	100.00
E2	44.47	11.07	8.65	11.07	21.53	1.01	2.21	0.00	100.00
E3	10.87	10.87	7.61	29.71	36.23	1.81	2.90	0.00	100.00
E4	28.70	15.98	13.02	1.48	39.94	0.00	0.30	0.59	100.00
E5	25.31	27.80	19.29	8.30	14.32	0.62	0.41	3.94	100.00
WS1	40.96	39.76	12.05	0.00	7.23	0.00	0.00	0.00	100.00
WS2	9.68	9.68	9.68	25.81	45.16	0.00	0.00	0.00	100.00

Buses						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	0.00	3.03	72.73	24.24	0.00	100
E2	74.19	0.00	6.45	19.35	0.00	100
E3	10.81	32.43	5.41	24.32	27.03	100
E4	30.00	50.00	10.00	0.00	10.00	100
E5	0.00	0.00	18.03	81.97	0.00	100

Camiones						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	13.79	13.79	3.45	55.17	13.79	100
E2	28.57	23.81	0.00	47.62	0.00	100
E3	12.50	12.50	25.00	25.00	25.00	100
E4	28.57	33.33	4.76	4.76	28.57	100
E5	10.71	39.29	14.29	32.14	3.57	100

Matriz origen-destino 6-8pm 2024									
Livianos									
	S1	S2	S3	S4	S5	EW1	EW2	EW3	Total
E1	13.00	2.00	22.00	51.00	7.00	5	0	0	100.00
E2	41.60	6.77	12.03	21.30	15.79	2.26	0.25	0.00	100.00
E3	8.57	1.10	7.47	36.70	44.18	1.10	0.44	0.44	100.00
E4	27.59	6.90	23.28	12.07	23.28	0.00	0.00	6.90	100.00
E5	16.94	7.64	45.85	4.65	12.62	0.66	0.00	11.63	100.00
WS1	53.85	15.38	12.82	10.26	7.69	0.00	0.00	0.00	100.00
WS2	7.84	0.00	19.61	33.33	39.22	0.00	0.00	0.00	100.00

Buses						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	17.24	0.00	55.17	27.59	0.00	100
E2	92.31	0.00	0.00	3.85	3.85	100
E3	6.25	1.56	4.69	65.63	21.88	100
E4	23.81	28.57	28.57	0.00	19.05	100
E5	0.00	0.00	57.14	0.00	42.86	100

Camiones						
	S1	S2	S3	S4	S5	Total
E1	0.00	0.00	20.00	80.00	0.00	100
E2	25.00	0.00	12.50	25.00	37.50	100
E3	12.50	0.00	0.00	68.75	18.75	100
E4	25.00	0.00	0.00	25.00	50.00	100
E5	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100