



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Esquema sostenible de gestión del tránsito basado en sistemas inteligentes de transporte

Tesis que para obtener el grado de

MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES

presenta:

Ing. Edgar Valencia Monje

Asesor:

Dr. José Roberto Pérez Cruz

Morelia, Michoacán, octubre de 2017



UNIVERSIDAD MICHUACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Cuna de héroes, crisol de pensadores

Resumen

La capacidad de los sistemas viales actuales ha sido rebasada debido al descontrolado crecimiento de la tasa de motorización. Esta condición es la principal causa de las congestiones vehiculares, que a su vez son causa de contaminación y gastos excesivos. Estos fenómenos son agravados principalmente por una ordenación incoherente del territorio, escasa regulación de las intersecciones, además de mala sincronización de los semáforos. Dada la complejidad de los sistemas viales, una solución viable es la adopción del prototipo de diseño de sistemas inteligentes de transporte para el control y la gestión del tránsito. Basándose en este prototipo, en este trabajo se presenta un esquema de ordenamiento vial a nivel, el cual fue diseñado y evaluado mediante simulación microscópica del tránsito. El esquema consiste en, restricción de vueltas izquierdas sobre la avenida principal, cambios de sentidos de circulación en calles sub-utilizadas y optimización de las fases de semáforo. Los resultados de simulación muestran que el esquema logra una ganancia hasta del 57 % en los tiempos de espera, así como un 22.5 % de tiempo promedio perdido y un 11.3 % en el tiempo promedio de recorrido, con respecto al estado actual. Esto significa que en el transcurso de un día se logra ahorrar hasta 2:42 horas.

Palabras clave

Gestión del tránsito, Sistemas inteligentes de transporte, Ordenamiento vial sostenible, Simulación microscópica, Gestión paralela del tránsito.

Abstract

The capacity of the road systems has been exceeded due to the uncontrolled growth of the motorization rate. This condition is the main cause of vehicular congestion, which is the main cause of pollution and excessive charges. This phenomena is mainly exacerbated by an incoherent management of the territory, poor regulation of intersections, as well as poor synchronization of traffic lights. Given the complexity of road systems, a viable solution is the adoption of the prototype of a desing of intelligent transportation system for traffic control and management. Based on this prototype, in this work it is presented a road ordering scheme, which was designed and evaluated by microscopic simulation of traffic. The scheme consists of restriction of left turns on main avenues, redirection of traffic in underused streets and optimization of traffic light phases. The simulation results show that the scheme achieves an improvement up to 57 % in waiting times, as well as 22.5 % of average time lost and 11.3 % in the average travel time, with respect to the current situation. This means that in an operational day it can save up to 2:42 hours.

Keywords

Traffic management, Intelligent transportation systems, Sustainable road ordering, Microspocic simulation, Parallel transportation management

Índice general

Índice general	VI
Glosario de términos	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Los sistemas inteligentes de transporte	1
1.3. Propuesta de solución	2
1.4. Objetivo general	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos particulares	3
1.5. Metodología	3
1.6. Organización del documento	5
2. Marco teórico	6
2.1. Sistemas inteligentes de transporte	6
2.1.1. Prototipo de diseño de SIT para el control y gestión del tránsito	6
2.2. Modelado del tránsito	9
2.2.1. Modelo microscópico	9
2.2.2. Unidad de vehículos de pasajeros	12
2.3. Modelo macroscópico	12
2.3.1. Características macroscópicas del flujo del tránsito	14

2.3.2. Densidad	14
2.3.3. Flujo	15
2.3.4. Rapidez o celeridad media	16
2.3.5. Fases del flujo del tránsito	17
2.3.6. El diagrama fundamental	17
3. Estado del arte	20
3.1. GPT aplicado en el desarrollo de ciudades inteligentes	20
3.2. Optimización de señales de control del tránsito basada en GPT . .	22
3.3. Problema de diseño de restricción de giros en las redes viales urbanas	23
3.4. Precio de congestión y peaje óptimo	23
3.5. Control del tránsito utilizando el modelo de colonia de hormigas .	24
3.6. Evasión de congestiones mediante tarifas dinámicas de calles . . .	25
4. Esquema de ordenamiento vial	27
4.1. Descripción de la zona de estudio	27
4.1.1. Modelo del sistema	28
4.2. Recopilación de datos de tránsito	30
4.3. Recuperación de la información de movilidad	38
4.3.1. Identificación de intervalos de tiempo	38
4.3.2. Matrices de origen-destino	39
4.3.3. Análisis de la distribución de los flujos	41
4.3.4. Análisis de las trayectorias	43
4.4. Propuesta de gestión inteligente del tránsito	45
4.4.1. Simulación del estado actual	45
4.4.2. Esquema de ordenamiento vial 1	49
4.4.3. Esquema de ordenamiento vial 2	50
4.4.4. Esquema de ordenamiento vial 3	52
4.5. Resultados de simulación	53
4.5.1. Evaluación de contaminantes y consumo de combustible .	56

5. Conclusiones y trabajo futuro	58
5.1. Recapitulativo	58
5.2. Trabajo futuro	59
 A. Aforos vehiculares	 61
 Bibliografía	 82

Glosario de términos

SIT	Es el un conjunto de soluciones tecnológicas de las telecomunicaciones y la informática, diseñadas para mejorar la operación, la eficiencia y la seguridad en el transporte. Además facilitan la labor de control, gestión y seguimiento.
Crowd-sourcing	Recopilación de datos de múltiples fuentes.
Information retrieval	Organización de los datos para la obtención de información útil (Patrones del flujo del tránsito).
Smart traffic management	Simulación de redes viales y esquemas de optimización del tránsito.
FT	Flujo del tránsito.
TIC	Tecnología de la Información y Comunicación
Posición longitudinal x_i	Posición espacial de un vehículo, a la altura de su defensa trasera.
Longitud l_i	Es la longitud del vehículo, toma desde la defensa trasera hasta la defensa delantera.
Space gap $g_{s,i}$	Distancia intermedia, entre la defensa delantera de un vehículo seguidor y la defensa trasera de un vehículo líder.

Space headway	Distancia entre un vehículo seguidor y un vehículo líder, tomada desde la defensa trasera del vehículo seguidor hasta la defensa trasera del vehículo líder.
$h_{s,i}$	
FIFO	First in first out; el primero que entra es el primero que sale, este concepto esta asociado a la acción que se presenta en una cola, en este caso vehicular, donde el primero que llega a la cola es el primero que sale.
PCU	Passenger car unit.
TOD	Time of day, son los intervalos de tiempo mas significativos a lo largo del día. Los TOD son identificados al analizar el espectro de la señal, que resulta de la medición continua de cierta magnitud a través del tiempo (rapidez, flujo y densidad).
PTM	Parallel transportation management, gestion paralela del transporte.
Rapidez o celeridad media	es la relación entre la distancia fija y el tiempo empleado en completarla, en algunas literaturas se nombra como velocidad punto.
Velocidad	Es una magnitud física de carácter vectorial que expresa la distancia recorrida por un objeto en una unidad de tiempo.
Congestionamiento vehicular	Se refiere a la condición del tránsito en que la densidad de vehículos supera la capacidad de la vialidad disminuyendo el flujo del tránsito.

Tiempos de espera Es el tiempo promedio en que un vehículo permanece sin movimiento dentro del sistema involuntariamente.

Tiempos Perdidos Es el tiempo promedio perdido debido a la conducción mas lenta de lo deseado, incluye los tiempos de espera.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En la actualidad, el crecimiento acelerado del parque vehicular ha superado la capacidad de los sistemas viales. Tan solo en México entre 2000 y 2012 la tasa media de crecimiento anual para vehículos privados fue de 7.4 %, superando 5 veces a la de la población nacional [OH15]. Estas condiciones generan la constante ocurrencia de congestionamientos viales. Los congestionamientos son la causa principal de contaminación ambiental y gastos excesivos de tiempos y dinero [ZSHB09]. Estos fenómenos son agravados debido a la escasa funcionalidad de la mayoría de los sistemas viales. La funcionalidad se ve obstaculizada, por una parte, debido a que el trazado original no permite una ordenación coherente del territorio [GS09]. Por otra parte, la operatividad de la red urbana no se rige por una clasificación de movimientos y características de viajes; por ejemplo, ejes viales mal planeados o inexistentes, escasa regulación de las intersecciones, además de mala sincronización de los semáforos [Kha96].

1.2. Los sistemas inteligentes de transporte

Dada la complejidad de las redes urbanas actuales, las técnicas de ingeniería de tránsito tradicionales resultan insuficientes para diseñar soluciones de gestión eficientes. Una posible solución es adoptar la tendencia mundial de los Sistemas

Inteligentes de Transporte (SIT) [DD10]; los cuales han surgido como aplicaciones de las telecomunicaciones y la informática para mejorar la operación y la gestión del transporte. Según el prototipo generalizado de SIT para el control y gestión del tránsito [SR15, GRLGSR17], una solución apropiada requiere la ejecución de tres fases: recolección de datos por múltiples fuentes (crowd-sourcing) [AAYE⁺12, VKG10, RAV⁺11, CKLZY12], procesamiento y recuperación de la información y desarrollo de sistemas de gestión inteligente de tránsito [ZCWY14]. Sin embargo, debido a la complejidad del problema, la ejecución de estas fases no es directa. En primer lugar es necesario identificar los parámetros más representativos del fenómeno y que necesitan ser recolectados. En segundo lugar, es necesario representar estos parámetros de manera adecuada para realizar un análisis metodológico. Finalmente, es necesario definir una estrategia que permita evaluar las conclusiones obtenidas del análisis para diseñar sistemas de gestión inteligente de tránsito [LGZS10, WFG13, ZLCX16a].

1.3. Propuesta de solución

En este trabajo se presenta un esquema de ordenamiento vial aplicado a una zona específica de la ciudad de Morelia, Michoacán. El desarrollo del esquema está basado en el prototipo de diseño de SIT para la gestión del tránsito [?]. Siguiendo dicho prototipo, la fase de recopilación de datos (crowd-sourcing) fue implementada mediante aforos vehiculares y recopilación de ortofotografías. Para la fase de recuperación de la información, se calcularon densidades y afluencias, mediante la estimación de volúmenes de viajes y la identificación de trayectorias y centroides generadores/attractores. Con esta información se desarrolló un modelo de simulación microscópica que permitió identificar diferentes patrones de movilidad. Por último en la fase de gestión inteligente del tránsito, usando los patrones de movilidad identificados mediante simulación, se propuso un esquema de ordenamiento

vial que consiste en el cambio de sentido de circulación en determinadas calles, la prohibición de vueltas izquierdas y la optimización de las fases de semáforo.

1.4. Objetivo general

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar un esquema de ordenamiento vial, basado en sistemas inteligentes de transporte, enfocado en el desarrollo de soluciones de movilidad sostenible.

1.4.2. Objetivos particulares

- Determinar las características de movilidad presentes en una zona de estudio.
- Identificar los patrones de movilidad a partir del análisis de las características macroscópicas del flujo del tránsito.
- Desarrollar un modelo de simulación microscópica basado en las características determinadas.
- Basándose en los patrones de movilidad, proponer esquemas de ordenamiento vial que permitan incrementar la eficiencia de las características macroscópicas.
- Validar los esquemas propuestos mediante simulaciones, considerando parámetros reales de movilidad.

1.5. Metodología

La metodología, planteada para conseguir los objetivos propuestos, consiste en las fases que se describen a continuación:

1. Para determinar las características de movilidad de la zona analizada, se realizó un estudio de los volúmenes de tránsito, mediante la instalación de aforadores automáticos. Estos sensores aforadores se colocaron de manera estratégica para obtener los datos más representativos en cada intersección y bocacalle.
2. Se desarrolló un modelo conceptual de la zona analizada, basado en un grafo dirigido, para representar calles, conexiones, intersecciones y centroides generadores y atractores de viajes.
3. Basándose en los componentes del grafo y los datos obtenidos del estudio de los volúmenes de tránsito, se construyeron matrices de origen-destino para caracterizar cuantitativamente cada calle y bocacalle mediante flujo, rapidez y densidad.
4. A partir de las matrices origen-destino, se construyó un mapa corocromático, mediante el cual se clasificaron diferentes magnitudes de afluencia y movimientos direccionales. A partir del mapa corocromático y las matrices origen-destino, se detectaron patrones de movilidad, particulares para cada calle.
5. Se desarrolló un modelo de simulación microscópica, calibrado con los datos obtenidos del estudio de los volúmenes de tránsito y las magnitudes calculadas mediante la construcción de las matrices origen-destino.
6. Mediante el modelo de simulación se reprodujo el comportamiento del flujo el tránsito, que se presentan en la actualidad en la zona analizada. A partir de la simulación se obtuvieron parámetros como; tiempos promedios de recorrido, tiempos promedios perdidos, tiempos promedios de espera y velocidad de circulación. Estos parámetros permitieron evaluar el desempeño de la red vial en la zona de estudio.

7. Utilizando los patrones detectados a través del mapa corocromático, se diseñaron 3 propuestas de solución, que permitieran aumentar el desempeño de la red vial. Las propuestas consisten en cambio de sentido de circulación y restricción de vueltas izquierdas en ciertas intersecciones y la reconfiguración de las fases de semáforo en una de las intersecciones.

1.6. Organización del documento

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 se explican conceptos básicos sobre sistemas inteligentes de transporte y teoría del flujo del tránsito.

En el capítulo 3 se presenta una revisión de la literatura más reciente, relacionada con el diseño de esquemas de gestión inteligente del tránsito.

En el capítulo 4 se presenta el desarrollo del esquema de ordenamiento vial así como los resultados de simulación.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones derivadas de la investigación y el trabajo futuro.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Sistemas inteligentes de transporte

Los sistemas inteligentes de transporte (SIT) son herramientas que combinan tecnologías avanzadas en comunicación e información para resolver problemas de transporte, como la congestión del tránsito, la seguridad y la conservación del medio ambiente [SR15, GRLGSR17].

2.1.1. Prototipo de diseño de SIT para el control y gestión del tránsito

En un escenario cooperativo, los SIT extraen y explotan la información útil del entorno, utilizando los servicios inteligentes de planificación de viajes, disponibles a través de internet, junto con algunas plataformas tecnológicas instaladas en los vehículos y en la infraestructura del transporte [SR15]. Desde este punto de vista, la recopilación masiva de datos, denominada *crowd-sourcing*, representa una etapa primordial. La recopilación de datos responde a las preguntas relativas, la recuperación de información relevante en un entorno particular enriquecido con sensores y dispositivos inteligentes. En este contexto, el crowd-sourcing permite la recuperación de un volumen considerable de datos, a partir de los usuarios, sensores e internet [AAYE⁺12, VKG10, RAV⁺11, CKLZY12]. Los datos recuperados por crowd-sourcing deben ser almacenados y procesados adecuadamente para extraer información útil, como patrones de tránsito y pronósticos. Este es el segundo

elemento clave, un módulo de análisis que permita inferir el estado actual del sistema a partir de simulaciones y otras herramientas [ZYC⁺13a]. Por lo tanto, el tercer factor importante implica el desarrollo de un sistema inteligente de gestión del tránsito. Este módulo es un marco conceptual y mediante el cual se pueden diseñar las estrategias apropiadas para lograr el objetivo de los SIT. Por ejemplo, los SIT pueden optimizar los tiempos de viaje de los usuarios o minimizar las emisiones nocivas de CO₂, ayudando a los conductores a elegir la mejor ruta posible para sus destinos [ZLCX16b, ZYC⁺13b, ZSHB09]. Los servicios de SIT dependen en gran medida de la información generada por sensores, dispositivos y usuarios de internet y de la infraestructura del transporte.

En la figura 2.1 se observa la estructura de un prototipo para el diseño de SIT para el control y gestión del tránsito, propuesto por Sánchez Rico [SR15].

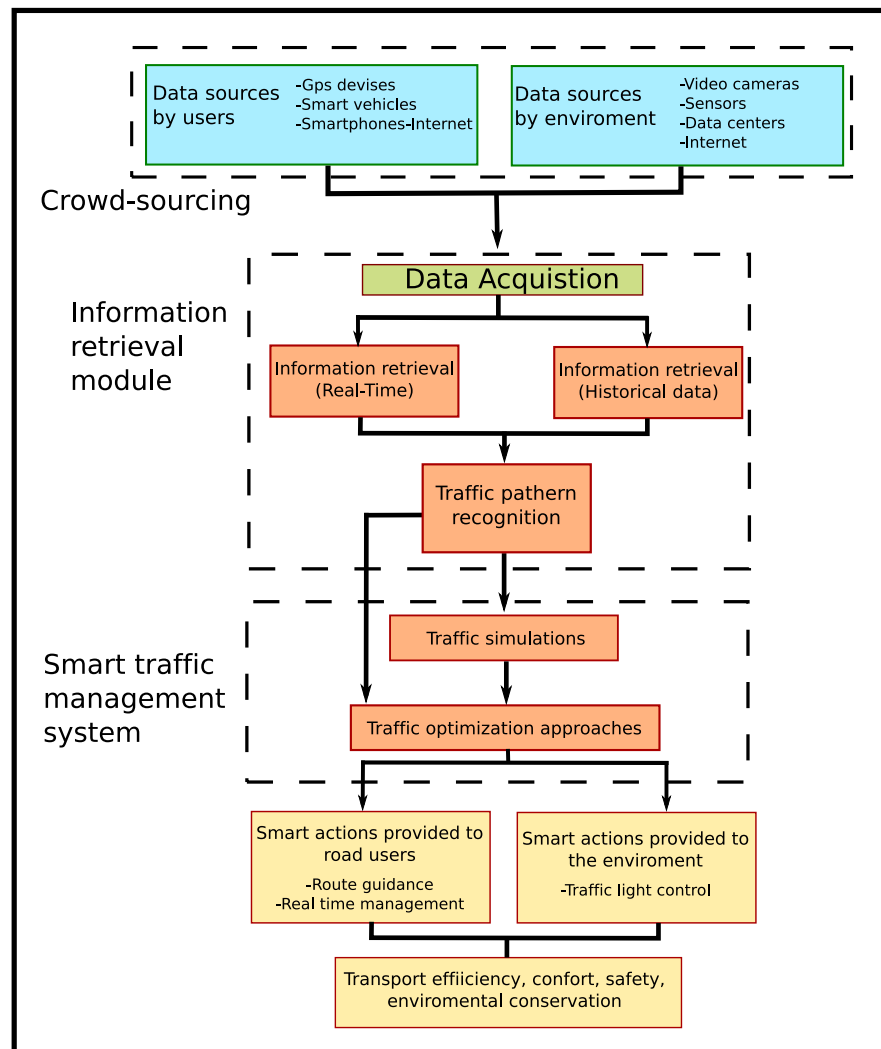


Figura 2.1: Prototipo de diseño de SIT para el control y gestión del tránsito

Como se observa en la figura 2.1 el prototipo de diseño de SIT para el control y la gestión del tránsito consta de 3 módulos, cada uno de estos módulos se compone de pasos a seguir para lograr el control y gestión del tránsito. En el primer modulo se realiza el Crowd Sourcing, este puede ser de múltiples fuentes, datos provenientes de los usuarios y datos provenientes del medio ambiente. Los datos proporcionados del usuarios son aquellos que comparten mediante dispositivos GPS, teléfonos y vehículos inteligentes a través de internet [SMJN14]. Los

datos recabados del ambiente, son recopilados a través de video cámaras, sensores, internet y centros de datos.

