

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCION**

Es una práctica donde las medidas de eficiencia para la evaluación del comportamiento de intersecciones semáforizadas en el área central de la ciudad de Tarija sean determinadas empleando como herramienta la metodología de análisis del HCM 2000, las mismas que se fundamentan en los principios de la ingeniería de tráfico y han sido desarrolladas empleando información real de campo que no necesariamente presentaría características similares a las locales.

El trabajo de investigación aquí presentado emplea la metodología mencionada para el análisis de las intersecciones semáforizadas en el área central de la ciudad de Tarija (Delimitada por la calle Campero hacia la calle Colón, av. Víctor Paz Estensoro hacia la Calle Cochabamba).

Desde hace más de medio siglo, el semáforo ha sido el dispositivo de control de tráfico más empleado en nuestras calles, sobre todo en aquellas intersecciones en donde los movimientos conflictivos entre vehículos y/o peatones podrían generar accidentes, demoras extremas o incomodidad durante la circulación. Pioneros en la ingeniería de tráfico como Webster (1958), han tratado de entender y modelar el flujo en intersecciones semáforizadas, y han sido ellos quienes brindaron las primeras herramientas de análisis que hoy en día son la base para el entendimiento del funcionamiento de las intersecciones controladas por semáforos.

La gestión e inversión del transporte urbano esta delegada en las entidades públicas las cuales deben velar por brindar un eficiente servicio de la redes viales, sin embargo esto no ha sido ejecutado adecuadamente, lo que ha llevado al caos vehicular que hoy día vivimos. Estos problemas se agravan, continuamente pues el parque automotor crece rápidamente y las condiciones físicas de las ciudades mejoran muy poco y en algunos casos permanecen invariables. Son pues estos motivos los que nos llevan a querer contribuir de alguna manera y desde un punto de vista técnico a estudiar y proponer

metodologías que puedan ser aplicadas a nuestra infraestructura vial y características de tráfico.

El presente trabajo contiene procedimientos para el análisis del nivel de servicio en intersecciones viales señalizadas en el área central de la ciudad de Tarija. En el análisis de este tipo de intersección se debe considerar una amplia variedad de condiciones, incluyendo la cantidad y distribución de movimientos de tráfico, composición, características geométricas y detalles de la intersección.

La metodología de este trabajo está enfocada en la determinación del nivel de servicio para condiciones prevalecientes, pero presentan alternativas de cálculo para determinar otras variables usadas en la búsqueda de un nivel de servicio asumido o deseado. En el análisis de vías, encontramos que la geometría es fija o no variable, lo que la hace una característica más fácil de analizar, no siéndolo así la capacidad, en las intersecciones señalizadas, un elemento adicional es introducido dentro del concepto de capacidad, siendo este el tiempo asignado. Una señal de tráfico esencialmente asigna tiempos entre movimientos de conflicto de tráfico que buscan usar el mismo espacio físico. La localización en la cual el tiempo es asignado tiene un impacto significativo sobre la operación y capacidad de la intersección y sus aproximaciones.

El procedimiento que se presenta en este trabajo hace referencia a la capacidad, nivel de servicio de las aproximaciones que conforman las intersecciones, y el nivel de servicio de la intersección como un todo. La capacidad es evaluada en términos de la relación de la tasa de flujo de demanda (Volumen) y la capacidad, es decir la relación  $V/c$ , mientras que el nivel de servicio es evaluado basándose en el promedio de demora por vehículo (Segundos por vehículo).

### **1.1. Justificación**

La temática del tráfico y vialidad en la ciudad de Tarija, implica una problemática ascendente sobre todo en el centro de la capital.

Sin duda el congestionamiento vehicular es un grave problema, los diseños ineficientes, la falta de control de las vías, la falta de educación vial entre otros, producen que se aumenten los tiempos de demoras y la incomodidad en una intersección, quitando un valioso tiempo productivo a la ciudad y a sus habitantes. Así también, hay que tener en cuenta la cantidad de carbono que emiten los vehículos y los graves efectos contaminantes que producen hacia el medio ambiente y al resto de la sociedad.

La realización del presente estudio es de gran importancia, porque se obtendrá información relevante al tráfico vehicular de una de las principales zonas del centro de la ciudad de Tarija. Actualmente la ciudad de Tarija, al estar en un crecimiento constante se ha incrementado el parque automotor y la falta de una correcta planificación del tráfico vehicular ha desatado un malestar en la ciudadanía al transitar en las horas de mayor circulación vehicular. Por lo anterior mencionado se obtendrán datos fidedignos que permitirán el estudio para efectuar un análisis.

## **1.2. Planteamiento del problema**

### **1.2.1. Situación problemática**

Debido a la gran demanda del servicio de transporte, los sistemas de calles en las ciudades tienden a trabajar por arriba de su capacidad, esto genera problemas de tráfico generando accidentes y congestionamiento vehicular, lo que obliga tiempos de viajes excesivos, dependiendo del tipo de transporte, ubicación geográfica y la hora del día.

Tarija viene presentando los primeros síntomas del gran problema de tráfico vehicular dando una evolución drástica en la excesiva cantidad de vehículos a razón del acelerado crecimiento poblacional que genera un problema de congestión vehicular en intersecciones de zonas focalizadas. Puesto que algunos conductores carecen de una educación vial eficiente, ocasionando un ambiente de caos y desorden. Esta transgresión causa un incremento de los accidentes automovilísticos, ya que muchos conductores manejan a alta velocidad, otros comen mientras manejan, hablan por celular, manejan en

estado de ebriedad, etc. El centro de la ciudad de Tarija por ser una zona principal muy concurrida, es una zona que viene presentando los problemas de congestión vehicular a raíz de los problemas ya mencionados

### **1.2.2. Problema**

A través del análisis de tráfico podremos evaluar el nivel de servicio de las intersecciones semáforizadas en el centro de la ciudad de Tarija y conocer la demora de los vehículos.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Analizar la influencia del nivel de servicio a partir de la semaforización de intersecciones, empleando la metodología del HCM 2000 (Manual de capacidad de carreteras) para evaluar el estado actual del área central de la ciudad de Tarija.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Diagnosticar los lugares y las horas de mayor flujo vehicular y de transeúntes.
- Realizar el aforo del tráfico de vehículos en cada intersección (Esquinas) de calles del centro de la ciudad de Tarija, para determinar la concentración en distintos horarios que ocasionan conflictos.
- Analizar de manera específica el nivel de servicio en intersecciones semáforizadas de acuerdo con los conceptos de capacidad y nivel de servicio aplicado por el Instituto de investigación del transporte (USA) en el highway capacity manual 2000(Manual de capacidad de carreteras 2000) y su metodología, para las condiciones prevalecientes de tráfico urbano en la ciudad de Tarija.

- Determinar la influencia de la capacidad en la evaluación del nivel de servicio según el análisis de tráfico en las intersecciones semáforizadas del centro de la ciudad de Tarija.
- Determinar la influencia de la coordinación de semáforos en la evaluación del nivel de servicio según el análisis de tráfico en las intersecciones semáforizadas del centro de la ciudad de Tarija.
- Efectuar una valoración de los resultados en los tramos en estudio del centro de la ciudad de Tarija.

#### **1.4. Diseño metodológico**

El diseño de la investigación fue de tipo no experimental debido a que no incluye la manipulación de la variable y se observa el fenómeno bajo condiciones reales.

##### **1.4.1. Componentes**

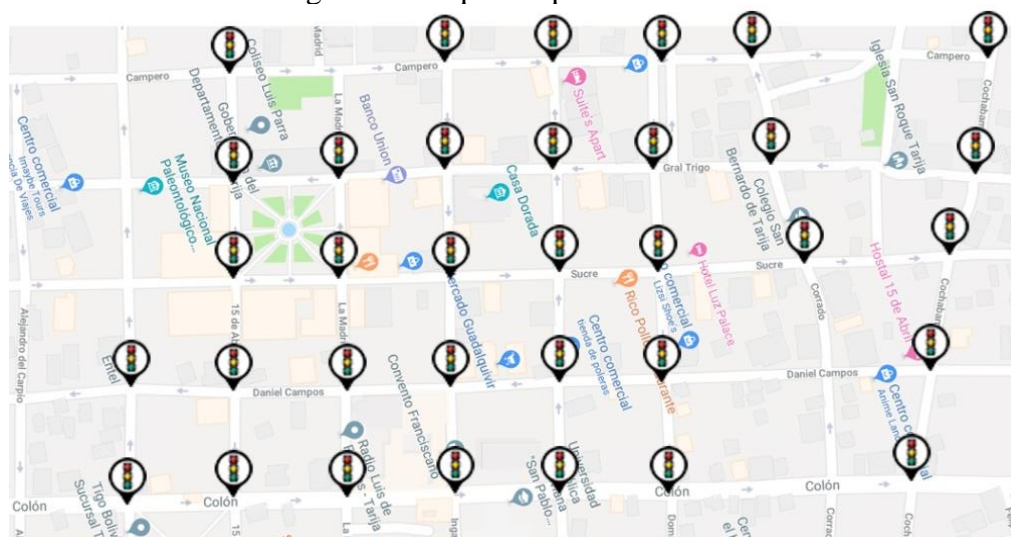
**Unidad:** Se realizarán cálculos de volúmenes de tránsito, capacidad, tasas de flujo y demoras de tráfico, para determinar cuáles de las intersecciones tiene mayor tráfico vehicular con esto se empleará diferentes tipos de recomendaciones hacia los diferentes problemas que se encontraran, así mismo gracias a nuestro estudio se dará paso para otros tipos de investigaciones más adelante.

**Población:** La población considerada son todas las intersecciones semáforizadas que se encuentran en la ciudad de Tarija.

**Muestra:** La muestra considerada son 34 intersecciones semáforizadas que se encuentran en el centro de la ciudad de Tarija (Delimitada por la calle Campero hacia la calle Colón y de la av. Víctor Paz Estensoro hacia la calle Cochabamba), las cuales son:

- 1) Calle Campero – Calle 15 de Abril.
- 2) Calle Campero – Calle Ingavi.
- 3) Calle Campero – Calle Bolívar.
- 4) Calle Campero – Av. Domingo Paz.
- 5) Calle Campero – Calle Corrado.
- 6) Calle Campero – Calle Cochabamba.
- 7) Calle Gral. Trigo – Calle 15 de Abril.
- 8) Calle Gral. Trigo – Calle La Madrid.
- 9) Calle Gral. Trigo – Calle Ingavi.
- 10) Calle Gral. Trigo – Calle Bolívar.
- 11) Calle Gral. Trigo – Av. Domingo Paz.
- 12) Calle Gral. Trigo – Calle Corrado.
- 13) Calle Gral. Trigo – Calle Cochabamba.
- 14) Calle Sucre – Calle 15 de Abril.
- 15) Calle Sucre – Calle La Madrid.
- 16) Calle Sucre – Calle Ingavi.
- 17) Calle Sucre – Calle Bolívar.
- 18) Calle Sucre – Av. Domingo Paz.
- 19) Calle Sucre – Calle Corrado.
- 20) Calle Sucre – Calle Cochabamba.
- 21) Calle Daniel Campos – Calle Virginio Lema.
- 22) Calle Daniel Campos – Calle 15 de Abril.
- 23) Calle Daniel Campos – Calle La Madrid.
- 24) Calle Daniel Campos – Calle Ingavi.
- 25) Calle Daniel Campos – Calle Bolívar.
- 26) Calle Daniel Campos – Av. Domingo Paz.
- 27) Calle Daniel Campos – Calle Cochabamba.
- 28) Calle Colón – Calle Virginio Lema.
- 29) Calle Colón – Calle 15 de Abril.
- 30) Calle Colón – Calle La Madrid.
- 31) Calle Colón – Calle Ingavi.
- 32) Calle Colón – Calle Bolívar.
- 33) Calle Colón – Av. Domingo Paz.
- 34) Calle Colón – Calle Cochabamba.

Figura 1: Croquis de puntos a estudiar



Fuente: Elaboración propia

**Muestreo:** El tipo de muestra en el estudio de la investigación fue no probabilístico, ya que según Hernández, Fernández y Baptista (2000) “las muestras no probabilísticas, también llamadas muestras dirigidas, suponen un procedimiento de selección informal y poco arbitrario.

Aun así, se utilizan en muchas investigaciones y a partir de ella se hacen las inferencias sobre la población”. Esto nos indica que no se utilizó formulas estadísticas para determinar la cantidad de nuestra muestra, realizándolo así mediante criterio propio.

El conteo vehicular (Aforo de vehículos) será realizado manualmente (Conteo del tráfico en las intersecciones), para el registro de datos se empleara personas localizadas en puntos estratégicos. Se registrara en cada intersección hora en periodos de 15 minutos, tipos de vehículos y el sentido hacia donde se dirigirán los vehículos.

#### **1.4.2. Métodos y técnicas empleadas**

##### **Metodología de la investigación**

Comprende los elementos esenciales del marco metodológico que nos permite realizar la investigación con miras a determinar los objetivos trazados. Aquí se presenta las características que nos indican cómo se ha investigado: Tipo de investigación, nivel de investigación, técnicas de recolección de datos, análisis operacional.