El modulo de Information Retrival se realiza la adquisición de datos, los cuales pueden ser datos en tiempo real y datos histórico. Los datos en tiempo real son aquellos que se reciben al momento de ser capturados y son procesados en ese momento. Los datos históricos son aquellos que fueron recabados a través del ambiente y posteriormente se procesan para extraer mayor información. Una vez que es extraída la información de los datos, se realiza el reconocimiento de patrones de tránsito, como puede ser densidad, rapidez, trayectorias de flujo, etc.

El modulo de Smart Traffic Management System consiste en construir la simulación del escenario a evaluar, realizar las propuestas pertinentes tomando en cuenta los patrones de movilidad que fueron encontrados en el modulo anterior. Este proceso se vuelve hasta cierto punto iterativo, ya que se tiene que evaluar las propuestas una y otra vez hasta lograr una optimización de tránsito.

2.2. Modelado del tránsito

El tránsito vehicular es el fenómeno causado por el flujo de vehículos que circulan por una vialidad, ya sea urbana o carretera. Conocer las características del flujo del tránsito permite entender su comportamiento y de esta manera determinar los factores necesarios para proyectar modificaciones en la infraestructura del transporte y en su operatividad. El análisis del flujo del tránsito se puede realizar mediante dos enfoques: el modelo microscópico y el modelo macroscópico.

2.2.1. Modelo microscópico

El flujo del tránsito (FT) a nivel microscópico, asume que el comportamiento individual de un vehículo está en función de las condiciones del tránsito del entorno. El FT microscópico consta de ciertos aspectos dinámicos, y están deter-

minados por la interacción entre los conductores y la conducta individual de los conductores. El desarrollo de un modelo de FT microscópico resulta muy elaborado y su nivel de complejidad es muy alta. Esto se debe a que cada vehículo es modelado con características y comportamientos individuales, tal como ocurre en la vida real. El modelo se conforma asumiendo que cada camino es un enlace en una red, con cierta capacidad de flujo [May90].

Las variables que se consideran en un FT microscópico para un vehículo son:

- longitud, denotada por l_i ;
- posición longitudinal, denotada por x_i ;
- velocidad, denotada por $v_i = \frac{dx_i}{dt}$;
- aceleración, denotada por $a_i = \frac{dv_i}{dt} = \frac{d^2x_i}{dt^2}$.

En la figura 2.2 se muestran las características individuales del vehículo: la posición (x_i) que estará definida a partir de la defensa trasera del vehículo y la longitud (l_i) que es la distancia entre x_i y la defensa frontal del vehículo.

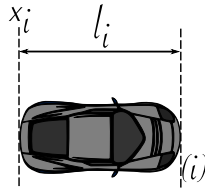


Figura 2.2: Características individuales del vehículo

Para el análisis del FT, mediante el modelo microscópico, el caso base se representa a partir de dos vehículos que circulan de manera consecutiva sobre la misma vía (FIFO). Se dice que el vehículo denotado con la letra (i) es el seguidor y que el vehículo denotado con ($i + 1$) es el líder (ver figura 2.3).

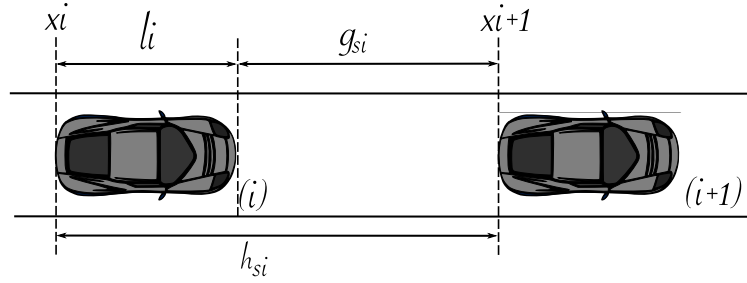


Figura 2.3: Caso base del análisis macroscópico del FT

La figura 2.3 representa el dominio espacial en donde el vehículo i conserva cierta distancia, desde su defensa delantera a la posición del vehículo líder, llamada *space gap* (g_{si}). A la distancia existente entre la posición x_i y la posición x_{i+1} se le denomina *space headway* (h_{si}).

En un diagrama de tiempo-espacio se puede representar la posición de los vehículos con respecto al tiempo, tal y como se muestra en en la figura 2.4.

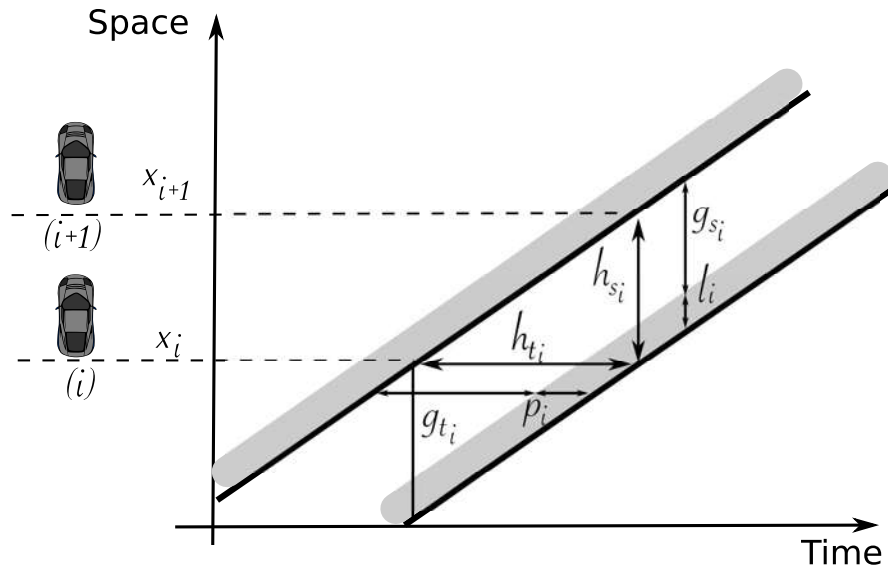


Figura 2.4: Diagrama de tiempo-espacio

La representación de este modelo microscópico se puede aplicar únicamente en escenarios en donde sus vialidades están compuestas de un solo carril por sentido de circulación, éstas deben restringir que los vehículos puedan rebasar, esto con

la finalidad de que se mantengan dentro de una cola y obedecen al orden FIFO (first in, first out, primero en entrar es el primero en salir). Obedeciendo a estas características el modelo puede expresarse fácilmente a múltiples carriles

2.2.2. Unidad de vehículos de pasajeros

Una manera de analizar el FT sin considerar las características individuales de cada modelo de los vehículos, es considerando la denominada unidad de vehículos de pasajeros (PCU, passenger car unit) [MNCG15]. Dicha unidad determina la influencia perturbadora de un vehículo determinado sobre el flujo de tránsito. Esta unidad toma como referencia un automóvil particular¹ al cual se le asocia una magnitud 1. A partir de esta magnitud de referencia se ha propuesto la siguiente taxonomía:

- Un automóvil particular (incluyendo taxis y pick-ups) tiene una equivalencia de 1.
- Un camión mediano tiene una equivalencia de 2.
- Un autobús tiene una equivalencia de 3.
- Una motocicleta 0.5.
- Una bicicleta 0.2.

2.3. Modelo macroscópico

En estos modelos se analizan conjuntos de vehículos o una porción del tránsito, a diferencia del modelo microscópico en donde se analiza vehículo a vehículo [May90].

Para analizar el FT en un modelo macroscópico se consideran tres regiones de estudio:

¹Un automóvil particular se considera como un vehículo compacto tipo sedán.

1. Región temporal (R_t), correspondiente a las mediciones en una sola localidad espacial (dx), durante cierto periodo de tiempo, ejemplo: muestreo mediante un aforador.
2. Región espacial (R_s), correspondiente a las mediciones en un instante de tiempo (dt), sobre una sección de la vialidad con una longitud K , ejemplo una fotografía aérea.
3. Región general ($R_{t,s}$), correspondiente a la medición general tiempo-espacio, la cual puede tener cualquier forma geométrica en el plano (x, t) .

La región general puede ser representada de manera visual como se muestra en la figura 2.5. En el diagrama tiempo-espacio las líneas diagonales representan trayectorias de vehículos, que recorren una distancia espacial durante cierto intervalo de tiempo. De esta forma el ángulo de inclinación de las líneas representan la velocidad del recorrido, es decir en tanto las líneas tiendan a la vertical, la distancia de recorrido será mayor y el tiempo invertido será menor, caso contrario cuando las líneas tienden a la horizontal, la distancia de recorrido será menor y el tiempo invertido será mayor.

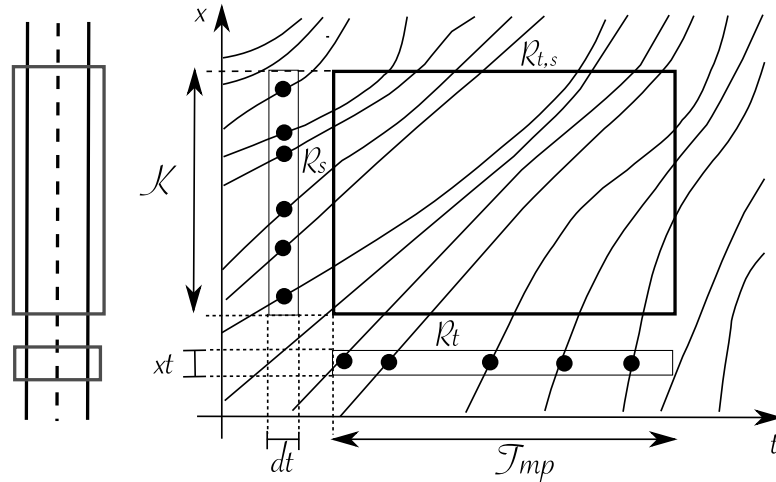


Figura 2.5: Diagrama de tiempo-espacio

2.3.1. Características macroscópicas del flujo del tránsito

Una manera de evaluar el comportamiento de un red es mediante la medición de características que permitan determinar la eficiencia funcional de una red vial. En estudios a nivel macroscópico se evalúan 3 diferentes características: densidad, flujo y rapidez o celeridad media.

2.3.2. Densidad

La densidad representa la cantidad de vehículos que transitan en una sección de una vialidad, normalmente se expresa como vehículos por kilómetro. La densidad permite conocer la cantidad de vehículos que transitan en una sección, sin importar su composición y características individuales.

La densidad k , en una vialidad de un solo sentido, se calcula mediante la ecuación 2.1:

$$k = \frac{N}{K}; \quad (2.1)$$

donde N denota al número de vehículos y K es la longitud de la sección de la vialidad.

En el caso de considerar más de un carril se deberán sumar las densidades parciales de cada uno de los carriles L , con N_l como el número de vehículos en un carril l , véase la ecuación 2.2:

$$k = \sum_{l=1}^L k_l = \frac{1}{K} \sum_{l=1}^L N_l. \quad (2.2)$$

De manera general se puede decir que la densidad es el tiempo total que se emplea para que los vehículos recorran la sección de estudio, dividido por el área de la sección. Esto permite calcular la densidad en un punto en específico usando la región temporal (R_t) con la ecuación 2.3:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{T_{mp} dx} = \frac{1}{T_{mp} dx} \sum_{i=1}^N \frac{dx}{V_i} = \frac{1}{T_{mp}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{V_i}; \quad (2.3)$$

donde T_i denota el tiempo de recorrido, V_i la velocidad del vehículo en cierto periodo de tiempo T_{mp} .

2.3.3. Flujo

El flujo de vehículos q puede ser expresado como una frecuencia, en la cual, se cuenta el total de vehículos N en cierto punto de medición para un intervalo de tiempo T_{mp} , véase la ecuación 2.4:

$$q = \frac{N}{T_{mp}}. \quad (2.4)$$

Para realizar estos estudios se utiliza el análisis de la frecuencia acumulada. La frecuencia acumulativa es la tasa de ocurrencia de valores de un fenómeno menor que un valor de referencia. Para el conteo de vehículos, al analizar la frecuencia acumulativa en un punto, se obtiene una curva similar a una función de arribo.

Para la obtención de las curvas a partir de dos puntos de medición, se pueden detectar características como accidentes y congestiones. Considerando un número finito de instantes de tiempo dentro de un intervalo, el conteo acumulativo se puede obtener con la ecuación 2.5

$$N(t) = \sum_{t'=t_0}^t q(t') = N(t) - 1 + q(t), \quad (2.5)$$

donde T_{mp} es un periodo de tiempo de medición y t' es un instante de tiempo entre t_0 y t .

2.3.4. Rapidez o celeridad media

La rapidez o celeridad media $\bar{v}_s$ no se debe confundir con el término de velocidad, ya que la rapidez es la magnitud escalar o la norma del vector que expresa una velocidad. La rapidez media de un flujo es la relación entre la distancia que recorre, en una sección de medición, y el tiempo que tarda en recorrerla por completo, expresada regularmente por kilómetros por hora.

Existe una única relación entre las tres características del FT del modelo macroscópico, en donde el flujo, la densidad y la rapidez media se puede expresar como se muestra en la ecuación 2.6

$$q = k\bar{v}_s \quad (2.6)$$

Para que esta relación sea posible, existen dos restricciones que se deben de cumplir:

- Sólo es valida para variables continuas o para aproximaciones suaves.
- El tránsito debe de estar compuesto por sub-flujos que cumplan las siguientes suposiciones:
 - Tránsito homogéneo: la composición de los sub-flujos es homogénea.
 - Tránsito estacionario: las trayectorias de todos los vehículos deben de ser paralelas y equidistantes.

Tomando en cuenta lo anterior, tenemos que la la rapidez es igual al flujo entre la densidad, véase la ecuación 2.7.

$$\bar{v}_s = \frac{q}{k} \quad (2.7)$$

2.3.5. Fases del flujo del tránsito

Según el modelo de Kerner [Ker14] existen 3 fases o estados en que el flujo del tránsito y puede ser clasificado como:

- Flujo libre (free-flow), en esta fase, la velocidad se considera infinita, es decir los conductores pueden elegir libremente su rapidez de circulación.
- Flujo sincronizado (capacity-flow), esta fase se define como un estado en el cual todos los vehículos circulan con la misma rapidez, este flujo sincronizado es homogéneo en el tiempo y el espacio.
- Congestionamiento (congested), esta fase se observa a través de un cuello de botella, en donde la densidad es muy alta mientras que la rapidez tiende a cero, este fenómeno es causado por semáforos, disminución del número de carriles, rampas de entrada y salida, accidentes, etc.

2.3.6. El diagrama fundamental

Segun Treiber et al. [TKT12] una de las principales herramientas de análisis del tránsito es el denominado diagrama o relación fundamental .

Denotando al flujo como q , la densidad como k y la rapidez como $\bar{v}_s$, la relación fundamental se define mediante la ecuación 2.6. De esta forma se pueden analizar tres versiones del diagrama fundamental:

- Diagrama densidad-rapidez, el cual se muestra en la figura 2.6, en la que se observa que cuando la densidad tiende a cero, la rapidez puede ser ilimitada. Para el caso contrario, cuando la rapidez tiende a cero, se produce un congestionamiento y la densidad es alta.

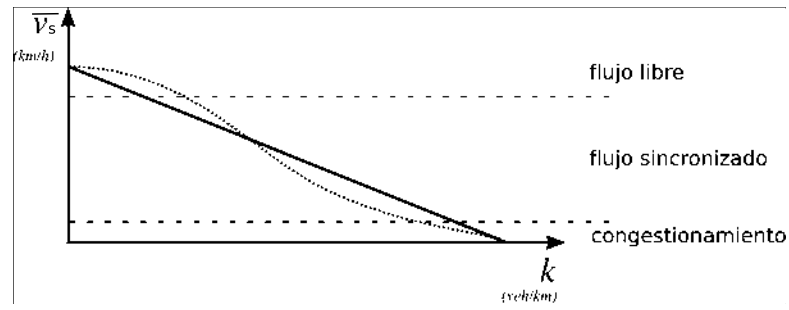


Figura 2.6: Diagrama de densidad-rapidez

- El diagrama rapidez-flujo se muestra en la figura 2.7. En este diagrama se observa que el flujo es cero cuando no hay vehículos o cuando existen demasiados vehículos y no pueden moverse debido a la congestión. Por el contrario se alcanza un flujo máximo cuando el numero de vehículos es igual a la capacidad de la vialidad.

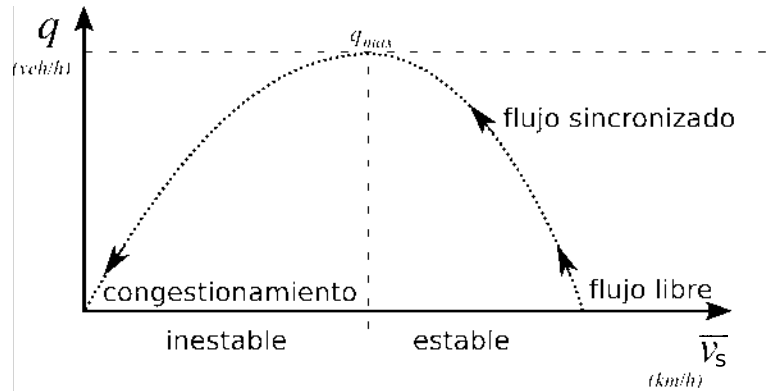
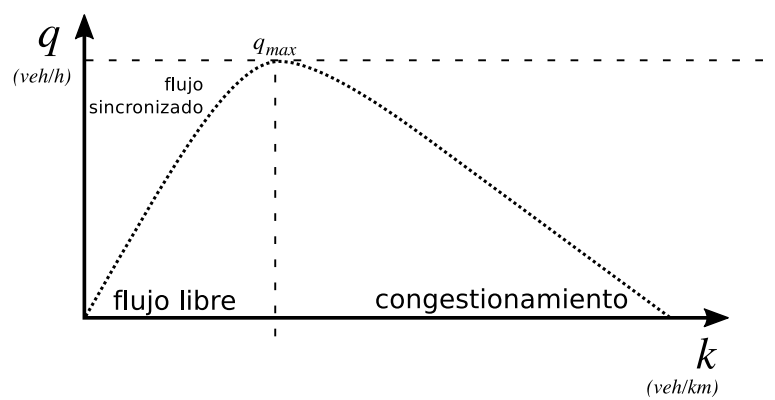


Figura 2.7: Diagrama de rapidez-flujo

- En el diagrama densidad-flujo de la figura 2.8, se muestra que cuando la densidad es cero, el flujo es cero porque no hay vehículos moviéndose.

**Figura 2.8:** Diagrama de densidad-flujo

Capítulo 3

Estado del arte

En este capítulo se presentan propuestas de solución que se han implementado en diversas ciudades, para incrementar la eficiencia de las redes viales. Estas propuestas están basadas en la recopilación de grandes volúmenes de datos a través de crowd-sourcing. Los datos recopilados son analizados para identificar patrones de movilidad. Estos insumos son utilizados para desarrollar modelos de simulación, que permiten evaluar paralelamente el comportamiento del tránsito en una representación artificial del sistema y el comportamiento en el escenario real. Este paradigma de análisis se denomina Gestión Paralela del Tránsito (GPT).

3.1. GPT aplicado en el desarrollo de ciudades inteligentes

Zhu et al. [ZLCX16a] propone una solución basada en el enfoque de sistema Artificial, experimento Computacional y ejecución Paralela (ACP). El enfoque ACP consiste en relacionar un sistema de transporte real con una representación artificial del sistema. En el sistema real se instalan sensores detectores/aforadores del tránsito que aportan parámetros sobre el comportamiento el flujo del tránsito al sistema artificial. En el sistema artificial se pueden diseñar e implementar optimizaciones para mejorar el flujo del tránsito, tales como reconfiguraciones en las señales de control, como semáforos y algunos otros cambios. Con los resultados

del sistema artificial, en el sistema real se pueden implementar las modificaciones mas pertinentes. De esta forma se hace un sistema cíclico en donde el sistema real retro alimenta al sistema artificial y viceversa.

La estructura general de los sistemas de transporte basados en GPT se muestra en la figura 3.1; en ella se observa un ciclo en el que interactúa el sistema real y el sistema artificial. Estos sistemas permiten evaluar un experimento a través del procesamiento masivo de datos, para lograr la gestión y control del tránsito.

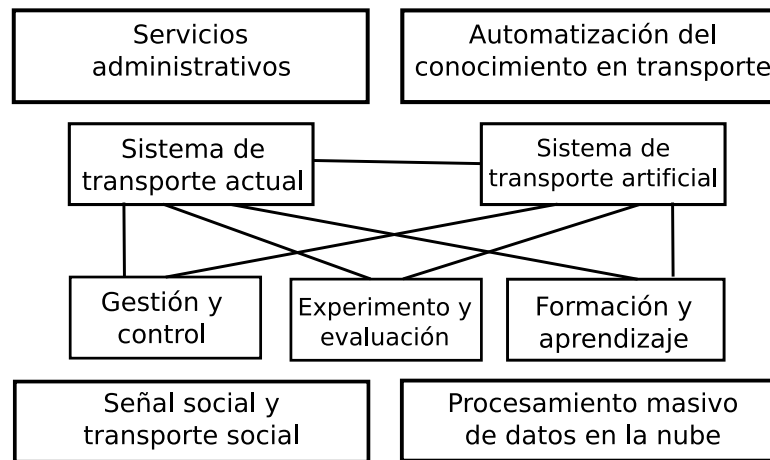


Figura 3.1: Estructura de sistemas de transporte basado en GPT

Siguiendo el enfoque ACP Zhu et al. propone implementar un sistema de crowd sourcing basado en una plataforma en nube para controlar la generación y la disseminación de señales sociales tales como reportes del tránsito, redes sociales y lecturas de sensores dedicados. Suponiendo una plataforma de crowd sourcing adecuada, se implementa un servicio de predicción del flujo del tránsito usando técnicas de análisis masivo de datos. Para este servicio es necesario seleccionar un modelo probabilístico, adecuado para reproducir el comportamiento del flujo del tránsito. Una vez seleccionado el modelo adecuado, se hace una predicción del comportamiento mediante un algoritmo computacional para la estimación de la máxima probabilidad, que sirve para predecir un comportamiento futuro. Final-

mente el modelo estimado se combina con los parámetros del sistema real con el cual se puede diseñar estrategias de optimización adecuadas.

3.2. Optimización de señales de control del tránsito basada en GPT

En este trabajo Zhu et al. [ZYC⁺13b] estudiaron la aplicación de GPT para la optimización del sistema de control de señales de tránsito. GPT proporciona un método eficaz para analizar y comprender el comportamiento de los sistemas de transporte y los factores ambientales. Además aporta un nuevo enfoque de resolución para la optimización y control de los sistemas de transporte urbano. La principal ventaja de GPT es que pueden predecir rendimientos y promueve la optimización, esto permite una buena administración de los recursos económicos.

El proyecto contempla la reconstrucción de cinco intersecciones, en donde se reemplazaron las señales de tránsito original por controladores de señales de tránsito en red, además se instalaron dispositivos de detección del tránsito para recopilar datos. Con la información obtenida se construyó un modelo de simulación del estado actual y un modelo artificial. En el modelo artificial se aplicaron estrategias de control y gestión para la optimización y evaluación de señales de tránsito. Basándose en GPT, la verificación y evaluación del rendimiento de los planes de control se puede llevar a cabo mientras el proyecto está en curso. De esta manera se puede ahorrar tiempo para ajustar y optimizar los parámetros de control.

La mayoría de los proyectos de transporte son muy caros, y sus influencias son muy amplias, es por eso que GPT desempeña un papel importante y garantiza el éxito de todo el proyecto, ya que permite conocer el rendimiento.

3.3. Problema de diseño de restricción de giros en las redes viales urbanas

Esta propuesta se basa en definir una estrategia para la restricción de vueltas en una red vial urbana Long et al. [LGZS10]. La motivación de esta propuesta es que la restricción de vueltas son mejoras efectivas de bajo costo, pero que han tenido poca atención en la literatura. Para seleccionar aquellas vueltas que deben ser restringidas, este trabajo propone un modelo de programación de dos niveles. En el primer nivel el programa busca minimizar el costo de viaje total de una trayectoria, desde el punto de vista de la gestión del tránsito. El segundo nivel busca encontrar la ruta más adecuada de acuerdo al comportamiento de los viajeros, usando la teoría de equilibrio estocástico del usuario [DS77]. Este modelo de programación utiliza un termino de penalización, que es usado para formular el costo de viaje de una ruta. Este termino de penalización se puede considerar como una sanción al costo de viaje de un usuario al tomar una vuelta restringida.

Esta propuesta permite resolver el problema de la selección de restricción de vueltas en una red urbana, con un bajo costo y fácil implementación. Sin embargo esta propuesta no considera el problema de restricción de vuelta cuando se tienen rutas dirigidas a intersecciones semaforizadas.

3.4. Precio de congestión y peaje óptimo

Winkler et al. [WFG13] propone un método de gestión del tránsito basado en el concepto de “precio de congestión ”, el cual se enfoca en reducir la demanda sobre una vialidad asignándole un precio, un precio de acuerdo a una relación oferta-demanda.

Este método de control de la demanda establece una tarifa de circulación en las vialidades, la idea principal es distribuir el flujo uniformemente en todas las posibles rutas. Cuando se desvía el tránsito a rutas distintas, se debe de tener cui-

dado que no sea una ruta más congestionada o fáciles de congestionar, comparada con la que el usuario eligió en un principio. Además fomenta al conductor a viajar en horas donde hay baja actividad.

El primer sistema a nivel mundial basado en “tarifa de congestión” fue nombrado Electronic Road Pricing (ERP), se implementó en Singapur en 1975. Este sistema asigna la tarifa de acuerdo al nivel de flujo de tránsito que se da en el instante de circular por el tramo. Parte fundamental de este sistema, se basa en la ubicación de la cabina de peaje e identificar las tarifas de peaje. Tiene que haber una relación entre la ubicación de la cabina de peaje y un enlace alternativo que puede ser elegido por el usuario de la carretera. Colocar la cabina de peaje en el carril congestionado alto desviará el tránsito a un carril alternativo más cercano.

La principal desventaja de este enfoque es que se deben considerar precios de congestión discretos en lapsos de tiempo considerables, ya que si se permite que los niveles de peaje varíen a lo largo del día puede variar considerablemente la elección de la ruta.

3.5. Control del tránsito utilizando el modelo de colonia de hormigas

El enrutamiento del tránsito es una propuesta de asignación de ruta en la red, llevando a los usuarios a zonas menos congestionadas Sattari et al. [SMJN14] . Esta propuesta de solución combina el ajuste de optimización del tránsito y el enrutamiento dinámico del tránsito, se basa en el algoritmo de optimización de colonia de hormigas. Para el ajuste del control de tránsito, los vehículos alrededor del semáforo compartirán su ubicación, velocidad, dirección e intensidad de la señal con el control cercano del semáforo. Para optimizar el enrutamiento, la densidad del tránsito se asume disponible y se puede actualizar con frecuencia. La

hormiga se compara con un vehículo, en donde esta trata de localizar la ruta mas descongestionada.

A pesar de los diversos avances que se han logrado obtener en las estrategias de enrutamiento de tránsito, el sistema que ha ganado mas popularidad es el GPS, este software de navegación lo podemos tener instalado en Smart-phone o propiamente incorporados en los vehículos. Esta ultima modalidad de GPS funciona de una manera más eficaz debido a que calcula la ruta más apropiada basándose en la posición en la cual se encuentra el vehículo, el destino que ha elegido el conductor, de esta manera elige la distancia más corta. El enrutamiento del tránsito da a conocer a los usuarios rutas alternas para disminuir en los tiempos de recorrido, además que informa de aquellos lugares en los que existe congestionamiento.

3.6. Evasión de congestiones mediante tarifas dinámicas de calles

El esquema de peaje vial dinámico permite controlar la congestión de algunas calles, desviando el nuevo tránsito entrante a vialidades que tengan una menor densidad Soylemezgiller et al. [SKK13].

En este trabajo se analizó la red vial en la ciudad de Besiktas, que esta ubicada en Estambul, Turquía, en la cual, la densidad del tránsito es elevada con respecto al promedio. Las características básicas de la red de carreteras, son las siguientes;

- La red tiene tres pares de caminos de entrada y salida a través del cual los vehículos pueden entrar y salir de la red, respectivamente.
- Un vehículo en cualquiera de los cruces de la red tiene siempre dos caminos alternativos a seguir.
- La fijación de precios es instantáneo, es decir, dos vehículos que entran de forma consecutiva una carretera se pueden tener peaje diferente.

- Los vehículos se mueven continuamente en la red, y no se les permite detener en las uniones o en los segmentos de carretera.
- Los usuarios tienen la información de precios de los próximos caminos alternativos cuando llegan a un cruce.

El esquema permite distribuir de manera equitativa el tránsito, proporcionando al usuario la ruta mas adecuada según sea su destino. De esta manera el esquema regula el tránsito en sus distintas calles, evitando congestionamientos. El costo de peaje se determinan de acuerdo a la densidad que tengan los caminos.

Para evaluar el esquema se realizaron dos simulaciones de la red antes descrita, tomando en cuenta el mismo intervalo de tiempo y el mismo flujo. En el primer caso se simuló la red sin aplicar el peaje dinámico y los resultados demostraron que al no haber una gestión de tránsito, los usuarios elegían la ruta mas corta. Esto provocaba que la capacidad de la vía fuera rebasada, aumentando la densidad en periodos muy cortos, provocando congestionamientos. En el segundo caso se implementó el peaje dinámico, los resultados demostraron que la densidad en los diversos caminos se distribuía de manera homogénea evitando congestionamientos.

En este trabajo se demostró que el esquema de peaje dinámico permite distribuir el flujo evitando congestionamientos. Además es posible replicarlo en redes viales que presenten características similares.

La desventajas de este esquema es que aumenta la distancia de recorrido. Además requiere la implementación de casetas de peaje en lugares estratégicos.

Capítulo 4

Esquema de ordenamiento vial

4.1. Descripción de la zona de estudio

La ciudad de Morelia, capital del estado de Michoacán de Ocampo, es la ciudad más extensa y poblada del estado, además que es la décima octava a nivel nacional, con un área de 10,120 hectáreas y una población de 829,625 habitantes [OH15]. En la figura 4.1 se muestra la macro localización de la zona de estudio.



Figura 4.1: Macro localización de la zona de estudio

La zona seleccionada como objeto de estudio se ubica en el suroeste de Morelia, demarcada por la colonia "Felicitas del Río", en las inmediaciones de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La zona de estudio comprende la avenida Francisco J. Múgica, de la intersección con la avenida Cuautla hasta la intersección

con la calle Ocampo, además de la zona de influencia compuesta por las calles Nicolás Bravo, Alberto Alvarado, Jesús Romero Flores y José Silva Herrera. En la figura 4.2 se muestra la colonia Felicitas del Río, en donde se realizó el estudio.

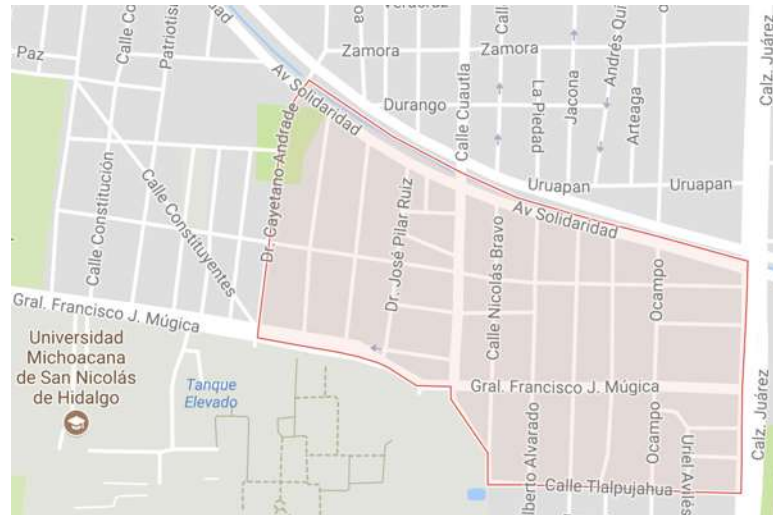


Figura 4.2: Micro localización de la zona de estudio

4.1.1. Modelo del sistema

Para este trabajo, la zona analizada se describió como una red vial, descrita mediante el siguiente modelo del sistema:

- Una calle colectora de dos carriles y dos sentidos de circulación con orientación oriente-poniente.
- Seis calles locales (bocacalles) de dos carriles y dos sentidos de circulación, con orientación sur-norte y que afluyen a la calle colectora mediante seis intersecciones no gestionadas.
- No existe una gestión explícita de las intersecciones, siendo la regla “uno y uno” la única regulación para el tránsito.

En la figura 4.3 se muestra la configuración de la red vial en estudio.

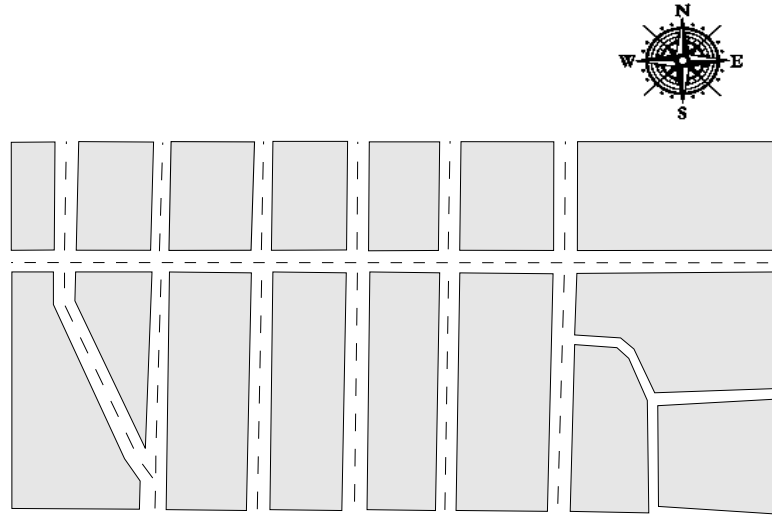


Figura 4.3: configuración de la red vial

Para simplificar el análisis de la red, el sistema original se representó mediante un grafo dirigido (véase la figura 4.4). Definiendo el grafo por el par $G = (V, E)$, el sistema se modela como se describe a continuación.

- Un conjunto V de vértices, que resulta de la unión $V = \{Y \cup Z\}$, donde:
 - $Y = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ es un conjunto de intersecciones enumeradas de 1 a 6, cada uno relacionado con las diferentes bocacalles del sistema;
 - $Z = \{A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N\}$ es un conjunto de centroides identificados por las leras $A, \dots, N$, que representan generadores o atractores de viajes. En otras palabras, los centroides son puntos por donde entran o salen los vehículos del sistema. De esta forma, los centroides representan conexiones a otros subsistemas viales.
- Un conjunto E de aristas, que resulta de la unión $E = \{X \cup T\}$, donde:
 - $X = \{1 - 2, 2 - 1, 2 - 3, 3 - 2, 3 - 4, 4 - 3, 4 - 5, 5 - 4, 5 - 6, 6 - 5\}$ es un conjunto de calles, cada una denotada por los identificadores de las intersecciones que la limitan. Dado que en el sistema real cada calle

tiene dos carriles y dos sentidos, en el grafo se considera a un carril con un sentido como una calle independiente.