**Tipo de investigación:** La presente tesis es inductiva, ya que del registro de variables particulares, se obtienen conclusiones generales, y es deductiva puesto que con las conclusiones generales conduce a su aplicación particular partiendo de lo general y aceptado como válido.

**Nivel de investigación:** Es descriptiva, porque se pretende especificar las características del universo de la investigación, y es correlacional por que se busca saber cómo se comporta una variable conociendo el comportamiento de las demás variables.

**Técnicas de recolección de datos:** Para la contabilización de los vehículos se utiliza la técnica del aforo de vehículos en la zona delimitada del área de trabajo en un día típico.

Los aforos son fundamentales en los estudios de tránsito y se realiza para determinar el número de vehículos o peatones que circulan por un punto dado, en un momento dado.

Los datos que se obtienen son de gran importancia para la evaluación del funcionamiento operacional de las vías y de ésta forma detectar las intersecciones congestionadas, ya sea porque se presenten altos volúmenes vehiculares o por que se cuente con deficiencias geométricas en las secciones de la vía.

Las personas encargadas del conteo vehicular nos ubicamos en puntos de intersección de las vías que comprende el estudio disponiéndonos a un lado de la vía durante el tiempo asignado para el conteo, de manera de poder contar de forma clara los vehículos que circulan en el primer y segundo carril, y contar también a los peatones que cruzan las vías determinadas en un determinado tiempo.

**Análisis operacional o procesamiento de datos:** Para lo cual se ha determinado cinco fases:

Fase 1: Cuadro de entrada de datos

Fase 2: Cuadro de volumen ajustado

Fase 3: Cuadro para la tasa de flujos de saturación

Fase 4: Cuadro para el análisis de la capacidad

Fase 5: Cuadro de la demora y el nivel de servicio

## **Instrumentos**

**Cronómetro:** El cronómetro es un instrumento que nos servirá para medir los tiempos de ciclos de los semáforos en el centro de la ciudad de Tarija con mayor exactitud, también para marcar los periodos de tiempo para el flujo vehicular en las intersecciones.



**Cinta métrica:** La cinta métrica será utilizada para medir las dimensiones geométricas de las vías, como ancho de carril y longitud de carril, que se presenten en cada intersección dentro del área del proyecto.

**Planilla de aforo:** La planilla es aquel formulario o impreso que cuenta con espacios en blanco destinados a ser completados, que nos ayudara a recoger la información de campo para luego ser llevada a una planilla digital para la elaboración de los cálculos y resultados referente al proyecto. Se anotaran flujos vehiculare en periodos determinados, tiempos de ciclo, y la dirección que tomara cada vehículo.

**Nivel topográfico:** El nivel topográfico será utilizado para la medición de las dimensiones geométricas de las vías, para poder obtener los datos reales de las pendientes de las calzadas (%) de las intersecciones en estudio.

**Mira estadimétrica:** Es una regla graduada que nos permitirá medir desniveles, es decir diferente alturas en el área del proyecto con ayuda del nivel topográfico.

### 1.4.3. Proceso de aplicación

#### Análisis estadístico

**Variable independiente:** Estudio del tráfico vehicular, (Tipo de variable cuantitativo). El estudio del tráfico vehicular se realiza con la finalidad de brindar un análisis a las vías de alto congestionamiento y también determinar problemas existentes.

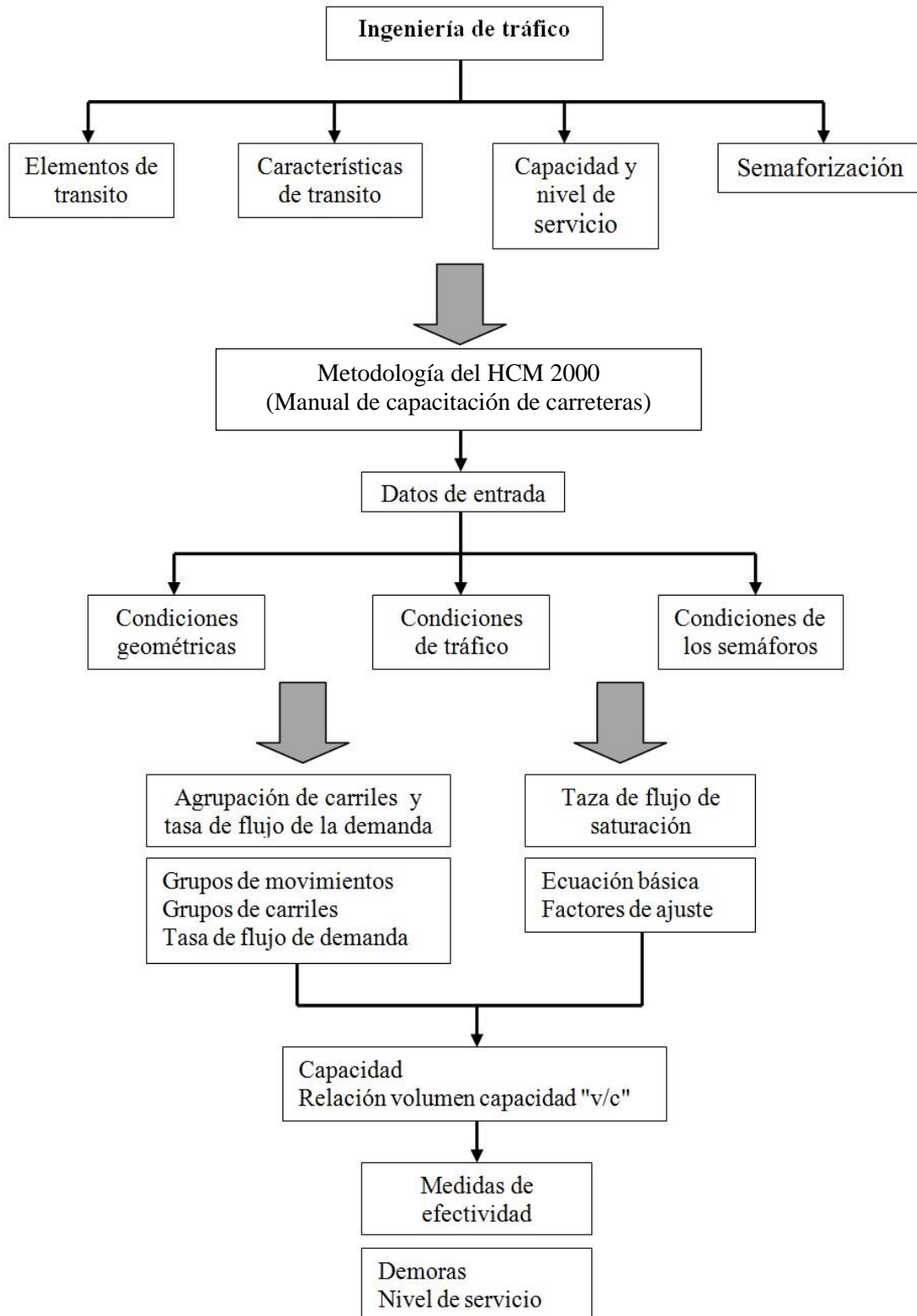
Dispositivos para el control de tránsito (Tiempos de semáforos)

Vías Urbanas (Capacidad, volúmenes, nivel de servicio)

**Variable dependiente:** Conflictos en el tráfico y vialidad, (Tipo de variable cualitativo). Los problemas que conlleva y ocasiona el congestionamiento vehicular en el centro de la ciudad de Tarija en periodos críticos, son muchos y se producen dentro de la

actividad diaria que tienen los habitantes.

## Flujograma



## **1.5. Alcance**

El análisis de una intersección se basa en un proceso ordenado de actividades, partiendo de un estudio del estado actual de la intersección para constatar su nivel de servicio e identificar los principales problemas de tránsito, considerando elementos básicos de intersecciones. Para el presente trabajo se realiza un estudio de la zona central de Tarija y un conteo manual tanto de volúmenes, giros, peatones y ciclistas durante un lapso de 1 semana continua por intersección. La metodología que sigue este trabajo se basa en el highway capacity manual en su edición 2000 (HCM 2000), con la cual se obtiene el nivel de servicio y la capacidad de la intersección. Se delimitara un área de estudio, que se denomina muestra representativa de estudio (De norte a sur, calle Cochabamba hacia la av. Víctor Paz Estensoro, de oeste a este, calle Campero hacia la calle Colon).

Se aplicarán varios factores que requiere el procedimiento que se explicaran más adelante para determinar la calidad de flujo que circula por una intersección, así como para encontrar el nivel de servicio que conforma la intersección. Se debe hacer un análisis para cada intersección en estudio y evaluar el tipo de nivel que le corresponda a cada vía bajo sus propias características referenciales de cada tramo elegido.

Se explicará sobre el nivel de servicio en intersecciones semáforizadas, sus parámetros, tipos de flujo y los ajustes que se deben hacer para que los resultados sean adecuados al tráfico que se representa en nuestra región (Ciudad de Tarija).

Todos estos conceptos en estudios ayudarán a analizar una red con intersecciones semáforizadas, concluyendo que aun con datos de entrada idénticos pueden esperarse diferencias importantes entre los resultados brindados. Luego se describe todos los datos recolectados en campo, localización, selección de las intersecciones a estudiar, registro de datos, reglaje de los semáforos, los aforos realizados a vehículos en periodos determinados de tiempo, finalmente se establecen los resultados obtenidos y recomendaciones que se puede dar para un mejor desempeño en campo referente a la obtención de datos y métodos a usar.

## CAPITULO II

### DEFINICIONES BASICAS Y CONCEPTOS DE LA INGENIERIA DE TRAFICO

#### 2.1. Definición de tránsito

Para entender el concepto tanto técnico como científico de la ingeniería de tráfico y transporte tenemos las siguientes definiciones:

**Transportar:** Llevar una cosa de un lugar a otro, llevar de una parte a otra por el porte o precio convenido.

**Transporte o transportación:** Acción o efecto de transportar o transportarse.

**Transitar:** Ir o pasar de un punto a otro por vías, calles o parajes públicos.

**Tránsito:** Acción de transitar. Sitio por donde se pasa de un lugar a otro.

**Tráfico:** Tránsito de personas y circulación de vehículos por calles, carreteras, caminos, etc.

**Ingeniería de tráfico:** Se define como la rama de la ingeniería que trata del planeamiento, el proyecto geométrico y explotación de las redes viarias, instalaciones auxiliares (Aparcamientos, terminales, etc.) y zonas de influencia así como de su relación con otros medios de transporte.

#### 2.2. Objetivos y alcance de la ingeniería de tráfico

El objetivo principal de la ingeniería de tráfico es conseguir que la circulación de personas y mercancías sea segura, rápida y económica.

La ingeniería de tránsito analiza lo siguiente:

### **2.2.1. Características del tránsito**

Se utilizan diversas magnitudes que reúnen las características de los vehículos y usuarios. Estas magnitudes son: La velocidad, el volumen, la densidad, la separación entre vehículos sucesivos, intervalos entre vehículos, tiempos de recorrido y demoras, origen y destino del movimiento, la capacidad de las calles y carreteras, se analizan los accidentes, el funcionamiento de pasos a desnivel, terminales, intersecciones canalizadas, etc. Por otro lado se estudia al usuario todas las reacciones para maniobrar el vehículo como ser: Rapidez de reacción para frenar, para acelerar, su resistencia al cansancio, etc.

### **2.2.2. Reglamentación del tránsito**

Se debe establecer los reglamentos del tránsito, como ser: La responsabilidad y licencias de los conductores, peso y dimensiones de los vehículos, control de accesorios obligatorios y equipo de iluminación, acústicos y de señalamiento. También se debe tomar en cuenta la prioridad de paso, tránsito en un sentido, tiempo de estacionamiento, el control policiaco en intersecciones, sanciones relacionadas con accidentes, etc.

### **2.2.3. Señalamiento y dispositivos de control**

Su función principal es determinar los proyectos, construcción, conservación y uso de las señales, iluminación, dispositivos de control, etc.

### **2.2.4. Planificación vial**

Es necesario analizar y realizar investigaciones para poder adaptar el desarrollo de las calles y carreteras a las necesidades del tránsito, y de esta manera conocer los problemas que se presentan al analizar el crecimiento demográfico, las tendencias del aumento en el número de vehículos y la demanda de movimiento de una zona a otra. Se debe establecer claramente los objetivos concretos y operacionales que se quiere alcanzar.

### 2.3. Variables importantes

Tres parámetros básicos pueden ser utilizados para describir el tránsito en cualquier carretera:

Densidad

Volumen o razón de flujo

Velocidad

El manual de capacidad de carreteras 2000, HCM 2000, por sus siglas en inglés, highway capacity manual, divide el tránsito en dos situaciones.

El flujo ininterrumpido

El flujo interrumpido

Para éste análisis, se usará como base el flujo interrumpido, ya que el flujo ininterrumpido es usado para el tránsito en carreteras.