- $T = \{A-1, 1-A, B-1, 1-B, C-2, 2-C, D-3, 3-D, E-4, 4-E, F-5, 5-F, G-6, 6-G, H-6, 6-H, I-6, 6-I, J-5, 5-J, K-4, 4-K, L-3, 3-L, M-2, 2-M, N-1, 1-N\}$ es un conjunto de conectores, que representan a aquellas aristas que conectan un centroide a una intersección. Además, permiten establecer las entradas y las salidas al sistema vial modelado.

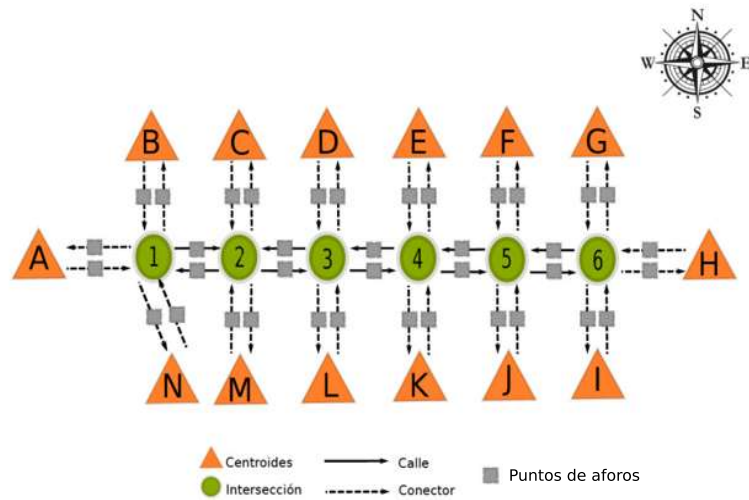


Figura 4.4: Modelo conceptual

4.2. Recopilación de datos de tránsito

La estrategia de recopilación de datos o crowd-sourcing, propuesta en este trabajo, se basó en la medición de los volúmenes de tránsito y la adquisición de mapas digitales de la zona de estudio.

Para la cuantificación del volumen de tránsito se desplegaron sensores aforadores, de presión y de radar, en 36 puntos estratégicos (véase la figura 4.4). Estos

puntos de aforo permitieron cuantificar los flujos en los segmentos de calles que se describen a continuación:

- Avenida Francisco J. Múgica entre calle Dr. José Pilar Ruiz y Cuautla (segmentos A-1 y 1-A, véase las tablas 4.1 4.2).
- Calle Cuautla entre la avenida Francisco J. Múgica y Martin Castrejón (segmentos B-1 y 1-B, véase las tablas 4.3 4.4).
- Avenida Francisco J. Múgica entre calle Cuautla y Nicolás Bravo (segmentos 1-2 y 2-1, véase las tablas 4.5 4.6).
- Calle Nicolás Bravo entre avenida Francisco J. Múgica y Martin Castrejón (segmentos 2-C y C-2, véase las tablas 4.8 4.7).
- Avenida Francisco J. Múgica entre calle Nicolás Bravo y Alberto Alvarado (segmentos 2-3 y 3-2, véase las tablas 4.9 4.10).
- Calle Alberto Alvarado entre avenida Francisco J. Múgica y Martin Castrejón (segmentos 3-D y D-3, véase las tablas 4.12 4.11).
- Avenida Francisco J. Múgica entre calle Alberto Alvarado y Jesús Romero Flores (segmentos 3-4 y 4-3, véase las tablas 4.13 4.14).
- Calle Jesús Romero Flores entre avenida Francisco J. Múgica y Martin Castrejón (segmentos 4-E y E-4, véase las tablas 4.15 4.16).
- Avenida Francisco J. Múgica entre calle Jesús Romero Flores y José Silva Herrera (segmentos 4-5 y 5-4, véase las tablas 4.17 4.18).
- Calle José Silva Herrera entre avenida Francisco J. Múgica y Martin Castrejón (segmentos 5-F y F-5, véase las tablas 4.19 4.20).
- Avenida Francisco J. Múgica entre José Silva Herrera y Ocampo (segmentos 5-6 y 6-5, véase las tablas 4.21 4.22).

- Avenida Ocampo entre avenida Francisco J. Múgica y Martín Castrejón (segmentos 6-G y G-6, véase las tablas 4.23 4.24).
- Avenida Ocampo entre avenida Francisco J. Múgica y Tlalpujahua (segmentos 6-I y I-6, véase las tablas 4.25 4.26).
- Calle José Silva Herrera entre avenida Francisco J. Múgica y Tlalpujahua (segmentos 5-J y J-5, véase las tablas 4.27 4.28).
- Calle Jesús Romero Flores entre avenida Francisco J. Múgica y Tlalpujahua (segmentos 4-K y K-4, véase las tablas 4.29 4.30).
- Calle Alberto Alvarado entre avenida Francisco J. Múgica y Tlalpujahua (segmentos 3-L y L-3, véase las tablas 4.31 4.32).
- Calle Nicolás Bravo entre avenida Francisco J. Múgica y Tlalpujahua (segmentos 2-M y M-2, véase las tablas 4.33 4.34).
- Calle Cuautla entre avenida Francisco J. Múgica y Tlalpujahua (segmentos N-1 y 1-N, véase las tablas 4.36 4.35).

Las mediciones obtenidas de los aforos se resumen en las tablas de la 4.1 a la 4.36.

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	8756	8579	7619	9125	9074

Tabla 4.1: Segmento A-1

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	4225	6487	6441	6435	5605

Tabla 4.2: Segmento 1-A

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	4309	6691	6546	6557	6705

Tabla 4.3: Segmento B-1

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	2920	2941	2880	2888	2968

Tabla 4.4: Segmento 1-B

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	6008	6555	6622	7094	2571

Tabla 4.5: Segmento 1-2

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	4539	5071	5026	3998	4982

Tabla 4.6: Segmento 2-1

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	253	435	350	343	596

Tabla 4.7: Segmento C-2

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	203	328	346	332	526

Tabla 4.8: Segmento 2-C

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	4993	5439	5636	5452	5207

Tabla 4.9: Segmento 2-3

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	2686	1886	2038	1745	2043

Tabla 4.10: Segmento 3-2

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	796	857	780		

Tabla 4.11: Segmento D-3

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	796	857	780	750	872

Tabla 4.12: Segmento 3-D

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	4498	4508	5728	6059	5090

Tabla 4.13: Segmento 3-4

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	2079	1854	2798	2769	2700

Tabla 4.14: Segmento 4-3

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	3566	617	315	609	695

Tabla 4.15: Segmento 4-E

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	552	658	360	669	596

Tabla 4.16: Segmento E-4

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	2987	3016	3318	3333	3193

Tabla 4.17: Segmento 4-5

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	2608	3676	3659	3618	3774

Tabla 4.18: Segmento 5-4

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	508	620	494	506	599

Tabla 4.19: Segmento 5-F

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	321	298	317	329	313

Tabla 4.20: Segmento F-5

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	2824	3715	3808	3587	3835

Tabla 4.21: Segmento 5-6

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	3270	3025	3445	3321	3324

Tabla 4.22: Segmento 6-5

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	1259	1551	1369	1232	1614

Tabla 4.23: Segmento 6-G

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	768	816	884	619	873

Tabla 4.24: Segmento G-6

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	1406	1321	1477	1874	1945

Tabla 4.25: Segmento 6-I

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	2957	3910	3954	4018	4027

Tabla 4.26: Segmento I-6

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	594	555	551	606	524

Tabla 4.27: Segmento 5-J

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	259	274	280	251	270

Tabla 4.28: Segmento J-5

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	619	836	891	924	623

Tabla 4.29: Segmento 4-K

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	426	504	490	483	440

Tabla 4.30: Segmento K-4

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	1229	1491	1538	1458	1502

Tabla 4.31: Segmento 3-L

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	3507	3538	3592	3553	2573

Tabla 4.32: Segmento L-3

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	264	309	242	339	528

Tabla 4.33: Segmento 2-M

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	419	486	406	553	715

Tabla 4.34: Segmento M-2

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	4607	4040	4338	4212	4082

Tabla 4.35: Segmento 1-N

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Veh/día	1711	1575	1616	1550	1505

Tabla 4.36: Segmento N-1

Complementariamente a las mediciones realizadas mediante el despliegue de los sensores, se hizo un levantamiento de trayectorias y de registros de tiempo de las

rutas del transporte público que circulan por la zona de estudio. Estas mediciones fueron usadas para calibrar el modelo de simulación descrito posteriormente en la sección 4.4.1.

4.3. Recuperación de la información de movilidad

Mediante la organización y el procesamiento de los datos de tránsito, recopilados a partir del crowd-sourcing (sección 4.2), se reconocieron diferentes patrones de movilidad, tales como trayectorias, afluencias, distribución de viajes y fluctuaciones del flujo del tránsito en intervalos de tiempo.

4.3.1. Identificación de intervalos de tiempo

Debido a que el flujo del tránsito nos es constante a lo largo de un día, es necesario identificar aquellos periodos en donde se registran las densidades más significativas para modelar la red vial.

A partir del muestreo semanal del flujo del tránsito, se obtiene una señal continua que permite analizar las fluctuaciones de dicha característica a lo largo del tiempo. De esta forma, utilizando el análisis de la señal generada, se identificaron diferentes intervalos de tiempo, que reflejan los registros más significativos del volumen del tránsito durante el día. Estos intervalos son denominados *Time-of-Day* (TOD, por sus siglas en inglés). En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de tres TOD, identificados a partir de una señal obtenida a partir de un aforo.

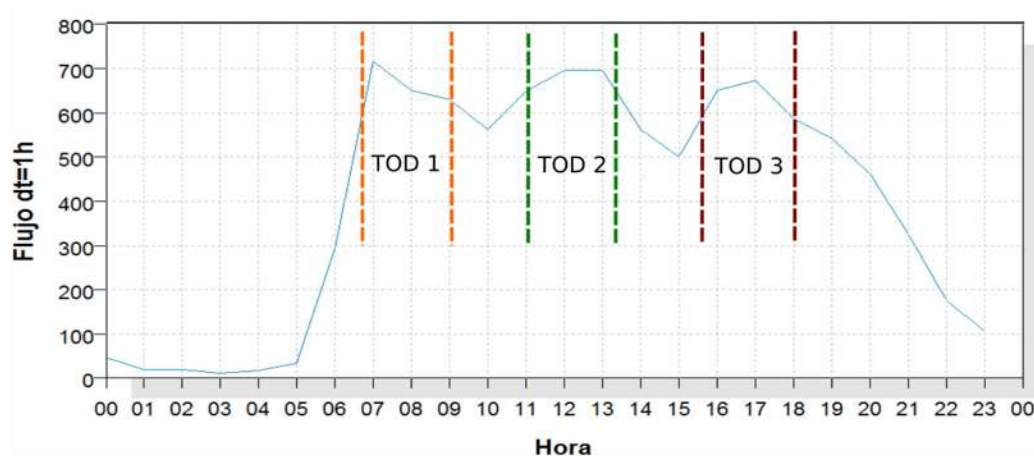


Figura 4.5: Identificación de TOD's

Es importante señalar que cada TOD tiene una duración diferente a otro, debido a que éstos dependen del dinamismo del flujo del tránsito, el cual no es homogéneo durante el día.

4.3.2. Matrices de origen-destino

Una vez que se identificaron los diferentes TOD, en cada punto de aforo, el sistema fue dividido en micro-sistemas, los cuales están compuestos por una intersección con sus propias entradas y salidas (bocacalles). Partiendo de esta premisa fue posible definir 2 características de un micro-sistema:

- El volumen de vehículos que ingresa a una intersección corresponde con el volumen de vehículos que sale.
- El total de vehículos que ingresa a una intersección se distribuye proporcionalmente entre sus entradas y salidas. Por lo tanto, cada entrada y cada salida tiene un porcentaje de distribución de viajes.

Bajo este esquema, la zona de estudio se dividió en seis micro-sistemas. Cada micro-sistema fue representado mediante una matriz de origen-destino. Las matrices de origen-destino son tablas que ordenan en filas y columnas el resultado de viajes generados desde un sitio hacia otro. De esta forma, los parámetros relacionados en cada matriz se asociaron a una medida correspondiente de flujo y de rapidez media. Así, a través de las matrices origen-destino se identificaron la diferentes trayectorias usadas por los usuarios de la red y se cuantificaron las afluencias correspondientes.

Para analizar las intersecciones, en este trabajo se propuso utilizar una modificación a las matrices de origen y destino para expresar en cada celda de la tabla, las entras y las salidas de una intersección. De esta forma en la tabla 4.6 las celdas con la letra *S* representan las salidas y las celdas con la letra *E* representan las entradas. Además, las celda central muestra el identificador de la intersección analizada.

		E	S		
		321	180		
S	416	1		204	E
E	582			449	S
		232	171		
		S	E		

Figura 4.6: Flujo para el TOD 1 del micro-sistema 1

Considerando un periodo de tiempo Δt y n bocacalles, el total de vehículos (densidad $k(\Delta t)$), distribuidos por dicha intersección, se calcula con el acumulado de los flujos entrantes por las diferentes bocacalles:

$$k(\Delta t) = \sum_{i=1}^n qE_i(\Delta t) \quad (4.1)$$

Dado que todos los vehículos que ingresan a una intersección deben salir (no se estacionan), se consideran n flujos de salida qS_i . Estos flujos de salida corresponden

con los flujos registrados en cada bocacalle. Por lo tanto, la distribución de viajes para cada flujo de salida se estima proporcionalmente con los flujos registrados en cada bocacalle, tal como se muestra en la ecuación 4.2:

$$x = \frac{qE_x(100)}{\sum_{i=1}^n qE_i(\Delta t)} \quad (4.2)$$

A partir de las matrices origen-destino con flujos y utilizando la ecuación 4.2, se generaron matrices origen-destino con porcentajes de distribución de viajes. En la tabla 4.7 se muestran los porcentajes de giro del micro-sistema 1.

		E	S		
		25.10%	14.10%		
S	32.61%	1		15.97%	E
E	45.57%			35.15%	S
		18.14%	13.36%		
		S	E		

Figura 4.7: Tabla de porcentajes de giro para el TOD 1 del micro-sistema 1, TOD 1.

Utilizando la matriz de porcentajes de distribución de viajes se determinaron las trayectorias y afluencias en cada micro-sistema para los diferentes TOD involucrados.

4.3.3. Análisis de la distribución de los flujos

Las trayectorias de flujo, son todas aquellas posibles rutas que puede tener un vehículo al momento de entrar al sistema. El sistema cuenta con 14 posibles entradas y cada entrada tiene 13 posibles salidas, tomando en cuenta esto, dentro del sistema existen 182 trayectorias. Dado que los equipos de aforos únicamente proporcionan datos puntuales, fue necesario calcular los volúmenes por cada una de las 182 trayectorias, que se describe a continuación.

Como ejemplo, en la intersección 1, esquematizada en la figura 4.8, se muestran la distribución de flujos que ingresan por los centroides *A*, *B* y *N* más los que

proviene de la intersección 2. Considerando 582 vehículos que ingresan por el centroide *A*, 281 vehículos continúan a la intersección 2, mientras que 111 salen por el centroide *B* y 189 salen por el centroide *N*. En otro caso, considerando 205 vehículos que provienen de la intersección 2, 92 vehículos salen por el centroide *A*, 64 salen por el centroide *B* y 49 por el centroide *N*.

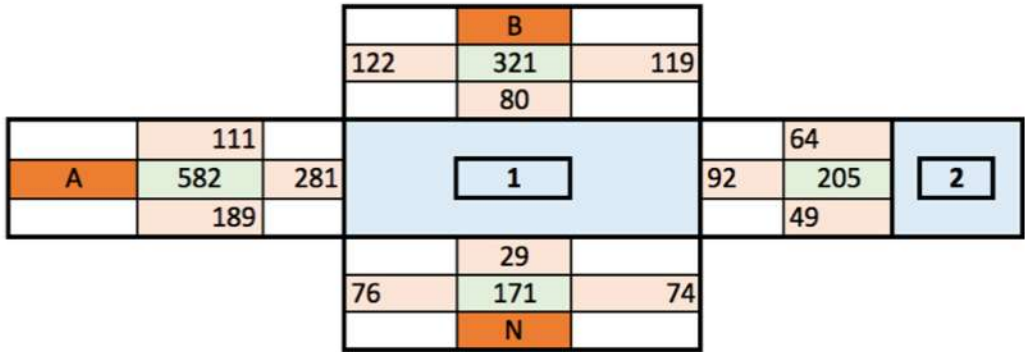


Figura 4.8: Distribución de viajes de los centroides *A*, *B* y *N* y la intersección 2 del TOD 1

Para cuantificar las afluencias en todas la trayectorias se correlacionaron iterativamente las seis matrices de distribución de viajes, de tal forma que el volumen saliente de una intersección fuera el volumen entrante de la subsecuente. En la figura 4.9 se ejemplifica este análisis iterativo, en donde se considera que por el centroide *A* ingresan 582 vehículos, que son distribuidos de acuerdo a los porcentajes de salida en cada intersección. Este procedimiento se replicó para cada uno de los centroides y sus respectivas magnitudes. Además, el proceso completo se aplicó para los distintos TOD registrados a lo largo de un día.

		B		C		D		E		F		G	
		111		13		60		15		10		14	
A	582	1	281	2	248	3	127	4	95	5	75	6	48
		189		20		61		17		10		13	
		N		M		L		K		J		I	

Figura 4.9: Distribución de viajes del centroide *A*, a cada uno de sus destinos, TOD 1

4.3.4. Análisis de las trayectorias

A partir de las tablas de distribución de viajes, fue posible construir un mapa corocromático de afluencia para cada uno de los 3 TOD, en el cual se observa la intensidad de los flujos; véanse las figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13.

En la figura 4.10 se muestra la notación utilizada para identificar las diferentes intensidades del flujo. Se establecieron cinco grados de intensidad, cada uno asociado a cierto volumen de tránsito.