**Densidad:** El número de vehículos por metro de vía. Solo se mide a lo largo de la vía.

La densidad se puede calcular como sigue:

$$D = \frac{v}{S}$$

Dónde:

v = Razón de flujo (veh/hr)

S = Velocidad promedio (km/hr)

D = Densidad (veh/km)

La densidad es posiblemente el parámetro más importante en el tránsito, porque es la medida más directamente relacionada con la demanda de tránsito.

**Volumen o flujo:** El volumen de tránsito es definido como el número de vehículos que pasan en un determinado punto durante un intervalo de tiempo.

La unidad para el volumen es simplemente “vehículos” o “vehículos por unidad de tiempo”. Un intervalo común de tiempo para el volumen es un día, descrito como vehículos por día. Los volúmenes diarios frecuentemente son usados como base para la planificación de las carreteras.

Para los análisis operacionales, se usan los volúmenes horarios, ya que el volumen varía considerablemente durante el curso de las 24 horas del día. La hora del día que tiene el volumen horario más alto es llamada “hora pico”. Los volúmenes de hora pico son usados como la base para el diseño de carreteras y para varios tipos de análisis operacionales.

Para períodos menores a una hora, generalmente el volumen se expresa como un equivalente horario de las razones de flujo. La relación entre el volumen horario y la máxima razón de flujo se define como el factor de hora pico (FHP):

$$\text{FHP} = \frac{\text{Volumen horario}}{\text{Máxima razón de flujo}}$$

El valor del FHP está entre el rango de 0.95 y 0.75, con valores más bajos, significaría una gran variación en el flujo durante la hora pico. Según el HCM 2000, el valor del FHP para áreas rurales es de 0.88 y el valor para áreas urbanas es de 0.92.

**Velocidad:** Esta variable es la velocidad de los carros en una vía dada. La velocidad es definida como una razón de movimiento, en distancia por unidad de tiempo, generalmente como kilómetros por hora (km/h).

El HCM 2000 usa la velocidad promedio de viaje como la medida de velocidad, ya que es fácil de calcular observando cada vehículo dentro del tránsito y es la medida estadística más relevante en relación con otras variables. La velocidad promedio de viaje se calcula dividiendo el largo de la carretera, sección o segmento bajo consideración entre el tiempo promedio de viaje de los vehículos que pasan por dicho segmento, la ecuación para el cálculo es como sigue:

$$S = \frac{L}{t_a}$$

Dónde:

S = Velocidad promedio de viaje (km/hr)

L = Longitud del segmento de la vía (km)

t<sub>a</sub> = Tiempo promedio de viaje en el segmento (hr)

Diferentes parámetros de velocidad pueden ser aplicados al tránsito como los siguientes:

**Velocidad promedio de rodaje:** Es aquella medida de tránsito basada en la observación del tiempo de viaje de los vehículos pasando por una sección de la vía en una longitud conocida. Calculada dividiendo la longitud del segmento entre el tiempo promedio de rodaje de los vehículos pasando por dicho segmento. El tiempo de rodaje es medido únicamente cuando los vehículos están en movimiento.

**Velocidad promedio de viaje:** Es una medida de tránsito basada en la observación del tiempo de viaje en una longitud dada de una vía. Esto es la longitud del segmento dividido entre el tiempo promedio de viaje de los vehículos que pasan por dicho segmento, incluyendo todos los tiempos de demora por paradas.

**Velocidad de flujo libre:** La velocidad de flujo libre FFS (Por sus siglas en inglés, free flow speed), es la velocidad promedio de los vehículos en una vía dada, medida bajo condiciones de un volumen bajo, cuando los conductores tienden a conducir a una velocidad alta sin restricciones de demoras.

#### 2.4. Elementos básicos de tránsito

Con el propósito de estudiar los aspectos operacionales de la ingeniería de tránsito, es importante analizar, de manera muy general, los elementos básicos que hacen que se produzcan los flujos de tránsito interactuando entre sí. Existen 3 elementos básicos que son:



El usuario: Peatón y conductor

El vehículo: Privado, público y comercial

La vía

### 2.4.1. El usuario

Es muy importante tener en cuenta el comportamiento del usuario para la planeación, estudio, proyecto y operación de un sistema de transporte automotor. El usuario está relacionado con los peatones y conductores.

**El peatón:** Se considera como peatón potencial a la población en general, desde personas de un año de edad hasta más de cien años. En la mayoría de los casos las calles y carreteras son compartidos por los peatones y vehículos, excepto en las autopistas el tráfico de los peatones es casi nulo.

**El conductor:** Constituye el elemento de tránsito más importante, ya que el movimiento y calidad de circulación de los vehículos dependerá fundamentalmente de ellos para adaptarse a las características de la vía y de la circulación. En referencia a las reacciones que tienen los conductores se consideran factores que influyen en sus condiciones físicas y psíquicas, sus conocimientos, su estado de ánimo, la fatiga, el clima, etc.

Tabla 1: Factores que afectan al conductor

Factores que afectan al conductor		
Factores internos	Psicológicos	Motivación Experiencia Personalidad Estado de ánimo
	Físicos	Vista Adaptación lumínica Altura del ojo Otros sentidos
	Psicosomáticos	Cansancio Sexo Edad
Factores externos	Tiempo (Meteorológico) Uso del suelo Tráfico Características de la vía	

Fuente: Bañon Blázquez Luis & Beviá García José F., 2000

### **2.4.2. El vehículo**

En ciertos países, la incorporación de mayor cantidad de vehículos no solo ha mejorado el transporte, ya que también ha elevado el nivel económico general del país, por lo que se puede afirmar que la relación de habitantes por vehículo es un indicador para apreciar el progreso de un determinado territorio.

Por lo tanto, es indispensable que cada país mejore las condiciones del transporte para su progreso y de esta manera poder transportar los bienes de consumo desde las fuentes de producción hasta los mercados y de allí comercializarlo a la población. Actualmente, es inevitable que aumente el número de vehículos cada año, lo que es deseable y conveniente, logrando así reducir más la actual relación de habitantes por vehículo. Por lo tanto, el segundo elemento componente del tránsito, el vehículo, irremediablemente va en aumento.

#### **Clasificación y características del vehículo de proyecto**

Vehículo de proyecto es aquel tipo de vehículo hipotético, cuyo peso, dimensiones y características de operación son utilizados para establecer los lineamientos que guiarán el proyecto geométrico de las carreteras, calles e intersecciones, tal que estas puedan acomodar vehículos de este tipo. Los vehículos se clasifican en 2:

Vehículos ligeros o livianos

Vehículos pesados (Camiones y autobuses)

#### **Dimensiones de vehículos**

Las dimensiones máximas permitidas establecidas por la ley N° 441 en el artículo 12, están regidas por la siguiente tabla:

Tabla 2: Dimensiones máximas permitidas

Dimensiones	Tipo de vehículo	Metros
Ancho total máximo	Todos	2.60
Altura total máxima	Camiones	4.20
	Furgones y contenedores	4.30
	Buses	4.10 / 4.20
Longitudes totales máximas	Buses	14.00
	Camiones con dos ejes	12.00
	Camiones con más de dos ejes (Rígidos)	12.50
	Tractor camiones con semirremolque	18.60
	Camiones con remolque	20.50
	Vehículos para transporte de ganado en pie	24.00

Fuente: Ley N° 441 del estado plurinacional de Bolivia, ley de control de pesos y dimensiones vehiculares en la red vial fundamental

### 2.4.3. La vía

El tercer elemento fundamental del tráfico es la vialidad o la vía por el que se mueven los vehículos. Es una infraestructura de transporte acondicionada dentro de toda una faja de terreno, con el propósito de permitir la circulación de vehículos de manera continua en el espacio y en el tiempo.

#### Clasificación de las vías

Esta clasificación no está orientada al diseño, sino a la administración de las redes viales del país, definiendo tres niveles dentro del sistema: Red fundamental, redes departamentales y redes municipales. La red fundamental esta bajo la responsabilidad de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

#### Categoría de las vías

La clasificación consulta seis categorías divididas en dos grupos, ellas son:

Carreteras: Autopistas, autorrutas y primarias

Caminos: Colectores, locales y de desarrollo

**Autopista (O):** Son carreteras nacionales diseñadas desde su concepción original para cumplir con las características y niveles de servicio que se describen a continuación. Normalmente su emplazamiento se sitúa en terrenos rurales donde antes no existían obras viales de alguna consideración, que impongan restricciones a la selección del trazado y pasando a distancias razonablemente alejadas del entorno suburbano que rodea las ciudades o poblados (Circunvalaciones).

**Autorrutas (I.A):** Son carreteras nacionales existentes a las que se les ha construido o se le construirá una segunda calzada prácticamente paralela a la vía original. Normalmente se emplazan en corredores a lo largo de los cuales existen extensos tramos con desarrollo urbano, industrial o agrícola intensivo, muy próximo a la faja de la carretera.

Están destinadas principalmente al tránsito de paso, de larga distancia, pero en muchos sub-tramos sirven igualmente al tránsito interurbano entre localidades próximas entre sí. Podrán circular por ellas toda clase de vehículos motorizados incluso aquellos que para hacerlo deban contar con una autorización especial, y que no estén expresamente prohibidos o cuyo tipo de rodado pueda deteriorar la calzada.

**Carreteras primarias (I.B):** Son carreteras nacionales o regionales, con volúmenes de demanda medios a altos, que sirven al tránsito de paso con recorridos de mediana y larga distancia, pero que sirven también un porcentaje importante de tránsito de corta distancia, en zonas densamente pobladas. La sección transversal puede estar constituida por carriles unidireccionales separadas por un cantero central que al menos de cabida a una barrera física entre ambas calzadas más 1,0 m libre desde ésta al borde interior de los carriles adyacentes, pero por lo general se tratará de una calzada con dos carriles para tránsito bidireccional.

**Caminos colectores (II):** Son caminos que sirven tránsitos de mediana y corta distancia, a los cuales acceden numerosos caminos locales o de desarrollo. El servicio al tránsito de paso y a la propiedad colindante tiene una importancia similar. Podrán circular por

ellos toda clase de vehículos motorizados. En zonas densamente pobladas se deberán habilitar carriles auxiliares destinados a la construcción de ciclo vías.

**Caminos locales (III):** Son caminos que se conectan a los caminos colectores. Están destinados a dar servicio preferentemente a la propiedad adyacente. Son pertinentes las ciclo vías. La sección transversal prevista consulta dos carriles bidireccionales.

**Caminos de desarrollo:** Están destinados a conectar zonas aisladas y por ellas transitarán vehículos motorizados y vehículos a tracción animal. Sus características responden a las mínimas consultadas para los caminos públicos, siendo su función principal la de posibilitar tránsito permanente aun cuando las velocidades sean reducidas, de hecho las velocidades de proyecto que se indican a continuación son niveles de referencia que podrán ser disminuidos en sectores conflictivos. La sección transversal que se les asocia debe permitir el cruce de un vehículo liviano y un camión a velocidades tan bajas como 10 km/hr y la de dos camiones, estando uno de ellos detenido.

## **2.5. Intersecciones viales**

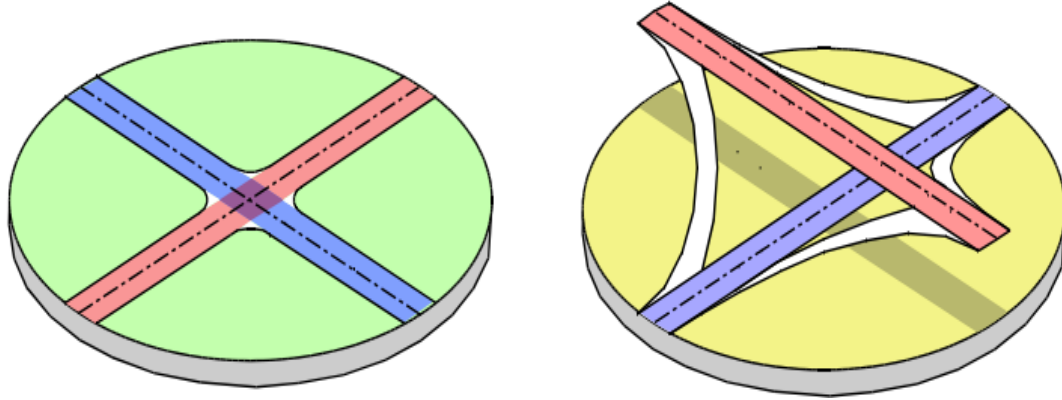
Las intersecciones son parte de un sistema existente de calles y vialidades, en aquellos puntos donde se unen los elementos, las cuales funcionan como un conjunto de interrelaciones muy complejas. Se denomina como intersección a un área que es compartida por dos o más caminos, y cuya función principal es posibilitar el cambio de dirección de la ruta. La intersección varía en complejidad desde un simple cruce, con sólo dos caminos que se cruzan entre sí en ángulo recto, hasta una intersección más compleja, en la cual se cruzan tres o más caminos dentro de la misma área.

### **Tipos de intersecciones viales**

Existen 2 tipos de intersecciones, intersección a nivel e intersección a desnivel (Enlace). La diferencia radica en que en las intersecciones el cruce se realiza a nivel, los

ejes de las diversas vías se cortan en un punto, en cambio en intersección a desnivel, en el enlace el cruce se realiza a distinto nivel, interceptándose en este caso en las proyecciones horizontales de los ejes.