Intensidad del flujo:	
Muy alto (más de 400 veh/TOD)	
Alto (300-400 veh/TOD)	
Mediano (150-300 veh/TOD)	
Bajo (50-150 veh/TOD)	
Muy Bajo (0-50 veh/TOD)	

Figura 4.10: Intensidad de flujos



Figura 4.11: Mapa corocromático de afluencia, con intensidades de flujo del TOD 1

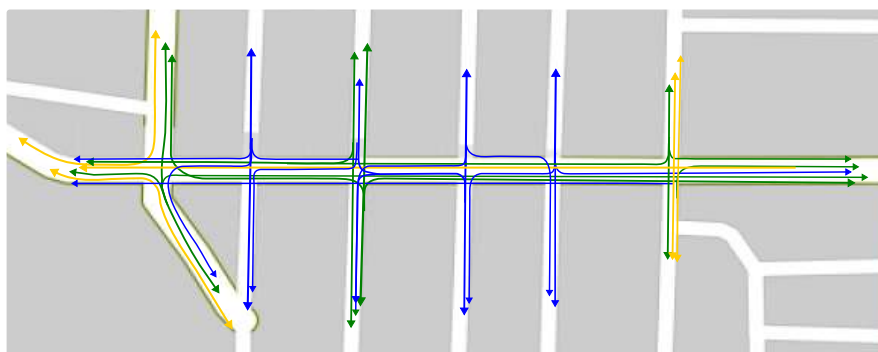


Figura 4.12: Mapa corocromático de afluencia, con intensidades de flujo del TOD 2

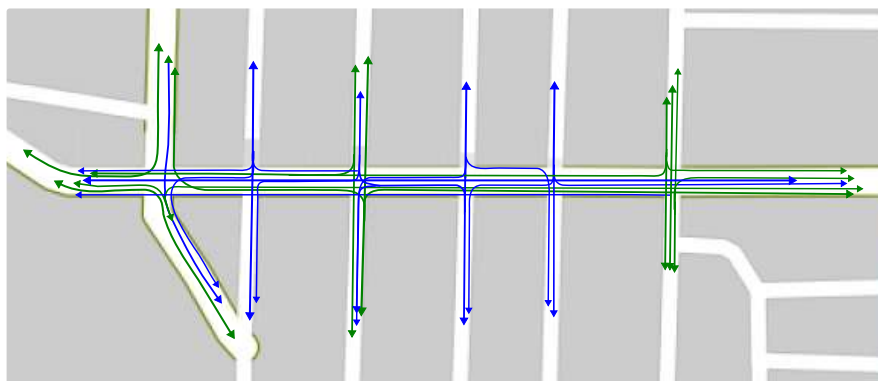


Figura 4.13: Mapa corocromático de afluencia, con intensidades de flujo del TOD 3

El mapa corocromático de flujo permite visualizar el uso de las vialidades, en este caso se muestra los tres TOD de un día. A partir de las figuras 4.11, 4.12, 4.13 se puede observar que hay calles con intensidades mucho mayor que otras a lo largo de todo un día. A partir de este patrón se determinó que existen calles sub-utilizadas como lo son las calles Nicolás Bravo, José Silva Herrera y Jesús Romero flores. Conociendo las calles sub-utilizadas es posible reducir la densidad de las calles saturadas. Al disminuir la densidad se disminuye el flujo del tránsito, lo que repercute en aumentar la velocidad de circulación.

4.4. Propuesta de gestión inteligente del tránsito

A partir de la información de movilidad recuperada se desarrolló un modelo de simulación microscópica que permite reproducir diferentes situaciones del tránsito, dada la configuración actual del sistema vial. Para la calibración del modelo de simulación se ajustaron los flujos de tránsito, las trayectorias y los viajes de acuerdo a los TOD correspondientes. De esta forma, un día de operación se reprodujo mediante la unión de seis periodos de flujos significativos, tres de los cuales corresponden a los TOD determinados y tres más corresponden a estados transitorios entre los diferentes TOD.

Basándose en los parámetros obtenidos del modelo de simulación y en el paradigma de gestión paralela del tránsito (PTM), se diseñaron tres esquemas de ordenamiento vial. Los esquemas propuestos se enfocan en cambiar la operatividad de ciertas calles para agilizar el flujo del tránsito. Dichos esquemas de ordenamiento fueron evaluados usando el mismo modelo de simulación desarrollado, obteniendo resultados satisfactorios. En los siguientes apartados se explican los detalles de los esquemas propuestos.

4.4.1. Simulación del estado actual

El sistema simulado corresponde con el modelo del sistema descrito en la sección 4.1.1. Este modelo consiste de 6 intersecciones en donde la regulación se hace mediante la regla “uno y uno”. Sin embargo, en la realidad esta regla no siempre se respeta, dando lugar a la obstrucción de las intersecciones, lo que dificulta el flujo continuo en la vialidad perpendicular como se muestra en la figura 4.14.

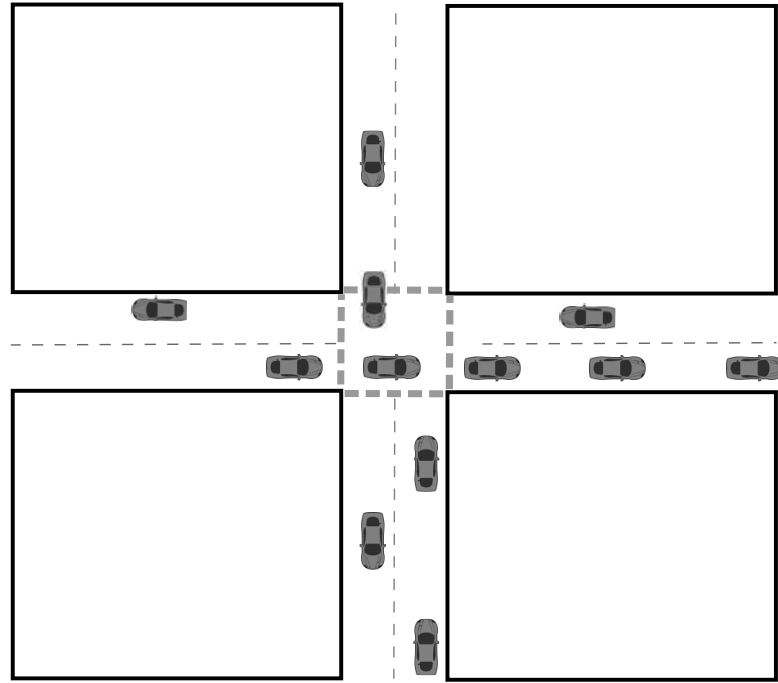


Figura 4.14: Obstrucción de una intersección

Debido a que el simulador no cuenta con algoritmos que permitan imitar el comportamiento antes descrito y dada la complejidad de las intersecciones, se optó por establecer prioridades de circulación para cada bocacalle. Por lo tanto, se establecieron dos niveles de prioridad, en donde la prioridad 1 tiene preferencia sobre la prioridad 2. Esta configuración se muestra en la figura 4.15.

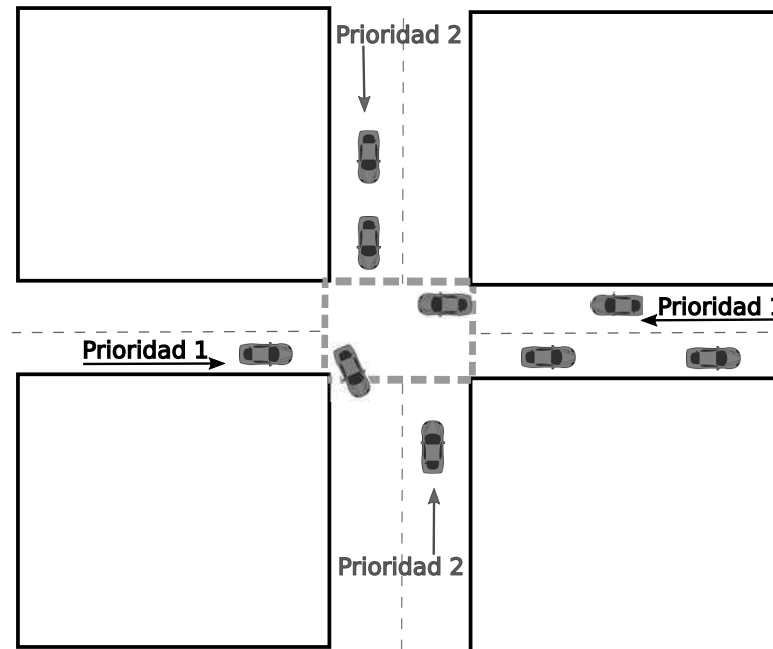


Figura 4.15: Prioridad de circulación

Además de establecer las prioridades por bocacalle, el simulador fue configurado del tal forma que permitiera que las intersecciones fueran obstruidas por los vehículos, es decir, que ante la formación de colas, los vehículos no dejaran libre el paso sobre la intersección. De esta manera se logró imitar el comportamiento que se tiene en esta zona.

Dentro del sistema simulado, la única intersección gestionada por un sistema de semáforo es la que corresponde a la de Francisco J. Múgica y la calzada Benito Juárez. Este sistema de semáforo impone un ritmo de circulación al resto del sistema. Como la calzada Juárez no fue integrada en este modelo de simulación, solo fueron simuladas las fases del semáforo de acuerdo a la configuración real y los flujos de tránsito registrados en las calles correspondientes. Las fases involucradas en dicha intersección se muestra en la figura 4.16

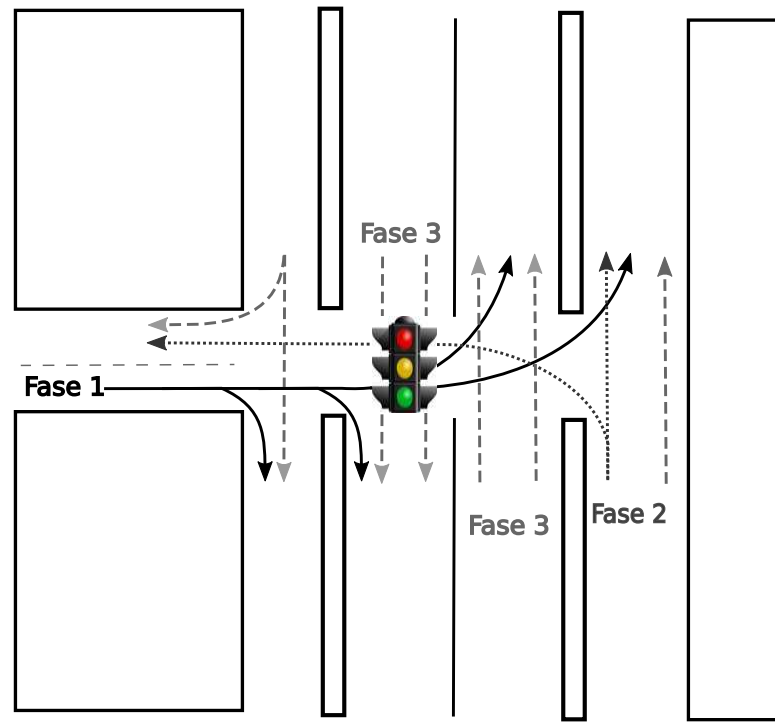


Figura 4.16: Fases del semáforo en la intersección Francisco J. Múgica y calzada Juárez

En la figura 4.16 una fase denota a cada una de las combinaciones de movimientos que reciben cierta prioridad simultanea. Para el caso del sistema simulado existen 3 fases, las cuales están configuradas de la siguiente forma:

- Fase 1 duración: luz verde 27 segundos, luz amarilla 3 segundos.
- Fase 2 duración: luz verde 18 segundos, luz amarilla 3 segundos.
- Fase 3 duración: luz verde 54 segundos, luz amarilla 3 segundos.

A través de la simulación se establecieron los diferentes parámetros de rendimiento, que caracterizan al sistema analizado, tales como tiempos de recorrido, tiempos perdidos y tiempos de espera (en la intersección y en los semáforos) como se muestra en la tabla 4.37.

Características de rendimiento (por viaje)	Estado actual
Tiempo promedio de espera	16.18 s
Tiempo promedio perdido	46.22 s
Tiempo promedio de recorrido	65.19 s

Tabla 4.37: Resultados de simulación del estado actual

Utilizando el modelo de simulación desarrollado se diseñaron tres esquemas de ordenamiento vial, los cuales se explican en las siguientes secciones.

4.4.2. Esquema de ordenamiento vial 1

Analizando el flujo en la intersección 1, se observó que el 32.28 % continua a la intersección 2, mientras que el 12.78 % se desvía al centroide B y el 21.73 % se desvía al centroide N . Por otro lado el 12.58 % de los vehículos que ingresan a la intersección 1 provienen del segmento $1 - N$. A pesar de que este flujo no es muy elevado, entorpece a los flujos principales en la intersección 1. Por otra parte se observó que en la intersección 2, el porcentaje de flujo aportado por el centroide M es tan solo del 3.41 %, mientras que en el centroide C aporta el 3.75 %.

De estas observaciones se concluyó que los segmentos $N - 1$, $2 - M$ y $C - 2$ están siendo sub-utilizados mientras que existe una saturación importante en la intersección 1. Por lo tanto para reducir la densidad en la intersección 1 y aumentar la velocidad del flujo en los segmentos de $A - 2$, $2 - A$, $B - 1$ y $1 - B$ se propuso eliminar los flujos en los segmentos $N - 1$, $2 - M$ y $C - 2$, conservando solo los flujos $1 - N$, $M - 2$ y $2 - C$ como se muestra en la figura 4.17. Lo anterior implica la restricción a un solo sentido de circulación en las calles Nicolás Bravo y Cuautla, entre Av. J. Múgica y la Tlalpujahua.

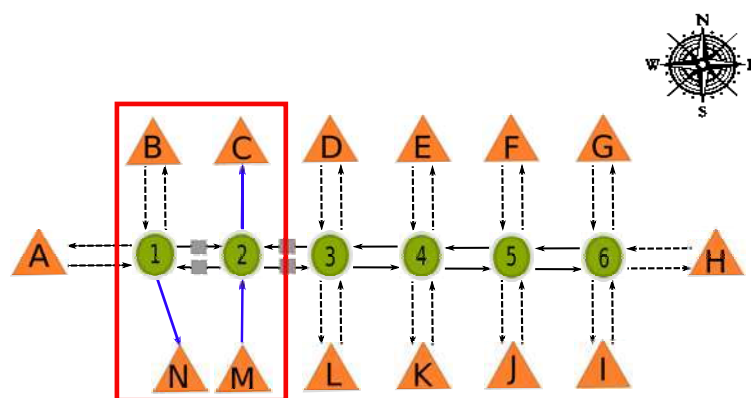


Figura 4.17: Propuesta de solución 1, cambios de sentido de circulación

Esta propuesta tiene dos objetivos: aumentar el flujo en la calle Nicolás Bravo y reducir el número de giros sobre la intersección 1 (Música y Cuautla), como se muestra en la figura 4.18.

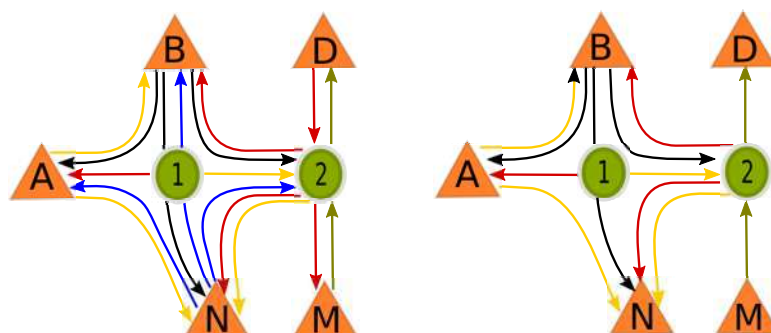


Figura 4.18: Del lado izquierdo se muestra la configuración actual. En el lado derecho se muestra la configuración propuesta

4.4.3. Esquema de ordenamiento vial 2

Analizando la situación en las calles Jesús Romero Flores y José Silva Herrera, se observó cierta problemática en las intersecciones 4 y 5. Para la intersección 4 se tiene que el centroide K aporta el 8.06 %, mientras que el centroide E solo el 10.08 %. Por otro lado en la intersección 5, el centroide F aporta el 3.01 % mientras que el centroide J el 3.41 %. Estas dos intersecciones, a pesar de no tener aportaciones significativas, inducen giros a la izquierda sobre la avenida

principal obstaculizando el flujo. Tomando ventaja de la sub-utilización de las calles Jesús Romero Flores y José Silva Herrera, se propusieron cambios de sentido de circulación sobre éstas. Para la calle Jesús Romero Flores se eliminaron los flujos en los segmentos $K - 4$ y el segmento $4 - E$, manteniendo la circulación en los segmentos $E - 4$ y $4 - K$. Por otro lado en la calle José Silva Herrera se eliminaron los flujos en los segmentos $F - 5$ y $5 - J$, de esta manera se mantiene el sentido de circulación en los segmentos $J - 5$ y $5 - F$. Lo anterior implica que en la calle Jesús Romero Flores y José Silva Herrera se restrinja a un solo sentido de circulación como se muestra en figura 4.19.

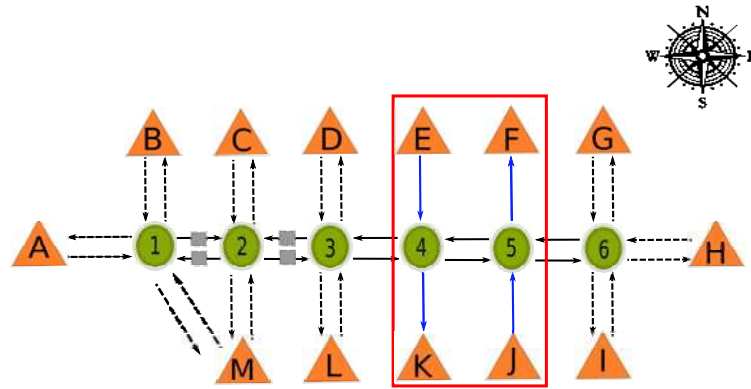


Figura 4.19: Cambios de sentido de circulación en dos calles

Este esquema tiene dos objetivos: aumentar el flujo en las calles sub-utilizadas y disminuir los giros en la avenida J. Múgica para agilizar el flujo como se muestra en la figura 4.20.