Figura 2: Representación esquemática de intersecciones a nivel y desnivel



Fuente: Bañon Blázquez Luis & Beivá García José F., 2000

Para este documento es necesario definir la intersección a nivel.

### 2.5.1. Intersección a nivel

La superficie común a ambas vías genera un conflicto sobre quien tiene la prioridad de paso, o de uso de la calzada. Por lo general, las intersecciones se dan con ángulos mayores a  $70^\circ$ , esto se debe a que el conductor al girar en intersecciones en forma oblicua o en Y tiene una menor visibilidad, siempre se busca que la intersección tenga una superficie compartida mínima, esto se debe a que las posibilidades de colisión disminuyen a medida que disminuye la misma.

### 2.5.2. Tipos de intersecciones a nivel

Las intersecciones son básicamente el cruce de dos o más caminos, por lo que son puntos de conflicto entre los vehículos que las cruzan. La capacidad de las intersecciones, controla la capacidad de las calles que se intersecan en estas, por esto es importante maximizar su seguridad y capacidad.

Las intersecciones según su forma se pueden dividir básicamente en:

Intersecciones en T  
Intersecciones en Y  
Intersecciones en cruz  
Escalonadas  
Multivías

Además se las puede clasificar de la siguiente manera:

Sin control  
Con control de prioridad (Pare, ceda el paso)  
Redondeles  
Controladas por semáforos

Para el diseño de intersecciones a nivel se necesita datos del tráfico, diseños opcionales con sus respectivas ventajas, y un diseño final que cumpla con los estándares requeridos. Cualquiera que sea la clase de intersección, los siguientes principios deben ser tomados en cuenta en su diseño:

Minimizar el área donde puedan ocurrir conflictos, sucede especialmente en intersecciones en T ó Y, mediante el uso de islas se puede canalizar el tráfico y disminuir el área de posibles conflictos.

Favorecer los movimientos del tráfico de mayor prioridad, con esto se logra mejorar tanto la capacidad de la intersección como su capacidad.

Desalentar movimientos peligrosos, con el uso de islas se puede canalizar los vehículos para que los conductores no puedan realizar movimientos peligrosos que pueden resultar en accidentes.

Proveer señalización y marcas para los usuarios, señales como pare y ceda el paso deben ser provistas para que los conductores sepan cómo maniobrar de forma segura.

## **2.6. Diseño geométrico de intersecciones**

El diseño geométrico de una intersección se basa en adaptar las características geométricas de las vías que se cruzan que deben ser capaces de servir al flujo vehicular que pasa por ellas tratando de evitar demoras.

### **2.6.1. Composición de tránsito**

Para el diseño se debe considerar el tamaño y peso de los vehículos, con esto la normativa permite clasificarlos en distintas clases, con las cuales se realiza una composición del tránsito para ajustarse al diseño.

Los camiones generalmente son más pesados que los buses y automóviles, son más lentos y ocupan más espacio, por lo tanto, tienen mayor efecto en el tránsito que los vehículos livianos.

El efecto de operación de un vehículo pesado equivale al de varios vehículos livianos por eso para este trabajo el pasajero equivalente por vehículo pesado es igual a 2, como se indica en el HCM 2000. Entonces, a mayor proporción de vehículos pesados mayor intensidad del tránsito. Por lo tanto, la intersección necesitará una mayor capacidad para garantizar que la relación volumen-capacidad sea menor que 0.80.

### **2.6.2. Criterios generales para el diseño de intersecciones**

Se debe considerar los siguientes aspectos para el diseño de intersecciones con la intención de mejorar el diseño, vale recalcar que es mejor optar por la solución más sencilla y comprensible para los usuarios.

Se debe tener en cuenta algunos conceptos antes del diseño geométrico de una intersección:

**Priorización de movimientos:** Siempre los movimientos principales deben tener



preferencia sobre los secundarios, así se verán limitados los movimientos secundarios con una buena señalización, reduciendo el ancho de la vía o introduciendo curvas de radios pequeños.

**Consistencia con los volúmenes de tránsito:** La mejor alternativa siempre será la que tenga un equilibrio entre el tamaño y la magnitud de los volúmenes de tránsito.

**Sencillez y claridad:** Las intersecciones no deben permitir que los conductores duden de sus maniobras, los movimientos no pueden ser molestos o tener recorridos muy largos.

**Visibilidad:** La velocidad de los vehículos en la intersección debe limitarse en función de la visibilidad, incluso debe permitir la detención total del vehículo.

**Perpendicularidad de la trayectoria:** En lo posible se debe dejar las intersecciones en ángulo recto puesto que proporcionan mínimas áreas de conflicto, disminuyen los choques y facilitan las maniobras.

## **2.7. Dispositivos para el control de tránsito**

Se denomina dispositivos para el control de tránsito a las señales de tránsito, marcas, semáforos y cualquier otro dispositivo, que se coloca sobre o adyacente a las calles y carreteras encargados por la autoridad pública, para prevenir, regular y guiar a los usuarios de la misma.

### **Clasificación de dispositivos de control**

Los dispositivos de control indican a los usuarios las precauciones (Preventivas), las limitaciones (Reguladoras) y las informaciones (Informativas). Los dispositivos para el control de tránsito en calles y carreteras se clasifican en:

## **Señales verticales**

Las señales verticales son dispositivos instalados al costado o sobre el camino, y tienen por finalidad, reglamentar el tránsito, prevenir e informar a los usuarios mediante palabras o símbolos establecidos. Su implementación será de acuerdo al estudio de ingeniería vial anteriormente citado debiendo evitarse, por ejemplo, el uso excesivo de señales verticales en un tramo corto puesto que puede ocasionar contaminación visual y pérdida de su efectividad. Asimismo, es importante el uso frecuente de señales informativas de identificación y destino, a fin de que los usuarios de la vía conozcan oportunamente su ubicación y destino.

### **Clasificación de señales verticales**

**Señales reguladoras o de reglamentación:** Tienen por finalidad notificar a los usuarios de las vías, las prioridades, prohibiciones, restricciones, obligaciones y autorizaciones existentes, en el uso de las vías. Su incumplimiento constituye una falta que puede acarrear un delito.

**Señales de prevención:** Su propósito es advertir a los usuarios sobre la existencia y naturaleza de riesgos y/o situaciones imprevistas presentes en la vía o en sus zonas adyacentes, ya sea en forma permanente o temporal.

**Señales de información:** Tienen como propósito guiar a los usuarios y proporcionarles información para que puedan llegar a sus destinos en la forma más simple y directa posible. Además, proporcionan información relativa a distancias a centros poblados y de servicios al usuario, kilometrajes de rutas, nombres de calles, lugares de interés turístico.

### **Señales horizontales**

Está conformada por marcas planas en el pavimento, tales como líneas horizontales y transversales, flechas, símbolos y letras, que se aplican o adhieren sobre el pavimento,

sardineles, otras estructuras de la vía y zonas adyacentes. Forma parte de esta señalización, los dispositivos elevados que se colocan sobre la superficie de rodadura, también denominadas marcas elevadas en el pavimento, con el fin de regular, canalizar el tránsito o indicar restricciones. Se emplean para regular o reglamentar la circulación, advertir y guiar a los usuarios de la vía, por lo que constituyen un elemento indispensable para la operación vehicular y seguridad vial.

## **2.8. Capacidad vial y niveles de servicio**

Estos conceptos se aplican a los sistemas de transporte para análisis, tanto de diseño como de operación. Para los especialistas en transporte urbano, los sistemas en cuestión son: Autopistas urbanas, vías urbanas (Arterias y calles), intersecciones semáforizadas o no, infraestructura para autobuses y transporte público, infraestructuras peatonales y para ciclistas. La capacidad depende de las unidades en cuestión (Peatones, vehículos particulares, transporte público, etc.), el periodo de tiempo, y el área de la infraestructura en cuestión (Carriles, ancho de la calzada, etc.).

El nivel de servicio es un intento en describir las condiciones operacionales del volumen del tránsito tal y como las percibe el usuario. Originalmente, el concepto de nivel de servicio era definido como una manera cualitativa de medir las condiciones operacionales de una vialidad.

Esta medida cubriría idealmente factores como velocidad, tiempos de viaje, demoras, libertad de maniobras, interrupciones del tránsito, comodidad, conveniencia y seguridad. Para los especialistas de transporte, las medidas cuantitativas de estos factores son los de importancia, sin embargo, el concepto de los niveles de servicio es de utilidad para la comunicación con el público en general.

Para cada tipo de infraestructura se definen seis categorías de niveles de servicio, del "A" al "F". El nivel "A" se refiere a condiciones de volumen libre. El nivel "E" se refiere a condiciones de volumen a capacidad y el nivel "F" a condiciones de congestión crítica. En ingeniería de tránsito existen dos tipos definidos de infraestructura: Vías de flujo

continuo y de flujo discontinuo.

**Flujo continuo:** Las vías de flujo continuo no tienen elementos fijos que sean obstáculo al volumen de tránsito y que provoquen interrupciones, tales como semáforos, altos, etc. Los siguientes son ejemplos de vías de volumen continuo:

Autopistas: Tramos básicos de autopistas, áreas de entrecruzamiento, enlaces, sistemas de autopistas

Carreteras de carriles múltiples

Carreteras de dos carriles

**Flujo discontinuo:** Las vías de flujo discontinuo tienen elementos fijos que provocan la interrupción del tráfico de manera periódica. Estos elementos son: Semáforos, señales de alto, y otros tipos de control. Estos mecanismos producen paradas del tránsito, indiferentemente de la cantidad de vehículos que existe. Las siguientes son ejemplos de infraestructura de flujo discontinuo:

Intersecciones semáforizadas

Intersecciones no semáforizadas (Controladas por señales de alto y ceda el paso)

Arterias

Transporte público

Peatones

Bicicletas

### **2.8.1. Capacidad vial**

En las fases de planeación, estudio, proyecto y operación de vías y calles, la demanda de tránsito, presente o futura, se considera como una cantidad conocida. Una medida de la eficiencia con la que un sistema vial presta servicio a esta demanda, es su capacidad u oferta.

Teóricamente la capacidad ( $Q_{\text{máx}}$ ) se define como la tasa máxima de flujo que puede

soportar una vía o calle. De manera particular, la capacidad de una infraestructura vial es el máximo número de vehículos (Peatones) que pueden pasar por un punto o sección uniforme de un carril o calzada durante un intervalo de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos de control. El intervalo de tiempo utilizado en la mayoría de los análisis de capacidad es de 15 minutos, debido a que se considera que éste es el intervalo más corto durante el cual puede presentarse un flujo estable.

La infraestructura vial, sea ésta una vía o calle, puede ser de circulación continua o discontinua. Los sistemas viales de circulación continúa no tienen elementos fijos externos al flujo de tránsito, tales como los semáforos, que produzcan interrupciones en el mismo. Los sistemas viales de circulación discontinua tienen elementos fijos que producen interrupciones periódicas del flujo de tránsito, tales como los semáforos, las señales de alto y otros tipos de regulación.

### **Condiciones prevalecientes**

Es necesario tener en cuenta el carácter probabilístico de la capacidad, por lo que puede ser mayor o menor en un instante dado. A su vez, como la definición misma lo expresa, la capacidad se define para condiciones prevalecientes, que son factores que al variar la modifican. Estos se agrupan en tres tipos generales.

**Condiciones de la infraestructura vial:** Son las características físicas de la vía o calle, el desarrollo de su entorno, las características geométricas (Ancho de carriles y acotamientos, obstrucciones laterales, velocidad de proyecto, restricciones para el rebase y características de los alineamientos), y el tipo de terreno donde se aloja la obra.

**Condiciones del tránsito:** Se refiere a la distribución del tránsito en el tiempo y en el espacio, y a su composición en tipos de vehículos como livianos, camiones, autobuses y vehículos recreativos, según el sistema de clasificación vehicular adoptado.

**Condiciones de control:** Hace referencia a los dispositivos para el control del tránsito,

tales como semáforos y señales restrictivas (Alto, ceda, el paso, no estacionarse, sólo vueltas a la izquierda, etc.).

### **Relación volumen-capacidad**

Una corriente de tránsito funciona aceptablemente bien cuando la magnitud del flujo, circulando a una velocidad razonable, es menor que la capacidad del sistema, en otras palabras, cuando el sistema tiene la suficiente capacidad (Oferta) para alojar el flujo vehicular presente (Demanda), sin demoras excesivas para los usuarios.

Igualmente, se establece que cuando los valores de los flujos vehiculares están muy próximos a los de la capacidad, el tránsito se torna inestable y la congestión se hace presente. Más aún, los flujos vehiculares inferiores a la capacidad, que circulan a velocidades bajas y densidades altas, presentan condiciones de operación forzada, que incluso pueden llegar a detenciones momentáneas del tránsito, produciendo niveles bajos de operación.