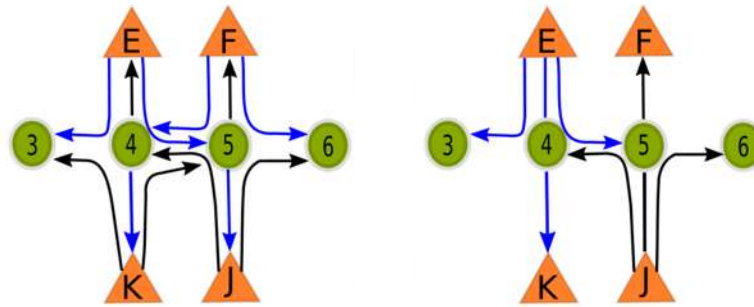


Figura 4.20: Del lado izquierdo se muestra la configuración actual. En el lado derecho se muestra la configuración propuesta

4.4.4. Esquema de ordenamiento vial 3

En este esquema se consideran las dos propuestas anteriores, además de que se restringen giros a la izquierda cuando se circula sobre la Av. J. Múgica. El objetivo de restringir estos giros es mantener el flujo continuo en las intersecciones, sin obstruir el paso a los demás sentidos de circulación. Esto implica restringir los giros a la izquierda sobre la Av. J. Múgica en las intersecciones con las calles Nicolás Bravo, Jesús Romero Flores y José Silva Herrera. De esta forma los únicos giros a la izquierda son en las intersecciones con las calles Cuautla, Alberto Alvarado y la Av. Melchor Ocampo. El resultado de esta integración se representa en la figura 4.21.

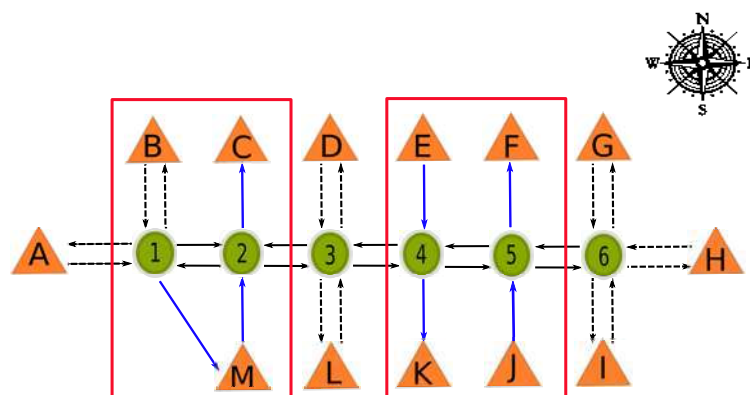


Figura 4.21: Esquema Integral

Complementando el ordenamiento vial de este esquema, se hizo una reconfiguración en las fases del semáforo de la intersección de la Av. J. Música con la Calzada Benito Juárez. Con esta reconfiguración las fases del semáforo se fijaron de la siguiente manera:

- Fase 1 duración: luz verde 32 segundos, luz amarilla 3 segundos.
- Fase 2 duración: luz verde 13 segundos, luz amarilla 3 segundos.
- Fase 3 duración: luz verde 24 segundos, luz amarilla 3 segundos.

Cabe señalar que esta reconfiguración se hizo ajustando las fases del semáforo progresivamente mediante diversas simulaciones.

4.5. Resultados de simulación

Para determinar la eficiencia del esquema propuesto, se compararon los parámetros de rendimiento del sistema bajo la configuración actual contra los obtenidos a partir de la nueva configuración.

Para las pruebas de rendimiento se simularon seis TOD, de los cuales tres representan los horarios de mayor flujo. De esta forma se simuló un día representativo. Con este escenario se hicieron dos simulaciones, una con la configuración del estado actual y otra con la configuración del esquema propuesto. Los parámetros evaluados fueron, tiempo promedio de espera, tiempo promedio perdido y tiempo promedio de recorrido. En la tabla 4.38 se muestran los resultados obtenidos.

Características de rendimiento (por viaje)	Estado actual	Esquema de ordenamiento	Mejora
Tiempo promedio de espera	16.18 s	6.93 s	57.17 %
Tiempo promedio perdido	46.22 s	35.82 s	22.50 %
Tiempo promedio de recorrido	65.19 s	57.83 s	11.29 %

Tabla 4.38: Comparación de resultados

Como se puede apreciar en la tabla 4.38, una de las principales mejoras es que se logra disminuir el tiempo promedio de espera hasta en un 57.17 %, es decir en cada viaje se ahorran hasta 9.25 segundos; incrementando los flujos de tránsito a un tiempo promedio de recorrido hasta en un 11.29 %, lo que significa que se disminuyen 7.36 segundos por viaje, esto significa que en el transcurso de un día se logra ahorrar 2:42 horas. En la figura 4.22 se muestra una gráfica de los tiempos de espera registrados en un día.

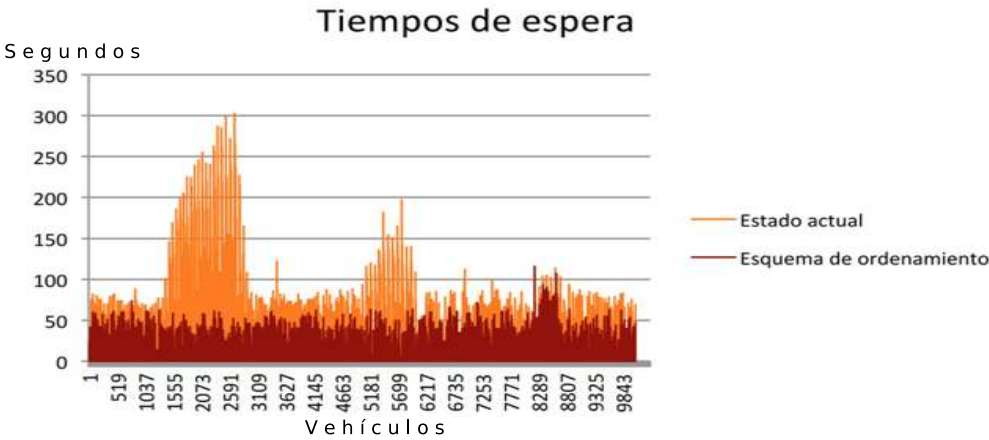


Figura 4.22: Tiempos de espera

En la figura 4.22 se puede apreciar que entre los viajes 1555 y 2591, que representan los viajes realizados en promedio entre las 7:30 y 9:30 horas, el tiempo de espera se reduce hasta en 250 segundos. Por otra parte, entre los viajes 5181

y 6217, que representan los viajes realizados en promedio entre las 13:30 y 15:00 horas, el tiempo de espera se reduce hasta en 150 segundos.

En la figura 4.23 se muestran los tiempos perdidos. Como se puede apreciar entre los viajes 1221 y 3501, entre las 7:30 y 9:30 horas, el tiempo perdido se reduce hasta en 250 segundos. Por otra parte, entre los viajes 4881 y 6101, que representan los viajes realizados en promedio entre las 13:30 y 15:00 horas, el tiempo de espera se reduce hasta en 150 segundos.



Figura 4.23: Tiempos perdidos

De la figura 4.24 se hace notar que entre los viajes 1221 y 3051, que representan los viajes realizados en promedio entre las 7:30 y 9:30 horas, el tiempo de espera se reduce hasta en 250 segundos. Por otra parte, entre los viajes 4881 y 6101, que representan los viajes realizados en promedio entre las 13:30 y 15:00 horas, el tiempo de espera se reduce hasta en 150 segundos.



Figura 4.24: Tiempos de recorrido

4.5.1. Evaluación de contaminantes y consumo de combustible

El modelo de simulación contempla la estimación de la emisión de contaminantes y consumo de combustible, basándose en el modelo propuesto en el Manual de Factores de Emisión para el Transporte por Carretera (HBEFA) [MK17]. El HBEFA proporciona factores de emisión para todas las categorías de vehículos actuales (vehículos de pasajeros, vehículos pesados, autobuses, etc.) divididos en diferentes categorías para una gran variedad de situaciones de tránsito. SUMO es capaz de simular emisiones de contaminantes vehiculares basadas en esta aplicación. El HBEFA contiene información sobre contaminantes, como el Monóxido de carbono (CO), Dióxido de carbono (CO₂), Hidrocarburos (HC), Partículas suspendidas (PM_x) y Óxido de nitrógeno (NO_x), además del consumo de combustible. Estos factores fueron evaluados en la simulación del estado actual y en la simulación de la propuesta del esquema de ordenamiento. Los resultados se muestran en la tabla 4.39.

Emisiones y consumo de combustible	Estado actual	Esquema de ordenamiento	Mejora
CO (mg/s)	1376561.03	1247228.61	9.4 %
CO ₂ (mg/s)	95916024.39	82898447.81	13.6 %
HC (mg/s)	33670.81	27242.32	19.1 %
PM _x (mg/s)	10940.98	10286.41	6.0 %
Nox (mg/s)	199482.62	179399.66	10.1 %
Combustible (mL/s)	38240.25	33050.34	13.6 %

Tabla 4.39: Comparación de resultados

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Recapitulativo

En este trabajo se presentó un esquema sostenible de ordenamiento vial a nivel de piso, basado en el prototipo de diseño de sistemas inteligentes de transporte para el control y la gestión del tránsito. El esquema fue diseñado a partir del paradigma del gestión paralela del tránsito, el cual esta centrado en evaluar la reconfiguración de una red vial a partir de simulaciones microscópicas. De esta forma una característica primordial del esquema es que permite incrementar la eficiencia de la red vial, mediante la restricción de vueltas izquierdas sobre la avenida principal, cambios de sentidos de circulación en calles sub-utilizadas y optimización de las fases de semáforo. Para desarrollar este esquema se modeló una zona que presenta problemas de movilidad en la ciudad de Morelia, Michoacán. Para facilitar el análisis se construyo un modelo conceptual basado en un grafo dirigido, en donde los vértices representan centroides (entradas y salidas al sistema) e intersecciones y las aristas representan las calles. El modelo de simulación microscópica fue calibrado utilizando técnicas de crowd-sourcing. A partir de crowd-sourcing se obtuvieron datos sobre volúmenes de tránsito los cuales fueron procesados posteriormente para obtener patrones de tránsito como matrices de origen-destino y trayectorias de flujo. Analizando estos patrones se identificaron calles sub-utilizadas, calles altamente transitadas e incoherencia en los sentidos de circulación. Considerando estos patrones se desarrolló un modelo de simulación

en donde se modifico la configuración de la red para atender dichos problema. Los resultados de simulación mostraron que el esquema logra disminuir hasta el 57 % en los tiempos de espera, así como un 22.5 % en los tiempos perdidos y un 11.3 % en los tiempos de recorrido, con respecto al estado actual. Esto significa que en el transcurso de un día se logra ahorrar hasta 2:42 horas.

A pesar de las mejoras obtenidas, el modelo incrementa la distancia de recorrido de 210 a 620 metros en el 14.5 % del total viajes. Cabe señalar que estas trayectorias son las que presentan menos afluencia en el sistema. Con lo anterior se tiene que en promedio la distancia de recorrido se incrementa 49 metros.

5.2. Trabajo futuro

El esquema de ordenamiento vial propuesto en este trabajo esta enfocado en reasignar flujos de tránsito. Sin embargo, esta reasignación es estática, es decir, la configuración de la red vial es predeterminada y no puede cambiar a lo largo del tiempo. Una posible extensión a este trabajo es diseñar estrategias que permitan ordenar la funcionalidad de una vialidad dinámicamente. Lo anterior imponen ciertos retos que se describen a continuación.

- Control paralelo del tránsito. En este trabajo se implementó una solución basada en el paradigma de control paralelo del transito, que consistió en monitorear el flujo del tránsito en una vialidad y reproducir los comportamientos monitoreados en una ambiente de simulación. A partir del modelo de simulación se diseñaron estrategias para mitigar los problemas detectados. Sin embargo estas estrategias no fueron implementadas en las vialidades reales. Una extensión a este trabajo es implementar las estrategias diseñadas en el sistema real y simular los resultados obtenidos para evaluar los nuevos patrones de movilidad resultantes. De esta forma el esquema de ordenamiento puede ser optimizado iterativamente, buscando incrementar aun más la eficiencia del sistema.

- Asignación dinámica del tránsito. Esta estrategia se basa en redireccionar dinámicamente el tránsito, reaccionando ante ciertos patrones, detectados por un sistema de monitoreo en tiempo real. El objetivo de esta estrategia es ejecutar acciones preventivas para incrementar la eficiencia de una red vial. Por ejemplo, si en una vialidad se detecta que la densidad rebasa cierto umbral mientras que el flujo empieza a decaer, los viajes que se estén aproximando a esta vialidad pueden ser desviados a rutas alternas para evitar una congestión. Sin embargo, esta estrategia requiere del desarrollo de sistemas para realizar crowd-sourcing en tiempo real. Por otro lado, para realizar asignaciones pertinentes, se deben desarrollar algoritmos que permitan predecir algunos comportamientos en los flujos de tránsito.

Apéndice A

Aforos vehiculares

En este apéndice se presenta el estudio de los volúmenes de tránsito, realizados en la colonia Felicitas del Río de la ciudad de Morelia Michoacán. El estudio se centró en las siguientes calles:

- Francisco J. Mujica, tramo: José P. Ruiz-Cuautla (sentido poniente-orienté), véase la tabla A.1.
- Francisco J. Mujica, tramo: José P. Ruiz-Cuautla (sentido orienté-poniente), véase la tabla A.2.
- Cuautla, tramo: José Álvarez-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur), véase la tabla A.3.
- Cuautla, tramo: José Álvarez-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte), véase la tabla A.4.
- Cuautla, tramo; Francisco J. Mujica-Tlalpujahuá (sentido norte-sur), véase la tabal A.5.
- Cuautla, tramo; Francisco J. Mujica-Tlalpujahuá (sentido sur-norte), véase la tabla A.6.
- Francisco J. Mujica, tramo; Nicolás Bravo-Alberto Alvarado (sentido poniente-orienté), véase la tabla A.9.

-
- Francisco J. Mujica, tramo; Nicolás Bravo-Alberto Alvarado (sentido oriente-poniente), véase la tabla A.10.
 - Francisco J. Mujica, tramo; Alberto Alvarado-Jesús Romero Flores (sentido poniente-oriente), véase la tabla A.11.
 - Francisco J. Mujica, tramo; Alberto Alvarado-Jesús Romero Flores (sentido poniente-oriente), véase la tabla A.12.
 - Francisco J. Mujica, tramo; Jesús Romero Flores-José Silva Herrera (sentido poniente-oriente), véase la tabla A.13.
 - Francisco J. Mujica, tramo; Jesús Romero Flores-José Silva Herrera (sentido oriente-poniente), véase la tabla A.14.
 - Nicolás Bravo, tramo; Rafael Márquez-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur), véase la tabla A.15.
 - Nicolás Bravo, tramo; Rafael Márquez-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte), véase la tabla A.16.
 - Nicolás Bravo, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur), véase la tabla A.17.
 - Nicolás Bravo, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte), véase la tabla A.18.
 - Alberto Alvarado, tramo; Rafael Márquez-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte), véase la tabla A.19.
 - Alberto Alvarado, tramo; Rafael Márquez-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur), véase la tabla A.20.
 - Alberto Alvarado, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur), véase la tabla A.21.

-
- Alberto Alvarado, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte), véase la tabla A.22.
 - Jesús Romero Flores, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte), véase la tabla A.23.
 - Jesús Romero Flores, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur), véase la tabla A.24.
 - Jesús Romero Flores, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur), véase la tabla A.25.
 - Jesús Romero Flores, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte), véase la tabla A.26.
 - José Silva Herrera, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte), véase la tabla A.27.
 - José Silva Herrera, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur), véase la tabla A.28.
 - José Silva Herrera, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur), véase la tabla A.29.
 - José Silva Herrera, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte), véase la tabla A.30.
 - Ocampo, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte), véase la tabla A.31.
 - Ocampo, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur), véase la tabla A.32.
 - Ocampo, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur), véase la tabla A.33.

- Ocampo, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte), véase la tabla A.34.