Para determinar los niveles de servicio de operación del sistema vial, se determina la relación volumen-capacidad ( $V/C$ ), en la cual se pueden presentar tres posibilidades:

Si la relación es menor a 1 ( $V/C < 1$ ), el sistema vial no está colapsado

Si la relación es igual a 1 ( $V/C = 1$ ), el sistema vial está al límite

Si la relación es mayor a 1 ( $V/C > 1$ ), el sistema vial está saturado

### **2.8.2. Nivel de servicio**

Para medir la calidad del flujo vehicular se usa el concepto de nivel de servicio.

Es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular, y de su percepción por los motoristas y/o pasajeros.

Estas condiciones se describen en términos de factores tales como la velocidad y el

tiempo de recorrido, la libertad de maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial.

El nivel de servicio de intersecciones semáforizadas es definido en términos de la demora, la cual es una medida de la disconformidad del conductor, frustración, consumo de combustible y el tiempo perdido de viaje.



La demora experimentada por el conductor es hecha sobre un número de factores que relacionan el control, la geometría, el tráfico y los incidentes.




De los factores que afectan el nivel de servicio, se distinguen los internos y los externos.

Los internos son aquellos que corresponden a variaciones en la velocidad, en el volumen, en la composición del tránsito, en el porcentaje de movimientos de entrecruzamientos o direccionales, etc. Entre los externos están las características físicas, tales como la anchura de los carriles, la distancia libre lateral, la anchura de acotamientos, las pendientes, etc.

Se ha establecido seis niveles de servicio denominados: A, B, C, D, E y F, que van del mejor al peor. Las condiciones de operación de estos niveles, se ilustran en la tabla 3.

Tabla 3: Nivel de servicio

A	<p>La velocidad de los vehículos es la que elige libremente el conductor.          Cuando un vehículo alcanza a otro más lento puede adelantarlos sin sufrir demoras.          Condiciones de circulación libre y fluida.</p>	
B	<p>La velocidad de los vehículos más rápidos se ve influenciada por otros vehículos.          Pequeñas demoras en ciertos tramos, aunque sin llegar a formarse colas.          Circulación estable a alta velocidad.</p>	

C	<p>La velocidad y la libertad de maniobra se hallan más reducidas, formándose grupos.  Aumento de demoras de adelantamiento.  Formación de colas poco consistentes.  Nivel de circulación estable.</p>	
D	<p>Velocidad reducida y regulada en función de la de los vehículos precedentes.  Formación de colas en puntos localizados.  Dificultad para efectuar adelantamientos.  Condiciones inestables de circulación.</p>	
E	<p>Velocidades de operación bajas y volúmenes próximos a la capacidad máxima.  Formación de largas colas de vehículos.  Imposible efectuar adelantamientos.  Define la capacidad de una carretera.</p>	
F	<p>Formación de largas colas y velocidades de operación muy bajas.  La intensidad sobrepasa la capacidad de la vía.  Circulación intermitente mediante interrupciones y rupturas de flujo.  La circulación se realiza de forma forzada.</p>	

Fuente: Elaboración propia

## 2.9. SemafORIZACIÓN

La semaforización está compuesta por dispositivos eléctricos que tienen como función ordenar y regular el tránsito tanto de vehículos y peatones por medio de luces generalmente de color rojo, amarillo y verde, operados por una unidad de control. Los semáforos pueden clasificarse según su modo operativo en:

**De tiempos fijos:** Su funcionamiento es extremadamente simple, limitándose a cumplir un programa que previamente se le ha introducido.

**De tiempos variables:** Consta de varios programas que se adaptan a las diversas situaciones de tráfico, previstas y estudiadas de antemano.



**Accionados y semi-accionados:** En este tipo de semáforos se produce una regulación continua del tráfico, adaptándose automáticamente a las circunstancias.

**Peatonales:** Llevan un dispositivo en su báculo soporte para que el peatón puede accionarlo, y de esta forma detener los vehículos y efectuar el cruce.

Para este documento es necesario definir los semáforos de tiempo fijo.

### **2.9.1. Semáforos de tiempo fijo**

Los semáforos de tiempo fijo son aquellos que están programados para cambiar sus indicaciones en intervalos de tiempo fijos, se utilizan principalmente en flujos vehiculares estables y se adaptan especialmente cuando se desea sincronizar el funcionamiento de intersecciones adyacentes. Entre las principales ventajas están:

Facilitan la coordinación de semáforos adyacentes

No dependen de los detectores cuando hay una interrupción del tráfico

Son más económicos con respecto a la utilización de otras formas de control

Los términos básicos empleados son:

**Indicación:** Consiste en mostrar una o varias de las luces al mismo tiempo.

**Longitud de ciclo:** Es el tiempo requerido para que el semáforo efectúe una revolución completa de indicaciones de verde, amarillo y rojo.

**Intervalo:** Es el tiempo en el cual no cambian cualquiera de las indicaciones del ciclo.

**Fase:** Es una parte del ciclo en cual uno o más movimientos reciben el derecho al paso durante uno o más intervalos. La fase inicia cuando los vehículos de una arteria pierden el derecho al paso y la ganan los vehículos de la arteria transversal, la fase termina cuando la arteria transversal recibe la indicación amarilla.

**Secuencia de fases:** Orden en el que ocurren las fases del ciclo.

**Intervalo verde:** Es el intervalo de tiempo en cual los vehículos reciben el derecho de paso y la indicación es verde.

**Intervalo de cambio:** Intervalo de tiempo en el cual los vehículos que tenían el verde reciben una indicación amarilla como precaución del cambio de fase.

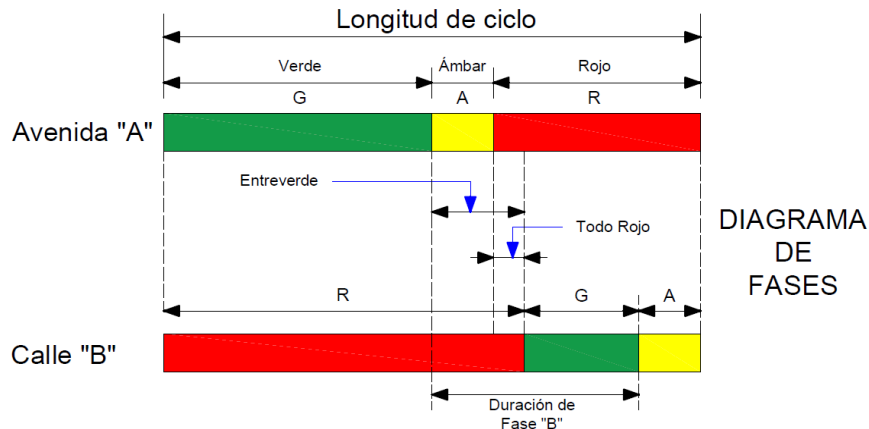
**Intervalo de todo rojo:** Intervalo de tiempo en cual todo el tránsito de la intersección recibe una indicación roja. Es utilizado para despejar la intersección, especialmente para los vehículos que pierden el derecho al paso después del amarillo, para que tengan tiempo de salir antes de que los vehículos que reciban el verde entren en la intersección.

**Intervalo de cambio de fase:** Es la suma del intervalo de cambio y el todo rojo, también conocido como entre-verde.

### Cálculos de los tiempos del semáforo

El objetivo de calcular los tiempos del semáforo es relacionar directamente las fases con los volúmenes de demanda vehicular, de manera que se optimice la eficiencia de la intersección, se garantice la seguridad y se reduzcan las demoras. La figura 3 muestra de forma esquemática los conceptos de longitud del ciclo, intervalos y fases.

Figura 3: Diagrama de fases en una intersección con semáforos



Fuente: R. Cal y Mayor y J. Cárdenas Grisales. Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones

A continuación, se presentan los diversos componentes para el cálculo de los tiempos del semáforo:

**Intervalo de cambio de fase:** La principal función del intervalo de cambio de fase es la de advertir a los conductores un cambio en la asignación del derecho de paso. Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$Y = \left( t + \frac{v}{2a} \right) + \left( \frac{W + L}{v} \right)$$

Donde:

Y = Intervalo de cambio de fase, amarillo más todo rojo (s)

t = Tiempo de percepción-reacción del conductor (t = 1.00 s)

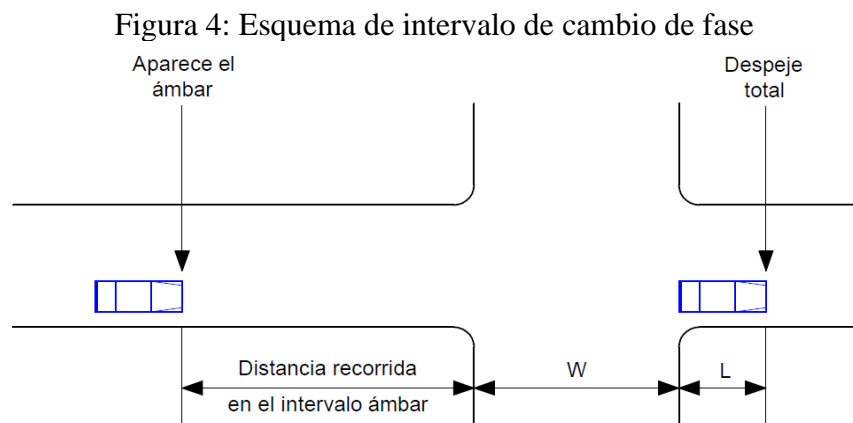
v = Velocidad de aproximación de los vehículos (m/s)

a = Tasa de desaceleración (a = 3.05 m/s<sup>2</sup>)

W = Ancho de la intersección (m)

L = Longitud del vehículo (Vehículo tipo L = 6.10m)

En la anterior ecuación,  $t + \frac{v}{2a}$ , es el intervalo de cambio amarillo donde,  $\frac{v}{2a}$  representa el tiempo necesario para recorrer la distancia de parada con una desaceleración “a” y una velocidad “v” como se muestra en la figura 4, la segunda parte de la ecuación  $\frac{W+L}{v}$ , se asocia al todo rojo y es el tiempo necesario para cruzar la intersección.



Fuente: R. Cal y Mayor y J. Cárdenas Grisales. Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones

**Longitud del ciclo:** Según F.V. Webster, la longitud del ciclo óptimo con el cual se obtiene la demora mínima de los vehículos, se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\phi} Y_i}$$

Donde:

$C_o$  = Tiempo ciclo óptimo (s)

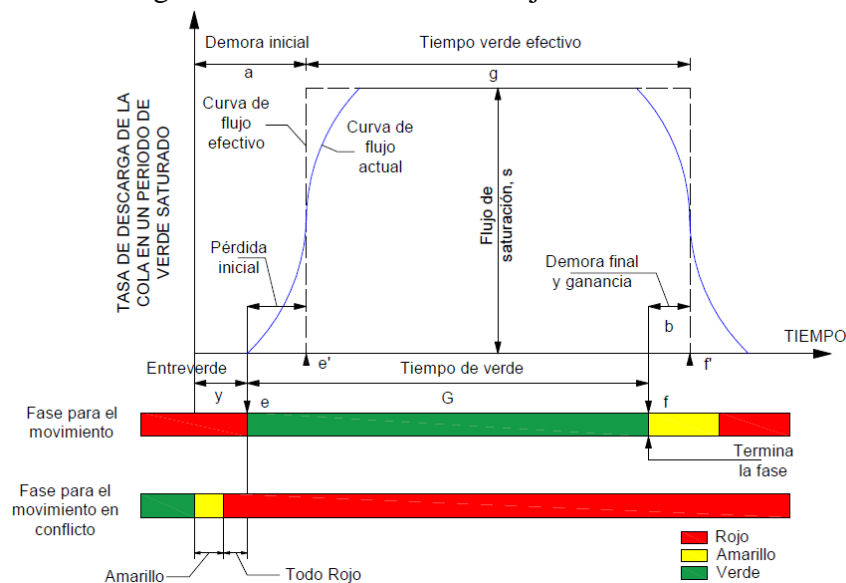
$L$  = Tiempo total perdido por ciclo (s)

$Y_i$  = Valor máximo de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso, movimiento o carril crítico de la fase  $i$

$\phi$  = Número de fase

**Flujo de saturación y tiempo perdido:** La tasa de flujo de saturación representa la tasa máxima de vehículos que cruzan la línea de parada en un ciclo promedio y está reflejada en el área bajo la curva “sg”. La figura 5 muestra un modelo básico de flujo de saturación según el investigador R. Akcelik.

Figura 5: Modelo básico del flujo de saturación



Fuente: Señales de tráfico. Análisis de capacidad y tiempo

**Tiempo perdido por ciclo:** El tiempo total perdido por ciclo se considera como la sumatoria de los intervalos de cambio de fase para cada una de las fases. Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$L = \sum_{i=1}^{\phi} A_i + TR_i$$

Donde:

$L$  = Tiempo total perdido por ciclo (s)

$A_i$  = Intervalo de amarillo (s)

$TR_i$  = Intervalo de todo rojo (s)

$\phi$  = Número de fases

**Asignación de tiempos verdes:** El tiempo verde efectivo total “ $g_T$ ”, por ciclo y para todos los accesos de la intersección se calcula con la siguiente ecuación.

$$g_T = C - L$$

Donde:

$g_T$  = Tiempo verde efectivo total por ciclo disponible para todos los accesos (s)

$C$  = Longitud del ciclo (Redondeando  $C_0$  a los 5 segundos más cercanos) (s)

$L$  = Tiempo total perdido por ciclo (s)

Para obtener una demora mínima en la intersección, el tiempo verde efectivo total por ciclo “ $g_T$ ”, debe repartirse de manera ponderada a cada fase usando las relaciones de flujo máximas y el flujo de saturación de cada fase. El tiempo de verde efectivo para cada fase se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$g_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^{\phi} Y_i} (g_T) = \frac{Y_i}{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{\phi}} (g_T)$$

Donde:

$g_i$  = Tiempo verde efectivo para cada fase (s)

$g_T$  = Tiempo verde efectivo total por ciclo disponible para todos los accesos (s)

$Y_i$  = Valor máximo de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso, movimiento o carril crítico de la fase  $i$

$\phi$  = Número de fases

En la siguiente ecuación, se calcula el tiempo verde real para cada fase  $i$ .

$$G_i = g_i + I_i - A_i - TR_i$$

Donde:

$G_i$  = Tiempo verde real para cada fase (s)

$g_i$  = Tiempo verde efectivo para cada fase (s)

$I_i$  = Tiempo perdido por fase (s)

$A_i$  = Intervalo de amarillo (s)

$TR_i$  = Intervalo de todo rojo (s)

El tiempo perdido por fase  $I_i$ , considera la diferencia entre la demora inicial y la ganancia final, la ganancia final  $ff'$  y la demora inicial (Suma del tiempo de entre-verde  $y_i$  y la pérdida inicial  $ee'$ ), se muestran en la figura 5.

## **2.10. Coordinación semafórica u onda verde**

Es un fenómeno inducido intencionalmente, en el cual una serie de semáforos se coordinan para permitir el flujo continuo del tráfico sobre varias intersecciones en una misma dirección.

Cualquier vehículo que se mueva a lo largo de la ola verde, aproximadamente a una velocidad establecida por los controladores de tráfico, verá una cascada progresiva de luces verdes, y no tendrá que detenerse en las intersecciones. Esto permite mayores volúmenes de tráfico y reduce el ruido y consumo de energía debido a que se requiere menor uso de los frenos y del acelerador. En la práctica, solo un porcentaje de los autos puede usar la ola verde antes de que la banda de tiempo concluya para dar vía a otros flujos de tráfico.

Una de las desventajas de la ola verde es que cuando los conductores más lentos que el promedio llegan al semáforo y encuentran una luz roja, han acumulado una cola de vehículos detrás de ellos, anulando el propósito de la ola verde. Los conductores más veloces también afectan la ola, porque en cierto momento ellos van a encontrar una luz roja y tendrán que esperar a que la siguiente ola llegue.

Existen cuatro sistemas de coordinación de semáforos de tiempo fijo, a saber:

**Sistema simultáneo:** Los semáforos muestran la misma indicación aproximadamente al mismo tiempo, útil para coordinar intersecciones muy cercanas. En tránsito muy intenso puede dar mejores resultados que el sistema progresivo. Las duraciones de los ciclos y sus subdivisiones están controladas por las necesidades de una o dos de las intersecciones más importantes, lo que puede dar lugar a serias fallas en los demás.

**Sistema alternado:** Los semáforos de intersecciones cercanas, por grupo, muestran indicaciones alternadas, a lo largo de una ruta. En el sistema sencillo se tiene indicaciones contrarias en semáforos adyacentes. Los sistemas alternos dobles y triples constan de grupos de dos y tres semáforos que, respectivamente muestran indicaciones contrarias.

**Sistema progresivo simple o limitado:** Este sistema trata de varios semáforos sucesivos, a lo largo de una calle, que dan la indicación de verde de acuerdo con una variación de tiempo que permite, hasta donde es posible, la operación continúa de grupos de vehículos a velocidad fija en “onda verde”. Cada intersección puede tener una división diferente de ciclo, pero dicha división permanece fija. Los desfases, o diferencia de tiempo en que se inician los ciclos entre dos semáforos, pueden tener cualquier valor, no se limitan a la duración de un ciclo o medio ciclo, como en los sistemas anteriormente citados. Los cálculos se hacen por tanteo, y no hay fórmula que relacione el ciclo con la velocidad de cruce y el tiempo de la faja disponible.

**Sistema progresivo flexible:** En este sistema es posible que cada intersección con semáforo varíe automáticamente en varios aspectos. Mediante el uso de controles de intersecciones con caratulas múltiples, se puede establecer varios programas para subdividir el ciclo. Además, es posible cambiar los desfases con la frecuencia deseada, se puede establecer programas de tiempos predeterminados en los controles múltiples para dar preferencia a las circulaciones en las horas de máxima demanda. No obstante que todo el sistema usa un ciclo común, la duración y subdivisión de este pueden variar en función de los cambios de volumen de vehículos.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGIA HCM 2000 (Manual de capacidad de carreteras)**

En el capítulo 16 del manual de capacidad de carreteras 2000 (HCM 2000) se describe la metodología para determinar la capacidad y el nivel de servicio (LOS) de intersecciones señalizadas con semáforos. Incluye un conjunto de medidas del rendimiento que detallan el funcionamiento de la intersección para diversos modos de viaje. A partir de estas medidas se identifican los problemas y se plantean estrategias para mejorarlos.

#### **3.1. Generalidades de la metodología**

##### **Límites del análisis**

La metodología de este capítulo se aplica a intersecciones que incluyan una convergencia de 3 o 4 vías, estas pueden ser de dos calles o carreteras. Los límites de análisis de la intersección no se definen a una distancia fija, por el contrario, son dinámicas y se extienden hacia atrás, desde la intersección a una distancia suficiente para incluir el área de influencia operacional en cada vía de la intersección, la influencia del área debe extenderse por lo menos 76.2 metros detrás de la línea de parada en cada vía de la intersección. En general, la metodología puede ser utilizada para evaluar el desempeño de la mayoría de los flujos de tráfico que viajan a través de una intersección. Sin embargo, no aborda todas las condiciones del tráfico o configuraciones de intersección.

Mediante esta metodología se puede describir 3 tipos de niveles de análisis que son:

**Análisis operacional:** Es una aplicación dirigida hacia condiciones existentes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos controladores. Se aplica principalmente cuando se necesita evaluar y aplicar mejoras de bajo costo y a mediano plazo tales como: Modificaciones en el uso de carriles, cambios en los ciclos semafóricos, etc.



**Análisis de diseño:** En este nivel de análisis considera que el sistema vial nuevo o modificado pueda funcionar a un nivel de servicio deseado tal como B o C, para lograr el efecto se establecen características físicas necesarias tales como: El número mínimo de carriles, pendientes, ancho de carriles, etc.

**Análisis de planificación:** Está encaminado a la planeación de sistemas viales a largo plazo cuando los detalles de la demanda del tránsito son inciertos y es necesario utilizar valores por defecto. Un ejemplo de este nivel de análisis sería el pronosticar cuál será el nivel de servicio de un sistema vial “n” años después.

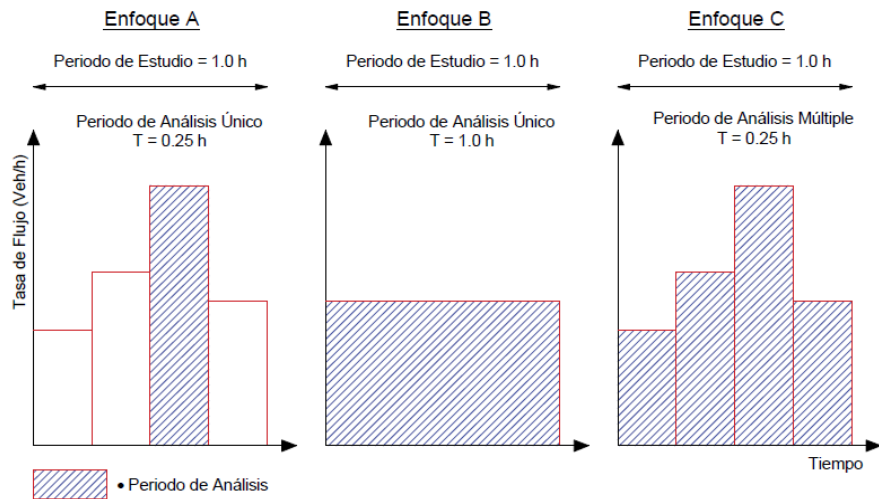
### **Periodo de estudio y periodo de análisis**

El periodo de estudio corresponde al intervalo de tiempo en el cual se evalúa el desempeño de la intersección durante uno o más periodos de análisis consecutivos. Mediante la metodología se establece que las condiciones de tráfico son constantes para todo el periodo de análisis el mismo que varía entre 0.25 y 1 hora.

En la figura 6 se muestran tres enfoques de evaluación, comúnmente el enfoque A es el más utilizado y se fundamenta en la evaluación del periodo máximo de análisis de 15 minutos durante el periodo de estudio de 1 hora. La tasa de flujo horaria (veh/h), se puede obtener dividiendo la demanda de tráfico de 1 hora para el factor horario de máxima demanda, o multiplicando el conteo máximo de tráfico de 15 minutos por 4.

El enfoque B evalúa un periodo de análisis de 1 hora que es igual al periodo de estudio, en este caso no se utiliza el factor horario de máxima demanda por lo cual la tasa de flujo horaria (veh/h), es la misma que la demanda de 1 hora. En este enfoque se supone que la tasa de flujo es constante, eliminando así los picos que pueden subvalorar el retraso real. El enfoque C evalúa un periodo de estudio de 1 hora y lo separa en periodos de análisis de 15 minutos. Este enfoque permite diferenciar la variación de los flujos entre los distintos períodos de análisis y obtener una abstracción más precisa del retardo.

Figura 6: Tres enfoques de evaluación

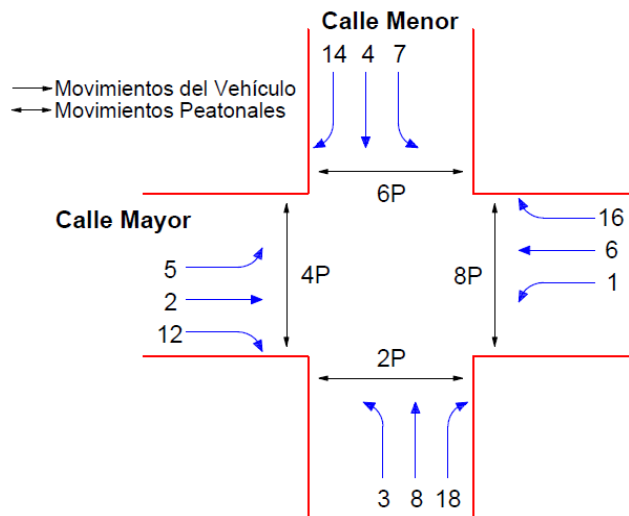


Fuente: Manual de capacidad de carreteras2000

**Modos de viaje:** El modo automóvil evalúa el desempeño de un carril, de un grupo de carriles, de una entrada a la intersección y de toda la intersección. En general, un grupo de carriles puede servir exclusivamente para un movimiento o puede tener dos o más movimientos. Los grupos de movimientos pueden ser de giros exclusivos o grupos de movimientos directos con giros compartidos.

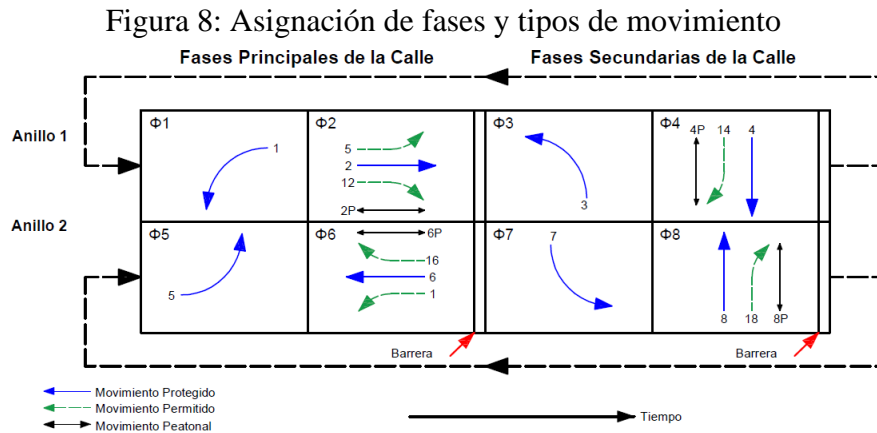
En la figura 7 se muestra la numeración y el tipo movimiento de vehículos y peatones a los cuales se les asigna un número o una combinación de números y letras, la letra P significa un movimiento peatonal.