Tabla A.1: Francisco J. Mujica, tramo: José P. Ruiz-Cuautla (sentido poniente-oriente)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	44	44	41	58	66
01:00:00	25	17	18	29	35
02:00:00	14	18	11	17	39
03:00:00	18	10	12	19	18
04:00:00	21	16	18	21	24
05:00:00	34	31	34	34	51
06:00:00	321	295	281	307	282
07:00:00	803	726	162	745	705
08:00:00	631	656	400	650	657
09:00:00	661	631	611	594	640
10:00:00	579	568	628	750	618
11:00:00	666	648	637	739	569
12:00:00	687	699	607	699	642
13:00:00	665	700	642	724	732
14:00:00	640	566	474	527	663
15:00:00	600	504	621	649	595
16:00:00	655	649	605	620	584
17:00:00	554	681	668	643	637
18:00:00	580	590	551	686	682
19:00:00	507	545	524	605	614
20:00:00	475	460	439	533	531
21:00:00	286	324	337	386	400
22:00:00	151	173	187	190	304
23:00:00	91	104	107	120	185

Tabla A.2: Francisco J. Mujica, tramo: José P. Ruiz-Cuautla (sentido oriente-poniente)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	24	35	38	36	58
01:00:00	16	13	23	16	22
02:00:00	9	10	12	6	22
03:00:00	6	3	8	10	16
04:00:00	9	9	6	8	15
05:00:00	28	29	37	29	34
06:00:00	166	146	164	146	139
07:00:00	501	480	450	463	406
08:00:00	356	453	474	498	262
09:00:00	0	401	428	440	0
10:00:00	0	391	375	401	0
11:00:00	0	360	375	370	161
12:00:00	0	389	380	396	435
13:00:00	0	441	448	457	465
14:00:00	315	456	417	469	507
15:00:00	468	494	447	453	536
16:00:00	412	428	413	375	479
17:00:00	396	402	378	341	402
18:00:00	415	423	429	360	354
19:00:00	410	404	403	394	421
20:00:00	364	351	346	375	363
21:00:00	194	184	219	198	237
22:00:00	95	129	107	115	180
23:00:00	41	56	64	79	91

Tabla A.3: Cuautla, tramo: José Álvarez-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	49	63	72	76	100
01:00:00	25	38	40	39	37
02:00:00	19	24	21	18	28
03:00:00	10	7	10	11	23
04:00:00	8	8	10	11	17
05:00:00	14	11	20	13	14
06:00:00	37	26	33	31	37
07:00:00	122	122	131	118	106
08:00:00	363	359	381	357	297
09:00:00	402	407	414	400	356
10:00:00	350	364	338	344	352
11:00:00	377	334	325	337	338
12:00:00	324	333	306	338	354
13:00:00	343	326	309	334	346
14:00:00	374	354	358	360	342
15:00:00	373	383	372	384	377
16:00:00	319	318	363	377	332
17:00:00	358	318	335	377	308
18:00:00	342	248	338	359	337
19:00:00	360	344	341	320	309
20:00:00	379	378	348	307	332
21:00:00	339	310	334	246	365
22:00:00	256	235	255	246	267
23:00:00	133	145	144	100	182

Tabla A.4: Cuautla, tramo: José Álvarez-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	33	41	78	45	50
01:00:00	20	28	51	27	34
02:00:00	11	19	22	17	24
03:00:00	3	6	18	7	15
04:00:00	4	1	15	11	4
05:00:00	7	10	12	15	8
06:00:00	20	23	25	24	22
07:00:00	58	57	57	171	70
08:00:00	136	146	163	153	154
09:00:00	153	195	202	197	207
10:00:00	162	166	190	196	165
11:00:00	161	163	180	188	198
12:00:00	160	159	174	214	165
13:00:00	143	185	175	176	198
14:00:00	170	181	174	178	178
15:00:00	169	185	163	168	185
16:00:00	156	173	173	192	184
17:00:00	143	180	178	182	166
18:00:00	142	166	181	179	162
19:00:00	157	164	149	182	193
20:00:00	133	196	162	164	169
21:00:00	163	139	163	169	105
22:00:00	105	155	128	132	0
23:00:00	91	106	89	76	0

Tabla A.5: Cuautla, tramo; Francisco J. Mujica-Tlalpujahua (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	90	98	177	90	89
01:00:00	63	73	67	71	80
02:00:00	21	40	29	33	39
03:00:00	161	21	7	22	29
04:00:00	18	7	6	20	24
05:00:00	8	12	11	17	19
06:00:00	20	20	29	23	27
07:00:00	49	54	47	57	60
08:00:00	288	310	291	277	231
09:00:00	323	347	378	293	297
10:00:00	247	251	259	212	176
11:00:00	219	175	179	160	181
12:00:00	147	187	157	172	170
13:00:00	173	173	165	146	185
14:00:00	120	162	179	161	207
15:00:00	100	130	119	178	220
16:00:00	102	166	213	192	188
17:00:00	135	164	217	218	249
18:00:00	144	163	237	203	181
19:00:00	132	119	137	195	198
20:00:00	191	138	114	121	119
21:00:00	108	144	121	112	125
22:00:00	151	160	144	93	139
23:00:00	136	186	135	118	127

Tabla A.6: Cuautla, tramo; Francisco J. Mujica-Tlalpujahua (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	86	90	94	104	99
01:00:00	48	47	48	55	63
02:00:00	23	25	24	29	36
03:00:00	16	12	9	24	23
04:00:00	9	8	5	17	18
05:00:00	13	5	12	9	15
06:00:00	10	9	11	21	16
07:00:00	38	39	41	32	51
08:00:00	105	144	116	108	88
09:00:00	206	237	227	244	185
10:00:00	237	243	228	253	200
11:00:00	241	233	228	247	193
12:00:00	245	196	246	219	214
13:00:00	212	210	225	236	194
14:00:00	212	212	216	235	228
15:00:00	245	249	236	252	224
16:00:00	241	235	234	248	217
17:00:00	223	229	221	208	214
18:00:00	206	209	199	221	206
19:00:00	201	209	207	201	212
20:00:00	185	238	207	227	199
21:00:00	257	249	205	226	237
22:00:00	230	197	203	213	228
23:00:00	176	159	265	142	195

Tabla A.7: Francisco J. Mujica, tramo; Nicolás Bravo-Alberto Alvarado (sentido poniente-oriente)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	73	87	130	95	94
01:00:00	37	34	59	39	59
02:00:00	15	10	26	23	34
03:00:00	11	4	15	18	27
04:00:00	7	10	15	18	23
05:00:00	14	17	33	22	20
06:00:00	38	37	40	47	45
07:00:00	198	172	225	192	212
08:00:00	342	430	427	380	367
09:00:00	357	108	381	376	337
10:00:00	356	334	325	347	321
11:00:00	288	355	325	345	269
12:00:00	299	166	326	294	318
13:00:00	299	256	317	275	288
14:00:00	272	342	383	343	313
15:00:00	321	362	332	336	316
16:00:00	337	363	351	348	335
17:00:00	325	360	349	336	295
18:00:00	298	330	317	339	292
19:00:00	265	304	308	340	258
20:00:00	263	303	311	298	270
21:00:00	229	268	274	252	231
22:00:00	206	269	248	213	227
23:00:00	230	278	156	178	298

Tabla A.8: Francisco J. Mujica, tramo; Nicolás Bravo-Alberto Alvarado (sentido oriente-poniente)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	54	55	70	74	57
01:00:00	35	27	44	50	51
02:00:00	13	6	12	23	20
03:00:00	5	3	10	15	18
04:00:00	16	3	8	12	14
05:00:00	8	6	15	18	21
06:00:00	30	32	35	36	32
07:00:00	71	72	74	77	60
08:00:00	156	234	113	165	108
09:00:00	198	254	147	165	150
10:00:00	188	122	142	154	136
11:00:00	156	124	111	97	84
12:00:00	169	33	110	62	121
13:00:00	165	56	136	56	87
14:00:00	99	93	84	78	122
15:00:00	177	101	94	70	114
16:00:00	159	95	100	91	111
17:00:00	156	100	100	77	95
18:00:00	129	113	86	58	107
19:00:00	154	100	99	62	118
20:00:00	146	74	90	62	88
21:00:00	137	129	112	82	114
22:00:00	153	131	131	95	113
23:00:00	113	109	112	81	86

Tabla A.9: Francisco J. Mujica, tramo; Nicolás Bravo-Alberto Alvarado (sentido poniente-oriente)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	73	87	130	95	94
01:00:00	37	34	59	39	59
02:00:00	15	10	26	23	34
03:00:00	11	4	15	18	27
04:00:00	7	10	15	18	23
05:00:00	14	17	33	22	20
06:00:00	38	37	40	47	45
07:00:00	198	172	225	192	212
08:00:00	342	430	427	380	367
09:00:00	357	108	381	376	337
10:00:00	356	334	325	347	321
11:00:00	288	355	325	345	269
12:00:00	299	166	326	294	318
13:00:00	299	256	317	275	288
14:00:00	272	342	383	343	313
15:00:00	321	362	332	336	316
16:00:00	337	363	351	348	335
17:00:00	325	360	349	336	295
18:00:00	298	330	317	339	292
19:00:00	265	304	308	340	258
20:00:00	263	303	311	298	270
21:00:00	229	268	274	252	231
22:00:00	206	269	248	213	227
23:00:00	230	278	156	178	298

Tabla A.10: Francisco J. Mujica, tramo; Nicolás Bravo-Alberto Alvarado (sentido oriente-poniente)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	54	55	70	74	57
01:00:00	35	27	44	50	51
02:00:00	13	6	12	23	20
03:00:00	5	3	10	15	18
04:00:00	16	3	8	12	14
05:00:00	8	6	15	18	21
06:00:00	30	32	35	36	32
07:00:00	71	72	74	77	60
08:00:00	156	234	113	165	108
09:00:00	198	254	147	165	150
10:00:00	188	122	142	154	136
11:00:00	156	124	111	97	84
12:00:00	169	33	110	62	121
13:00:00	165	56	136	56	87
14:00:00	99	93	84	78	122
15:00:00	177	101	94	70	114
16:00:00	159	95	100	91	111
17:00:00	156	100	100	77	95
18:00:00	129	113	86	58	107
19:00:00	154	100	99	62	118
20:00:00	146	74	90	62	88
21:00:00	137	129	112	82	114
22:00:00	153	131	131	95	113
23:00:00	113	109	112	81	86

Tabla A.11: Francisco J. Mujica, tramo; Alberto Alvarado-Jesús Romero Flores (sentido poniente-oriente)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	102	90	72	97	127
01:00:00	68	61	55	80	73
02:00:00	29	21	11	35	44
03:00:00	12	14	14	24	29
04:00:00	15	6	10	19	20
05:00:00	23	25	23	22	30
06:00:00	20	34	31	19	41
07:00:00	57	254	274	257	258
08:00:00	163	442	464	494	424
09:00:00	193	394	423	415	424
10:00:00	257	356	383	360	341
11:00:00	270	316	383	346	112
12:00:00	310	375	343	374	74
13:00:00	310	373	355	342	53
14:00:00	328	306	364	320	206
15:00:00	340	232	366	293	293
16:00:00	285	344	341	371	286
17:00:00	288	256	387	364	292
18:00:00	302	314	379	349	288
19:00:00	282	331	353	323	224
20:00:00	263	288	310	318	240
21:00:00	353	295	283	303	283
22:00:00	194	233	271	282	273
23:00:00	157	267	141	178	224

Tabla A.12: Francisco J. Mujica, tramo; Alberto Alvarado-Jesús Romero Flores (sentido poniente-orienta)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	49	49	48	41	69
01:00:00	38	37	24	31	45
02:00:00	28	16	11	22	24
03:00:00	12	7	11	11	24
04:00:00	8	3	6	11	13
05:00:00	9	11	13	13	16
06:00:00	14	29	38	25	37
07:00:00	27	61	60	65	62
08:00:00	55	172	139	148	127
09:00:00	60	158	139	167	149
10:00:00	79	127	139	179	180
11:00:00	75	112	154	175	168
12:00:00	78	124	153	147	147
13:00:00	99	155	200	148	98
14:00:00	103	168	170	182	98
15:00:00	116	157	156	217	164
16:00:00	107	162	184	209	167
17:00:00	88	147	172	215	165
18:00:00	88	144	191	152	143
19:00:00	99	114	152	151	166
20:00:00	109	114	118	109	168
21:00:00	82	119	148	97	169
22:00:00	85	122	124	91	118
23:00:00	67	74	69	67	86

Tabla A.13: Francisco J. Mujica, tramo; Jesús Romero Flores-José Silva Herrera (sentido poniente-orienta)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	77	76	92	81	99
01:00:00	34	47	41	41	48
02:00:00	15	27	7	27	26
03:00:00	17	11	6	20	26
04:00:00	10	9	8	12	21
05:00:00	16	18	25	22	24
06:00:00	31	32	31	40	46
07:00:00	209	235	215	217	177
08:00:00	335	355	376	302	293
09:00:00	273	285	293	232	213
10:00:00	220	183	201	173	164
11:00:00	173	189	160	161	177
12:00:00	148	163	158	163	174
13:00:00	149	180	174	157	209
14:00:00	103	140	119	156	208
15:00:00	97	149	199	193	225
16:00:00	133	169	216	215	218
17:00:00	140	162	238	208	190
18:00:00	143	126	161	205	203
19:00:00	165	139	117	147	144
20:00:00	128	132	125	106	118
21:00:00	141	157	126	96	130
22:00:00	145	184	149	113	133
23:00:00	117	134	103	89	121

Tabla A.14: Francisco J. Mujica, tramo; Jesús Romero Flores-José Silva Herrera (sentido oriente-poniente)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	61	58	60	59	68
01:00:00	27	29	31	39	41
02:00:00	20	14	10	26	30
03:00:00	7	11	6	15	16
04:00:00	11	6	11	10	16
05:00:00	11	4	9	18	16
06:00:00	29	31	32	24	33
07:00:00	67	70	80	74	67
08:00:00	197	236	207	211	168
09:00:00	225	223	224	267	199
10:00:00	237	242	241	243	101
11:00:00	250	205	239	229	211
12:00:00	220	218	235	231	195
13:00:00	213	206	220	226	225
14:00:00	323	249	220	263	221
15:00:00	251	233	237	243	232
16:00:00	228	234	228	213	193
17:00:00	209	205	198	232	231
18:00:00	204	210	201	198	193
19:00:00	193	221	212	226	213
20:00:00	241	248	205	223	212
21:00:00	248	217	215	217	237
22:00:00	187	176	180	168	205
23:00:00	114	111	119	111	165

Tabla A.15: Nicolás Bravo, tramo; Rafael Márquez-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	2	2	0	1	3
01:00:00	2	0	0	2	1
02:00:00	1	0	0	3	1
03:00:00	1	0	0	1	0
04:00:00	1	2	1	0	0
05:00:00	0	0	0	0	3
06:00:00	1	5	5	2	1
07:00:00	2	14	12	19	14
08:00:00	4	19	20	15	20
09:00:00	6	30	17	14	15
10:00:00	12	27	14	17	40
11:00:00	13	21	19	17	96
12:00:00	15	23	24	32	132
13:00:00	22	35	21	28	24
14:00:00	20	24	21	23	28
15:00:00	16	24	16	19	29
16:00:00	18	31	38	26	20
17:00:00	28	43	23	19	29
18:00:00	21	39	30	27	36
19:00:00	24	37	32	26	26
20:00:00	18	32	24	26	28
21:00:00	15	10	15	9	19
22:00:00	5	15	5	9	14
23:00:00	6	2	13	8	7

Tabla A.16: Nicolás Bravo, tramo; Rafael Márquez-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	2	0	2	0	0
01:00:00	1	1	0	1	2
02:00:00	0	1	0	0	1
03:00:00	0	0	0	0	0
04:00:00	0	0	0	1	0
05:00:00	0	2	1	1	2
06:00:00	0	4	2	4	3
07:00:00	2	7	11	13	15
08:00:00	5	18	17	18	14
09:00:00	7	19	13	21	28
10:00:00	9	22	25	20	60
11:00:00	18	26	26	20	67
12:00:00	20	21	21	25	81
13:00:00	14	28	30	18	27
14:00:00	9	21	27	23	30
15:00:00	21	15	24	23	15
16:00:00	14	15	22	27	30
17:00:00	14	23	25	24	32
18:00:00	17	42	23	29	37
19:00:00	16	31	32	27	34
20:00:00	18	18	23	16	19
21:00:00	8	9	11	12	23
22:00:00	7	2	6	7	5
23:00:00	1	3	5	2	1

Tabla A.17: Nicolás Bravo, tramo; Tlalpujahuá-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	2	2	1	1	3
01:00:00	1	0	0	2	1
02:00:00	1	1	0	3	0
03:00:00	2	0	0	0	1
04:00:00	1	0	0	0	1
05:00:00	1	0	1	0	2
06:00:00	2	6	3	4	2
07:00:00	2	27	16	13	16
08:00:00	5	15	18	7	23
09:00:00	11	29	24	11	29
10:00:00	22	19	21	21	73
11:00:00	23	29	22	27	117
12:00:00	21	28	25	23	117
13:00:00	21	37	26	33	37
14:00:00	18	23	28	22	28
15:00:00	18	24	14	29	32
16:00:00	23	18	2	16	0
17:00:00	22	2	0	25	0
18:00:00	16	0	0	36	0
19:00:00	14	10	0	20	0
20:00:00	16	25	21	28	21
21:00:00	12	7	9	9	16
22:00:00	4	3	7	5	3
23:00:00	6	4	4	4	6

Tabla A.18: Nicolás Bravo, tramo; Tlalpujahuá-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	3	4	2	1	7
01:00:00	1	0	0	2	1
02:00:00	2	1	0	3	2
03:00:00	2	0	0	0	1
04:00:00	1	0	0	0	2
05:00:00	1	1	1	0	3
06:00:00	2	11	6	6	4
07:00:00	2	32	23	18	20
08:00:00	8	30	28	15	36
09:00:00	19	46	37	31	46
10:00:00	28	35	42	37	85
11:00:00	39	47	37	47	134
12:00:00	31	46	48	35	142
13:00:00	36	55	49	54	60
14:00:00	31	36	42	36	48
15:00:00	27	32	33	35	47
16:00:00	38	33	3	28	0
17:00:00	34	3	0	45	0
18:00:00	29	0	0	48	0
19:00:00	26	13	0	39	0
20:00:00	26	37	25	41	31
21:00:00	20	12	15	13	27
22:00:00	7	7	10	13	9
23:00:00	6	5	5	6	10

Tabla A.19: Alberto Alvarado, tramo; Rafael Márquez-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	0	0	0	0	0
01:00:00	6	0	2	0	0
02:00:00	0	0	0	0	0
03:00:00	0	0	1	0	0
04:00:00	1	0	0	0	0
05:00:00	1	0	2	0	0
06:00:00	3	0	4	0	0
07:00:00	31	0	56	0	0
08:00:00	91	0	140	0	0
09:00:00	89	3	127	0	0
10:00:00	74	93	103	0	1
11:00:00	90	97	99	1	0
12:00:00	93	115	123	0	0
13:00:00	113	119	108	0	0
14:00:00	140	149	134	0	0
15:00:00	109	150	163	0	0
16:00:00	80	130	135	1	0
17:00:00	92	108	87	0	0
18:00:00	90	121	111	0	0
19:00:00	105	122	21	0	1
20:00:00	82	88	1	0	0
21:00:00	50	76	0	0	0
22:00:00	0	30	0	1	0
23:00:00	0	15	0	0	0

Tabla A.20: Alberto Alvarado, tramo; Rafael Márquez-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	0	4	0	0	0
01:00:00	0	0	0	0	0
02:00:00	0	0	0	0	0
03:00:00	1	0	0	0	0
04:00:00	0	0	0	0	0
05:00:00	0	0	0	0	0
06:00:00	11	0	28	0	0
07:00:00	49	0	77	0	0
08:00:00	59	1	76	0	0
09:00:00	58	68	66	0	0
10:00:00	57	69	63	0	0
11:00:00	52	64	68	0	0
12:00:00	66	78	57	0	0
13:00:00	63	70	77	0	0
14:00:00	65	76	75	0	0
15:00:00	53	80	65	0	0
16:00:00	57	61	68	0	0
17:00:00	48	62	45	0	0
18:00:00	61	65	13	0	0
19:00:00	57	66	0	0	0
20:00:00	35	53	0	0	0
21:00:00	0	24	0	0	0
22:00:00	0	11	0	0	0
23:00:00	0	9	0	0	0