Figura 7: Movimientos y numeración del tráfico



Fuente: Manual de capacidad de carreteras2000

Las fases semafóricas están distribuidas para uno o más movimientos que no entran en conflicto entre sí, están representadas por el símbolo  $\phi$  junto con un número que es el número de la fase, en la figura 8 se observa las fases y los tipos que movimientos que pueden ser permitidos o protegidos. A los movimientos “protegidos” se les asigna una fase exclusiva ya que son prioritarios y están representados por una línea continua, los movimientos “permitidos” son aquellos que pueden ser completados sólo cuando los movimientos en conflicto ceden el paso, están representados por una línea discontinua.



### 3.2. Criterios de los niveles de servicio (LOS)

Los niveles de servicio están fundamentados en medidas de desempeño de la intersección las cuales son: La relación volumen-capacidad y las demoras experimentadas por los vehículos, las relaciones volumen capacidad y las demoras de control que se muestran en la tabla 4 caracterizan los niveles de servicio. Las demoras cuantifican el tiempo perdido de viaje, la incomodidad del conductor y el consumo de combustible, y la relación volumen-capacidad se traduce al grado de suficiencia de una fase para servir a un grupo de carriles.

Tabla 4: Niveles de servicio LOS

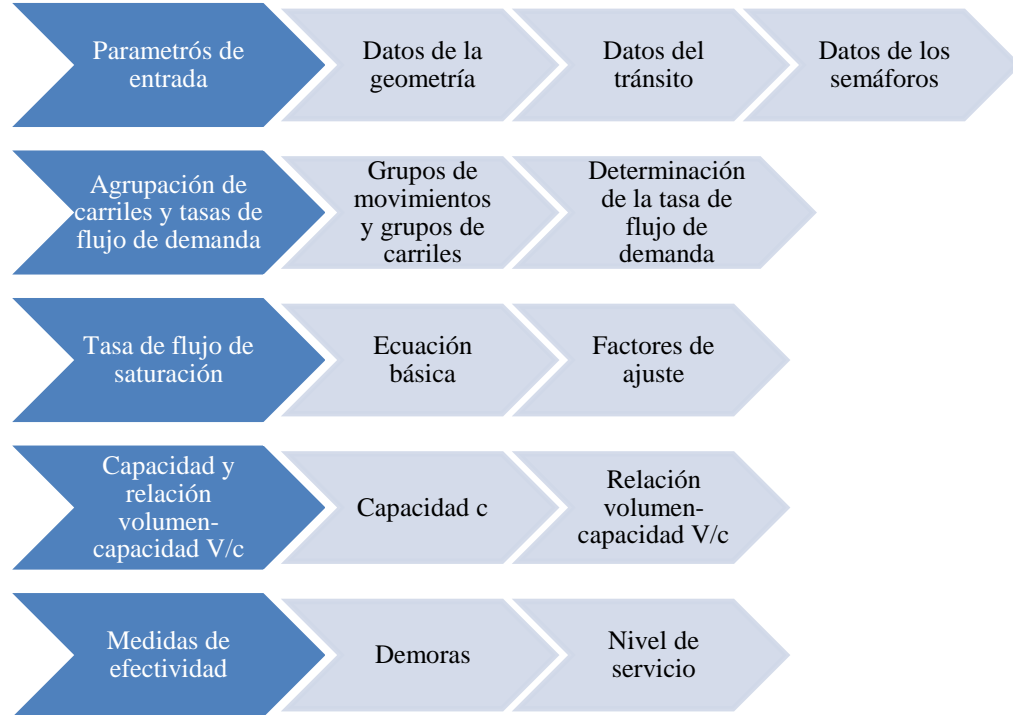
Demoras (seg/veh)	Relación volumen-capacidad	
	$\leq 1.0$	$> 1$
< 10	A	F
> 10 – 20	B	F
> 20 – 35	C	F
> 35 – 55	D	F
> 55 – 80	E	F
> 80	F	F

Fuente: Manual de capacidad de carreteras2000

### 3.3. Metodología de análisis operacional

El análisis operacional es un proceso que requiere de varios parámetros de entrada y de una serie de cálculos básicos cuyo principal objetivo es la obtención de los niveles de servicio, el esquema metodológico a seguir se muestra en la figura 9 y en las siguientes secciones se describe a profundidad el proceso correspondiente.

Figura 9: Esquema metodológico para el análisis de intersecciones con semáforos



Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.1. Parámetros de entrada “modo automóvil”

En la tabla 5 se muestra un resumen de la información de los parámetros de entrada para realizar un análisis operacional de cada grupo de carriles.

Tabla 5: Parámetros de entrada para el analizar los grupos de carriles

Tipo de condición	Parámetro
Geométricas	Tipo de área
	Número de carriles, N
	Ancho promedio de los carriles exclusivos, LT o RT
	Pendiente, i (%)
	Existencia de carriles exclusivos, LT o RT
	Longitud de bahías, LT o RT, Ls (m)
	Estacionamientos

Tránsito	Volumen de demanda por movimiento, V (veh/h)
	Tasa de flujo de saturación base, $S_o$ (Vehículos livianos/h/carril)
	Factor de la hora de máxima demanda, FHMD
	Porcentaje de vehículos pesados, HV (%)
	Tasa de flujo peatonal en el acceso, $v_{ped}$ (Peatones/h)
	Autobuses locales que paran en la intersección, Nb (Autobuses/h)
	Actividades de estacionamiento, Nm (Maniobras/h)
	Tipo de llegadas, AT
	Relación de pelotón, Rp
	Velocidad de aproximación, SA (Km/h)
Semáforos	Longitud del ciclo, C (s)
	Tiempo verde, G (s)
	Amarillo + todo rojo, Y (s)
	Operación accionada o prefijada
	Verde mínimo peatonal, Gp (s)
	Plan de fases

Fuente: Manual de capacidad de carreteras2000

### Condiciones geométricas

**Tipo de área:** El tipo de área en una intersección determina si esta se encuentra dentro de un distrito central de negocios (CBD) o en una zona residencial, se utiliza en áreas donde el flujo de tráfico tiene variaciones significativas durante el día.

**Número de carriles, N:** Es el número de carriles asignado a cada movimiento de tráfico, los carriles que comparten 2 o más movimientos de tráfico se denominan carriles compartidos.

**Ancho promedio de los carriles, W (m):** Es el ancho promedio de los carriles que comparte un grupo de movimientos, el ancho mínimo de un carril es de 2.44 metros, aunque es recomendable usar un ancho estándar de 3.66 metros.

**Pendiente, i (%):** Es la pendiente promedio de cada acceso de la intersección la misma que debe ser medida 30 metros por detrás de la línea de pare y en dirección paralela al flujo. La pendiente es positiva cuando es descendente y negativa cuando es ascendente.

**Existencia de carriles exclusivos, LT o RT:** Se refiere a la existencia de carriles exclusivos de giro a la izquierda o a la derecha en cada acceso de la intersección.

**Longitud de bahías de giro, LT o RT, Ls (m):** Es la longitud de la bahía en la cual los carriles tienen el ancho necesario para que los vehículos se puedan almacenar, el tramo “Ls”, debe ser medido de forma paralela al eje de la vía.

**Estacionamientos:** Es un indicador de la existencia de aparcamientos en un grupo de movimientos a lo largo del bordillo, en una longitud igual a 80 metros detrás de la línea de parada.

### Condiciones del tránsito

**Volumen de demanda por movimiento, V (veh/h):** Es el conteo de vehículos que llegan a cada brazo de la intersección durante el periodo de análisis dividido para la duración del mismo.

**Tasa de flujo de saturación base, So (Vehículos livianos/h/carril):** Es el máximo flujo que puede circular por un carril durante la fase de verde, “So” representa el flujo para un carril con las siguientes condiciones: Ancho de carril de 3.66 m, no existe circulación de vehículos pesados ni autobuses, tiene una pendiente del 0%, no hay la presencia de estacionamientos y no hay vehículos girando. Según el HCM 2000 este valor es de 1900 vehículos livianos/h/carril.

**Factor de la hora de máxima demanda, FHMD:** Se calcula con la siguiente ecuación.

$$FHMD = \frac{V_{60}}{4 * V_{15}}$$

Donde:

FHMD = Factor horario de máxima demanda

$V_{60}$  = Conteo de vehículos durante la hora máxima demanda (veh/h)

$V_{15}$  = Conteo de vehículos durante un periodo pico de 15 minutos (veh/h)

Se usa un único factor horario de máxima demanda para toda la intersección, con el objetivo de crear un panorama en donde no existan volúmenes conflictivos, que sean desproporcionados con los volúmenes reales durante el periodo de análisis de 15

minutos. Los valores para FMHD oscilan entre 0.80 y 0.95.

**Porcentaje de vehículos pesados, HV (%):** Un vehículo pesado es aquel que tiene más de cuatro neumáticos tocando la calzada, en esta clasificación no están los autobuses, el porcentaje de vehículos pesados se obtiene del cociente entre el conteo de vehículos pesados durante el periodo de estudio, para el conteo total de vehículos en el mismo periodo.

**Tasa de flujo peatonal en el acceso, vped (Peatones/h):** La tasa de flujo peatonal es el conteo de peatones que tienen conflicto con vehículos que giran a la derecha en una fase de verde permitida durante un periodo de análisis de 1 hora.

**Autobuses locales que paran en la intersección, Nb (Autobuses/h):** Es el número de autobuses que se detienen y obstaculizan el tráfico de un grupo de movimientos dentro de los 80 metros detrás de la línea de parada. Si existen más de 250 autobuses/h se debe adoptar este valor como el límite práctico. El conteo de buses se divide para la duración del periodo de análisis para obtener una tasa de flujo horaria.

**Actividades de estacionamiento, Nm (Maniobras/h):** Es el conteo de maniobras de estacionamiento dentro de los 80 metros detrás de la línea de parada. Si existen más de 180 maniobras/h se debe adoptar este valor como el límite práctico. El conteo de maniobras se divide para la duración del periodo de análisis para obtener una tasa de flujo horaria.

**Tipo de llegadas, AT y relación de pelotón, Rp:** El tipo de llegadas y la relación de pelotón describen la calidad de la progresión del flujo para un grupo de movimientos. La relación de pelotón se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$R_p = \frac{P}{\left(\frac{g}{C}\right)}$$

Donde:

$R_p$  = Relación de pelotón

P = Proporción de vehículos que llegan durante la indicación verde

G = Tiempo de verde efectivo (s)

C = Longitud del ciclo (s)

Si las variables de la ecuación anterior no se conocen a partir de datos de campo se puede utilizar la tabla 6 para estimar la relación de pelotón utilizando la descripción de los siguientes tipos de llegadas:

Tabla 6: Relación pelotón y tipo de llegadas

Relación de pelotón	Tipo de llegada	Calidad de progresión
0.33	1	Muy mala
0.67	2	Desfavorable
1.00	3	Llegadas aleatorias
1.33	4	Favorables
1.67	5	Muy favorables
2.00	6	Excepcionalmente favorable

Fuente: Manual de capacidad de carreteras2000

**Tipo 1:** Es un pelotón denso con más del 80% del volumen del grupo de movimiento que llegan al inicio del rojo. Para este caso la calidad de la progresión es muy mala.

**Tipo 2:** Es un pelotón moderadamente denso con un volumen entre el 40% a 80% del grupo de movimiento que llegan a la mitad del rojo. Para este caso la calidad de la progresión es desfavorable.

**Tipo 3:** Este tipo de llegadas describe dos condiciones, si los semáforos están coordinados entonces el pelotón contiene menos del 40% del volumen del grupo de movimiento que llegan durante el rojo y parcialmente durante el verde. Si las señales no están coordinadas las llegadas se producen en diferentes puntos de la fase de manera aleatoria.

**Tipo 4:** Es un pelotón moderadamente denso con un volumen entre el 40% a 80% del grupo de movimiento que llegan a la mitad del verde. Para este caso la calidad de la progresión es favorable.



**Tipo 5:** Es un pelotón denso con un volumen de más del 80% del grupo de movimiento que llegan al inicio del verde. Para este caso la calidad de la progresión es muy favorable.

**Tipo 6:** Es un pelotón denso con un volumen de más del 80% del grupo de movimiento que llegan al inicio del verde y se usa para segmentos cortos en un solo sentido. Para este caso la calidad de la progresión es excepcionalmente favorable.

**Velocidad de aproximación, SA (Km/h):** Corresponde al límite de velocidad permitido en los accesos de la intersección, lo que determina la facilidad de maniobras de los conductores y el rendimiento de la intersección.

### **Condiciones de los semáforos**

En esta sección se describen los datos para las condiciones de semáforos enumerados en la tabla 5.

**Longitud del ciclo, C (s):** Es el tiempo transcurrido en el cual el semáforo hace una secuencia completa de todas las indicaciones posibles.

**Tiempo verde, G (s):** Es el intervalo de tiempo en el cual los vehículos tienen el derecho de paso y la indicación mostrada es de color verde.

**Amarillo + todo rojo, Y (s):** El amarillo es el intervalo en el cual los vehículos deben tener precaución ya que se va a pasar a la siguiente fase, el todo rojo es un intervalo de tiempo que va a continuación del amarillo y sirve para despejar totalmente la intersección, con el fin de dar un tiempo adicional a los vehículos que perdieron el derecho al paso de salir, antes de que los vehículos que lo ganan reciban el verde.