Tabla A.21: Alberto Alvarado, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	14	11	4	10	11
01:00:00	6	2	5	6	10
02:00:00	2	2	4	4	8
03:00:00	2	0	1	2	6
04:00:00	1	1	0	3	5
05:00:00	2	2	4	4	3
06:00:00	18	29	40	30	29
07:00:00	64	104	104	98	86
08:00:00	85	105	110	105	84
09:00:00	70	92	84	80	99
10:00:00	79	102	85	89	89
11:00:00	73	82	87	71	97
12:00:00	99	103	89	100	94
13:00:00	83	94	113	119	95
14:00:00	102	124	135	123	104
15:00:00	72	107	89	89	102
16:00:00	64	70	95	83	88
17:00:00	65	98	70	89	104
18:00:00	79	88	98	80	88
19:00:00	83	82	109	78	73
20:00:00	69	95	88	88	93
21:00:00	44	60	57	60	62
22:00:00	29	20	42	28	44
23:00:00	24	18	25	19	28

Tabla A.22: Alberto Alvarado, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	0	20	19	23	28
01:00:00	0	9	12	9	16
02:00:00	0	1	5	8	9
03:00:00	0	3	3	6	14
04:00:00	0	5	5	10	10
05:00:00	0	12	11	6	17
06:00:00	0	96	103	110	89
07:00:00	0	256	289	252	224
08:00:00	183	229	287	253	212
09:00:00	189	236	213	225	197
10:00:00	159	192	210	227	185
11:00:00	191	204	227	188	230
12:00:00	206	218	208	237	236
13:00:00	232	266	276	261	218
14:00:00	226	260	275	265	208
15:00:00	205	272	249	239	285
16:00:00	180	218	208	204	284
17:00:00	166	217	202	226	245
18:00:00	198	215	186	216	221
19:00:00	156	203	207	195	191
20:00:00	136	174	163	192	185
21:00:00	88	104	91	118	109
22:00:00	58	61	62	81	88
23:00:00	33	36	27	41	52

Tabla A.23: Jesús Romero Flores, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	1	0	1	0	3
01:00:00	0	1	0	1	2
02:00:00	1	1	0	0	1
03:00:00	0	0	0	0	0
04:00:00	0	1	0	1	0
05:00:00	1	0	0	3	3
06:00:00	14	10	6	14	13
07:00:00	37	43	41	39	39
08:00:00	27	49	46	35	57
09:00:00	37	48	50	45	46
10:00:00	25	42	44	46	37
11:00:00	9	29	43	34	37
12:00:00	47	51	7	40	40
13:00:00	43	50	0	54	71
14:00:00	37	48	0	41	53
15:00:00	61	37	0	32	52
16:00:00	39	46	0	42	35
17:00:00	44	47	0	53	47
18:00:00	48	40	0	52	44
19:00:00	47	24	26	33	43
20:00:00	24	24	22	20	31
21:00:00	13	14	18	17	22
22:00:00	7	10	6	6	13
23:00:00	4	2	5	1	6

Tabla A.24: Jesús Romero Flores, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	1	1	2	2	3
01:00:00	1	1	1	1	1
02:00:00	1	1	0	0	1
03:00:00	1	0	0	0	2
04:00:00	0	0	0	0	1
05:00:00	2	1	1	2	4
06:00:00	11	7	7	17	8
07:00:00	29	26	32	25	17
08:00:00	30	48	47	50	49
09:00:00	35	36	38	51	42
10:00:00	22	45	50	40	38
11:00:00	7	29	49	42	29
12:00:00	41	47	17	45	46
13:00:00	55	67	0	47	54
14:00:00	44	55	0	53	50
15:00:00	44	36	0	44	43
16:00:00	38	46	0	39	31
17:00:00	39	49	0	43	34
18:00:00	42	45	0	58	36
19:00:00	46	52	32	39	41
20:00:00	25	30	39	39	32
21:00:00	23	19	20	20	19
22:00:00	10	10	14	10	11
23:00:00	5	7	11	2	4

Tabla A.25: Jesús Romero Flores, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	0	3	3	4	5
01:00:00	2	0	0	1	2
02:00:00	0	0	0	2	2
03:00:00	1	0	1	0	0
04:00:00	0	0	0	1	1
05:00:00	1	1	3	3	3
06:00:00	13	6	12	9	3
07:00:00	21	32	37	32	28
08:00:00	40	62	54	72	58
09:00:00	21	57	45	57	33
10:00:00	23	40	29	54	38
11:00:00	37	46	32	51	30
12:00:00	32	25	52	64	0
13:00:00	57	72	92	66	48
14:00:00	54	95	96	70	61
15:00:00	52	72	79	65	65
16:00:00	41	41	48	53	32
17:00:00	47	52	54	69	28
18:00:00	57	64	80	98	37
19:00:00	60	61	54	57	47
20:00:00	33	50	65	41	48
21:00:00	14	28	26	27	29
22:00:00	9	19	18	21	18
23:00:00	4	10	11	7	7

Tabla A.26: Jesús Romero Flores, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mújica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	0	1	2	6	2
01:00:00	2	2	1	1	0
02:00:00	0	0	0	0	2
03:00:00	2	1	1	1	2
04:00:00	0	0	0	1	1
05:00:00	2	0	0	1	1
06:00:00	11	11	10	12	8
07:00:00	25	30	33	28	29
08:00:00	31	35	31	34	39
09:00:00	25	37	34	33	29
10:00:00	28	35	40	28	30
11:00:00	19	25	26	29	27
12:00:00	21	16	24	31	0
13:00:00	36	40	33	42	32
14:00:00	19	33	26	28	34
15:00:00	33	31	33	30	25
16:00:00	32	38	35	24	24
17:00:00	42	43	40	42	25
18:00:00	31	36	30	27	34
19:00:00	23	41	30	29	28
20:00:00	21	26	36	25	21
21:00:00	6	11	10	14	26
22:00:00	8	10	8	12	12
23:00:00	9	2	7	5	9

Tabla A.27: José Silva Herrera, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	0	1	1	1	1
01:00:00	1	0	0	0	2
02:00:00	1	0	0	0	3
03:00:00	0	0	0	0	0
04:00:00	0	0	0	0	2
05:00:00	0	3	2	1	0
06:00:00	4	2	1	3	4
07:00:00	15	23	20	14	7
08:00:00	40	50	25	39	25
09:00:00	23	29	22	28	37
10:00:00	27	56	52	64	36
11:00:00	32	39	37	27	53
12:00:00	39	50	49	37	36
13:00:00	47	67	22	42	47
14:00:00	48	42	67	44	47
15:00:00	30	49	54	33	59
16:00:00	50	33	22	6	38
17:00:00	44	39	30	41	40
18:00:00	51	53	29	43	61
19:00:00	23	35	25	45	48
20:00:00	21	30	19	23	29
21:00:00	5	15	10	5	14
22:00:00	4	2	3	3	6
23:00:00	3	2	4	7	4

Tabla A.28: José Silva Herrera, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	1	3	0	1	1
01:00:00	2	0	1	3	2
02:00:00	2	0	0	0	0
03:00:00	0	0	0	1	0
04:00:00	0	0	0	0	1
05:00:00	1	1	2	1	0
06:00:00	6	3	5	1	6
07:00:00	12	19	14	10	12
08:00:00	18	17	17	24	13
09:00:00	14	10	14	14	12
10:00:00	22	20	19	21	16
11:00:00	19	12	22	33	12
12:00:00	28	17	20	44	24
13:00:00	14	24	23	28	22
14:00:00	39	28	31	31	18
15:00:00	10	17	25	26	25
16:00:00	24	16	18	4	22
17:00:00	20	19	24	14	28
18:00:00	25	21	17	25	19
19:00:00	26	29	19	16	26
20:00:00	20	19	25	10	24
21:00:00	12	10	14	7	16
22:00:00	3	10	6	11	8
23:00:00	3	3	1	4	6

Tabla A.29: José Silva Herrera, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	4	4	1	1	6
01:00:00	3	0	3	3	1
02:00:00	0	1	0	1	1
03:00:00	0	0	0	1	0
04:00:00	1	1	1	1	2
05:00:00	1	0	1	1	1
06:00:00	5	1	5	2	7
07:00:00	23	23	24	11	13
08:00:00	39	36	40	32	24
09:00:00	32	31	27	29	22
10:00:00	28	31	33	36	33
11:00:00	32	32	29	48	31
12:00:00	51	49	30	77	27
13:00:00	49	49	47	69	34
14:00:00	77	50	52	61	53
15:00:00	22	31	43	35	38
16:00:00	45	32	33	32	26
17:00:00	47	41	28	27	42
18:00:00	53	50	43	37	41
19:00:00	39	37	39	38	45
20:00:00	25	33	39	27	34
21:00:00	11	8	17	17	19
22:00:00	4	11	9	12	12
23:00:00	3	4	7	8	12

Tabla A.30: José Silva Herrera, tramo; Tlalpujahua-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	2	2	2	4	0
01:00:00	1	1	1	1	4
02:00:00	0	0	0	0	2
03:00:00	0	0	1	1	1
04:00:00	0	2	0	3	0
05:00:00	5	0	3	1	1
06:00:00	3	3	6	3	3
07:00:00	19	12	22	11	17
08:00:00	22	16	16	19	19
09:00:00	13	16	15	9	14
10:00:00	21	22	21	23	16
11:00:00	13	18	15	15	13
12:00:00	18	19	23	19	12
13:00:00	25	21	22	14	13
14:00:00	11	12	16	17	21
15:00:00	19	14	14	18	17
16:00:00	10	18	15	19	14
17:00:00	22	16	14	12	18
18:00:00	22	27	23	19	25
19:00:00	15	15	15	13	14
20:00:00	7	19	17	12	21
21:00:00	6	14	11	10	11
22:00:00	2	5	5	4	8
23:00:00	3	2	3	4	6

Tabla A.31: Ocampo, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte))

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	0	0	1	7	8
01:00:00	0	0	2	6	4
02:00:00	0	0	1	0	0
03:00:00	0	0	1	1	2
04:00:00	0	0	2	2	1
05:00:00	0	0	4	7	5
06:00:00	0	0	7	46	47
07:00:00	0	0	30	100	60
08:00:00	0	0	29	109	0
09:00:00	0	0	29	0	0
10:00:00	0	0	48	0	0
11:00:00	0	0	40	0	0
12:00:00	0	0	71	0	62
13:00:00	0	0	59	0	133
14:00:00	0	0	70	0	144
15:00:00	0	0	145	136	135
16:00:00	0	0	166	169	181
17:00:00	0	0	167	180	173
18:00:00	0	0	170	131	164
19:00:00	0	0	145	104	152
20:00:00	0	0	97	112	175
21:00:00	0	0	50	65	103
22:00:00	0	0	18	35	43
23:00:00	0	0	17	22	22

Tabla A.32: Ocampo, tramo; Martín Castrejón-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	0	0	1	2	5
01:00:00	0	0	1	2	7
02:00:00	0	0	1	2	1
03:00:00	0	0	1	3	3
04:00:00	0	0	1	2	1
05:00:00	0	0	4	3	3
06:00:00	0	0	12	24	18
07:00:00	0	0	32	54	27
08:00:00	0	0	38	59	0
09:00:00	0	0	36	0	0
10:00:00	0	0	47	0	0
11:00:00	0	0	39	0	0
12:00:00	0	0	57	0	44
13:00:00	0	0	58	0	92
14:00:00	0	0	56	0	75
15:00:00	0	0	75	76	93
16:00:00	0	0	64	72	85
17:00:00	0	0	79	65	65
18:00:00	0	0	102	73	96
19:00:00	0	0	72	52	84
20:00:00	0	0	52	60	84
21:00:00	0	0	34	36	46
22:00:00	0	0	15	19	25
23:00:00	0	0	7	15	19

Tabla A.33: Ocampo, tramo; Tlalpujahuá-Francisco J. Mujica (sentido norte-sur)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	3	4	4	7	10
01:00:00	3	3	2	3	5
02:00:00	0	2	5	2	6
03:00:00	1	0	1	3	7
04:00:00	7	6	7	6	8
05:00:00	2	6	7	8	6
06:00:00	28	34	23	44	26
07:00:00	88	67	91	102	124
08:00:00	87	71	79	116	152
09:00:00	82	63	89	120	131
10:00:00	84	88	77	116	137
11:00:00	82	89	79	117	128
12:00:00	76	84	83	126	143
13:00:00	75	49	65	114	111
14:00:00	110	95	99	130	99
15:00:00	79	79	77	119	119
16:00:00	90	72	101	117	124
17:00:00	98	85	113	115	101
18:00:00	121	102	148	129	126
19:00:00	108	107	120	120	108
20:00:00	79	108	103	122	129
21:00:00	54	60	70	65	81
22:00:00	39	35	26	47	36
23:00:00	10	12	8	26	28

Tabla A.34: Ocampo, tramo; Tlalpujahuá-Francisco J. Mujica (sentido sur-norte)

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
00:00:00	10	7	18	33	28
01:00:00	6	4	8	18	19
02:00:00	2	0	12	3	9
03:00:00	1	0	6	11	12
04:00:00	4	5	11	7	8
05:00:00	17	14	21	25	12
06:00:00	76	57	123	113	97
07:00:00	214	215	246	243	234
08:00:00	219	279	257	291	288
09:00:00	157	256	219	266	247
10:00:00	181	261	234	244	242
11:00:00	151	266	261	242	254
12:00:00	186	267	259	252	262
13:00:00	241	239	234	267	245
14:00:00	199	262	252	233	261
15:00:00	183	255	252	249	231
16:00:00	180	265	259	261	261
17:00:00	195	262	254	238	232
18:00:00	207	253	285	269	254
19:00:00	220	240	253	231	220
20:00:00	152	208	233	204	264
21:00:00	82	153	135	153	158
22:00:00	54	102	81	107	107
23:00:00	20	40	41	58	82

Bibliografía

- [AAYE⁺12] K. Ali, D. Al-Yaseen, A. Ejaz, T. Javed, and H. S. Hassanein. Crowdits: Crowdsourcing in intelligent transportation systems. In *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 3307–3311, April 2012.
- [CKLZY12] G. Chatzimilioudis, A. Konstantinidis, C. Laoudias, and D. Zeinalipour-Yazti. Crowdsourcing with smartphones. *IEEE Internet Computing*, 16(5):36–44, Sept 2012.
- [DD10] G. Dimitrakopoulos and P. Demestichas. Intelligent transportation systems. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 5(1):77–84, marzo 2010.
- [DS77] Carlos F. Daganzo and Yosef Sheffi. On stochastic models of traffic assignment. *Transportation Science*, 11(3):253–274, 1977.
- [GRLGSR17] Ricardo García-Ródenas, María L. López-García, and María Teresa Sánchez-Rico. An approach to dynamical classification of daily traffic patterns. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(3):191–212, 2017.
- [GS09] CARLOS G. and IVÁN S. Dyna. 158, 76:199–208, 2009.
- [Ker14] B.S. Kerner. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*. Springer Berlin Heidelberg, 2014.

- [Kha96] Marzuki Khalid. Intelligent traffic lights control by fuzzy logic. *MALAYSIAN JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE*, 9(2):29–35, 1996.
- [LGZS10] Jiancheng Long, Ziyou Gao, Haozhi Zhang, and W.Y. Szeto. A turning restriction design problem in urban road networks. *European Journal of Operational Research*, 206(3):569 – 578, 2010.
- [May90] A.D. May. *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice Hall, 1990.
- [MK17] Benedikt Notter Mario Keller, Philipp Wüthrich. Handbook emission factors for road transport, 2017.
- [MNCG15] Mohammad Mardani Nokandeh, Satish Chandra, and Indrajit Ghosh. Passenger car unit of vehicles on undivided intercity roads in india. 52, 06 2015.
- [OH15] ONU-Hábitat. Reporte nacional de movilidad urbana en méxico 2014-2015, 2015.
- [RAV⁺11] J. G. P. Rodrigues, A. Aguiar, F. Vieira, J. Barros, and J. P. S. Cunha. A mobile sensing architecture for massive urban scanning. In *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1132–1137, Oct 2011.
- [SKK13] F. Soylemezgiller, M. Kuscü, and D. Kilinc. A traffic congestion avoidance algorithm with dynamic road pricing for smart cities. In *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 2571–2575, Sept 2013.
- [SMJN14] Mohammad Reza Jabbarpour Sattari, Hossein Malakooti, Ali Jalooli, and Rafidah Md Noor. *A Dynamic Vehicular Traffic Con-*

- trol Using Ant Colony and Traffic Light Optimization*, pages 57–66. Springer International Publishing, Cham, 2014.
- [SR15] María Teresa Sánchez-Rico. *Data mining, optimization and simulation tools for the design of Intelligent Transportation Systems*. PhD thesis, Universidad de Castilla-La Mancha, 2015.
- [TKT12] M. Treiber, A. Kesting, and C. Thiemann. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [VKG10] Maja Vukovic, Soundar Kumara, and Ohad Greenshpan. Ubiquitous crowdsourcing. In *Proceedings of the 12th ACM International Conference Adjunct Papers on Ubiquitous Computing - Adjunct*, UbiComp '10 Adjunct, pages 523–526, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [WFG13] M. Winkler, W. Fan, and Z. Gurmu. Congestion pricing and optimal tolling: The importance of both locations and levels. In *2013 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems*, pages 331–336, May 2013.
- [ZCWY14] Yu Zheng, Licia Capra, Ouri Wolfson, and Hai Yang. Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, 5(3):38:1–38:55, September 2014.
- [ZLCX16a] F. Zhu, Z. Li, S. Chen, and G. Xiong. Parallel transportation management and control system and its applications in building smart cities. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(6):1576–1585, June 2016.
- [ZLCX16b] F. Zhu, Z. Li, S. Chen, and G. Xiong. Parallel transportation management and control system and its applications in building smart

- cities. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(6):1576–1585, June 2016.
- [ZSHB09] S. K. Zegeye, B. De Schutter, H. Hellendoorn, and E. Breunese. Reduction of travel times and traffic emissions using model predictive control. In *2009 American Control Conference*, pages 5392–5397, June 2009.
- [ZYC⁺13a] F. Zhu, Z. Yu, S. Chen, H. Xie, Z. Li, and G. Xiong. Optimizing traffic signal control system based on parallel transportation management systems. In *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, pages 398–403, July 2013.
- [ZYC⁺13b] F. Zhu, Z. Yu, S. Chen, H. Xie, Z. Li, and G. Xiong. Optimizing traffic signal control system based on parallel transportation management systems. In *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, pages 398–403, July 2013.