**Operación accionada o prefijada:** Se refiere al tipo de operación del semáforo, la misma que puede ser de tiempo fijo o variar en función de las fluctuaciones del tráfico.

**Verde mínimo peatonal,  $G_p$  (s):** En algunos casos existen requerimientos del tiempo de verde mínimo para el cruce de peatones y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$G_p = 3.2 + \frac{L}{S_p} + \left(2.70 * \frac{N_{ped}}{WE}\right) \text{ para } WE > 3.0 \text{ m}$$

$$G_p = 3.2 + \frac{L}{S_p} + (2.70 * N_{ped}) \text{ para } WE \leq 3.0 \text{ m}$$

Donde:

$G_p$  = Tiempo mínimo de verde (s)

$L$  = Longitud del cruce peatonal (m)

$S_p$  = Velocidad media del peatón (1.2 m/s)

$WE$  = Ancho del cruce peatonal (m)

$N_{ped}$  = Número de peatones que cruzan durante un intervalo (Peatones)

**Plan de fases:** Se refiere al número de fases necesarias para garantizar una adecuada circulación vehicular sin generar conflictos en la intersección.

### 3.3.2. Agrupación de carriles y tasas de flujo de demanda

**Grupos de movimientos y grupos de carriles:** Un grupo de carriles es la unión de un conjunto de carriles que a su vez carga un grupo de movimientos de flujos vehiculares. Los grupos de carriles sirven para realizar los cálculos asociados con la metodología mientras que los grupos de movimientos indican los parámetros de entrada.

A continuación, se indican las reglas a seguir para determinar los grupos de movimientos:

Un grupo de movimiento es aquel que es servido por uno o más carriles exclusivos de giro izquierdo o derecho

Un grupo de movimientos diferente a la designación anterior debe ser combinado en un solo grupo de movimientos

Los grupos de carriles resultan de las siguientes posibilidades:


























Carriles exclusivos de giro a la izquierda o a la derecha son considerados como un grupo de carriles

Carriles compartidos deben considerarse como un grupo de carriles

Cualquier carril que no esté considerado en las designaciones anteriores debe considerarse como un grupo de carriles por separado

Las posibles combinaciones de grupos de carriles y grupos de movimientos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7: Grupos de carriles y grupos de movimientos

Numero de Carriles	Movimientos por Carriles	Grupos de Movimientos (MG)	Grupos de Carriles (LG)
1	Izquierda, Defrente, Derecha: 	MG 1: 	LG 1: 
2	Izquierda Exclusiva:  Defrente y Derecha: 	MG 1:  MG 2: 	LG 1:  LG 2: 
2	Izquierda y Defrente:  Defrente y Derecha: 	MG 1:  MG 2: 	LG 1:  LG 2: 
3	Izquierda Exclusiva:  Izquierda Exclusiva:  Defrente:  Defrente:  Defrente y Derecha: 	MG 1:  MG 2: 	LG 1:  LG 2:  LG 3: 

Fuente: Manual de capacidad de carreteras2000

**Tasas de flujo de demanda:** A cada grupo de movimientos se le asigna un flujo vehicular y se realiza un ajuste con el FHMD a través de la siguiente ecuación, posteriormente se realiza una distribución de los flujos vehiculares para cada grupo de carriles en el caso que el carril sea compartido, tomando en cuenta situaciones en las cuales los conductores optan por elegir un carril con menos volumen de tráfico, si el grupo de carriles contiene un solo carril el flujo vehicular será el mismo que se le asignó al grupo de movimientos.

$$V_p = \frac{V}{FHMD}$$

Donde:

$V_p$  = Tasa de flujo durante los 15 minutos más cargados (veh/h)

$V$  = Volumen horario (veh/h)

FHMD = Factor horario de máxima demanda

### 3.3.3. Tasa de flujo de saturación

Para determinar la intensidad de saturación de cada grupo de carril, se aplica la siguiente ecuación según el HCM 2000, utilizando factores que se ajustan a la intensidad base, siendo esta 1900 vehículos/carril/hora, el cual se ajusta a una variedad de condiciones prevalecientes que no son ideales.

$$S_i = S_o * N * f_w * f_{HV} * f_g * f_p * f_{bb} * f_a * f_{LU} * f_{LT} * f_{RT} * f_{Lpb} * f_{Rpb}$$

Donde:

$S_i$  = Tasa de flujo de saturación ajustado del grupo de carriles  $i$  (veh/h/carril)

$S_o$  = Tasa de flujo de saturación base por carril (veh/h/carril)

$N$  = Número de carriles del grupo de carriles

$F_w$  = Factor de ajuste por ancho de carril

$F_{HV}$  = Factor de ajuste por vehículos pesados

$F_g$  = Factor de ajuste por pendiente del acceso

$F_p$  = Factor de ajuste por estacionamiento adyacente al grupo de carriles

$F_{bb}$  = Factor de ajuste por bloqueo de buses

$F_a$  = Factor de ajuste por tipo de área

$F_{LU}$  = Factor de ajuste por utilización del carril

$F_{LT}$  = Factor de ajuste por vueltas a la izquierda

$F_{RT}$  = Factor de ajuste por vueltas a la derecha

$F_{Lpb}$  = Factor de ajuste por peatones para vueltas a la izquierda

$F_{Rpb}$  = Factor de ajuste por peatones para vueltas a la derecha

**Factor de ajuste por ancho de carril:** El factor de ajuste por ancho de carril cuantifica el efecto del ancho del carril en la tasa de flujo de saturación y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$f_w = 1 + \frac{W - 3.6}{9}$$

Donde:

$F_w$  = Factor de ajuste por ancho de carril

$W$  = Ancho del carril (m)

**Factor de ajuste por vehículos pesados:** El factor de ajuste por vehículos pesados establece la diferencia en las capacidades operativas en comparación con los vehículos livianos y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV} (E_T - 1)}$$

Donde:

$F_{HV}$  = Factor de ajuste por vehículos pesados

$P_{HV}$  = Porcentaje de vehículos pesados del grupo

$E_T$  = Número equivalente de vehículos livianos por cada vehículo pesado

( $E_T = 2$  veh/pesados)

**Factor de ajuste por pendiente del acceso:** El factor de ajuste por pendiente del acceso interpreta los efectos de la gradiente en el rendimiento del vehículo y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200}$$

Donde:

$F_g$  = Factor de ajuste por pendiente del acceso

$P_g$  = Pendiente de aproximación del grupo de movimiento. ( $-6 \leq P_g \leq +10$ )

**Factor de ajuste por estacionamiento adyacente al grupo de carriles:** El factor de ajuste por estacionamiento, cuantifica el efecto del bloqueo ocasional de un carril por los vehículos que entran y salen de los estacionamientos. Si el carril adyacente no tiene estacionamientos = 1, caso contrario se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18 * N_m}{3600}}{N} \geq 0.050$$

Donde:

$F_p$  = Factor de ajuste por estacionamiento adyacente al grupo de carriles

$N_m$  = Número de maniobras de estacionamiento por hora

$N$  = Número de carriles del grupo

**Factor de ajuste por bloqueo de buses:** El factor de ajuste por bloqueo de buses, explica el efecto de las paradas de autobuses locales que se detienen para recoger o dejar pasajeros 80 metros por detrás de la línea de parada y se calcula mediante la ecuación.

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_b}{3600}}{N} \geq 0.050$$

Donde:

$F_{bb}$  = Factor de ajuste por bloqueo de buses

$N_b$  = Número de buses que paran en el grupo de carriles por hora

$N$  = Número de carriles del grupo

**Factor de ajuste por tipo de área:** El factor de ajuste por el tipo de área demuestra la ineficiencia de intersecciones dentro de distritos centrales de negocios (CBD) es decir que cuando la intersección está dentro de un “CBD”,  $f_a = 0.90$  caso contrario  $f_a = 1.00$ .

**Factor de ajuste por utilización del carril:** El factor de ajuste por utilización del carril cuantifica el efecto de la distribución no uniforme del tráfico y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$f_{Lu} = \frac{v_g}{N_e v_{g1}}$$

Donde:

$F_{Lu}$  = Factor de ajuste por utilización del carril

$v_g$  = Tasa de flujo de demanda no ajustada del grupo de carril (veh/h)

$v_{g1}$  = Tasa de flujo de demanda no ajustada del carril con el volumen más alto del grupo (veh/h)

$N_e$  = Número de carriles del grupo

**Factor de ajuste por vueltas a la izquierda:** El factor de ajuste por vueltas a la izquierda explica el efecto de la geometría de un giro a la izquierda sobre la tasa de flujo de saturación. Si se trata de un carril exclusivo de giro a la izquierda  $f_{LT} = 0.95$ , caso

contrario si es un carril compartido se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$f_{LT} = \frac{1}{1.0 + 0.05P_{LT}}$$

Donde:

$F_{LT}$  = Factor de ajuste por vueltas a la izquierda

$P_{LT}$  = Proporción de vueltas a la izquierda en el grupo de carriles

**Factor de ajuste por vueltas a la derecha:** El factor de ajuste por vueltas a la derecha establece el efecto de la geometría de un giro a la derecha sobre la tasa de flujo de saturación. Si se trata de un carril exclusivo de giro a la derecha  $f_{RT} = 0.85$ , si es un carril compartido se calcula mediante la primera ecuación a continuación y si es un carril simple se calcula mediante la segunda ecuación que sigue.

$$f_{RT} = 1.0 - 0.15P_{RT}$$

$$f_{RT} = 1.0 - 0.135P_{RT}$$

Donde:

$F_{RT}$  = Factor de ajuste por vueltas a la derecha

$P_{RT}$  = Proporción de vueltas a la derecha en el grupo de carriles

**Factor de ajuste por peatones:** El factor de ajuste para peatones considera las zonas de conflicto en intersecciones donde los usuarios compiten por espacio como se muestra en la figura 10. Las zonas de conflicto consideran los siguientes componentes cualitativos: Intervalo de indicación de la fase de verde, número de carriles de giro que tienen conflicto con peatones, tipos de movimiento (Protegidos, permitidos). Hay cuatro pasos para determinar los factores de ajuste sobre la tasa de flujo de saturación:

**Calcular la ocupación peatonal promedio OCC<sub>pedg</sub>:** La ocupación peatonal promedio ( $OCC_{pedg}$ ) se origina del volumen peatonal  $V_{ped}$ , si la tasa de flujo peatonal  $V_{pedg}$  es medida en campo entonces se puede calcular directamente  $OCC_{pedg}$ , caso contrario el volumen peatonal tiene que ser convertido a una tasa de flujo peatonal usando la siguiente ecuación.

$$V_{pedg} = V_{ped} \left( \frac{C}{g_p} \right) (V_{ped} \leq 5000)$$

Donde:

$V_{pedg}$  = Tasa de flujo peatonal (Peatones/h)

$V_{ped}$  = Volumen peatonal (Peatones/h)

$C$  = Longitud del ciclo (s)

$g_p$  = Tiempo de verde peatonal (s)

Entonces la ocupación peatonal promedio ( $OCC_{pedg}$ ) se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

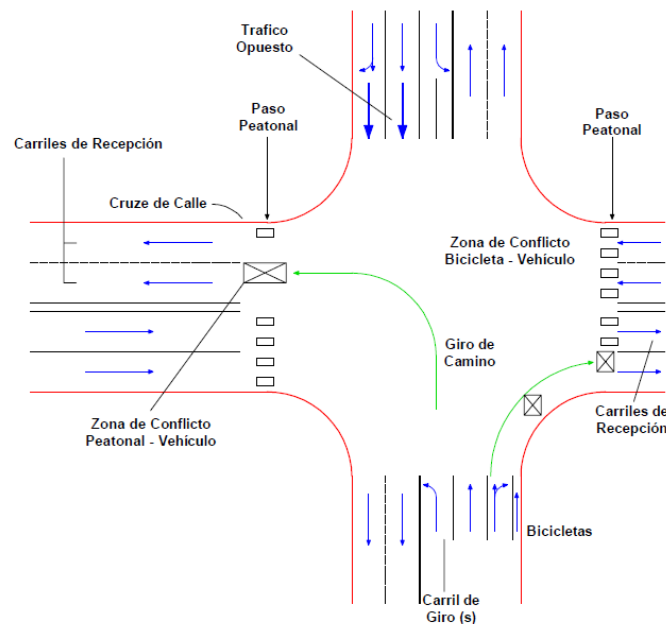
$$OCC_{pedg} = \frac{V_{pedg}}{2000} (V_{pedg} \leq 1000 \text{ y } OCC_{pedg} \leq 0.5)$$

$$OCC_{pedg} = 0.4 + \frac{V_{pedg}}{10000} (1000 \leq V_{pedg} \leq 5000 \text{ y } 0.5 \leq OCC_{pedg} \leq 0.9)$$

Donde:

$OCC_{pedg}$  = Ocupación peatonal promedio.

Figura 10: Zonas de conflicto entre peatones y vehículos



Fuente: Manual de Capacidad de carreteras2000

**Determinar la ocupación relevante de la zona de conflicto  $OCC_r$ :** Si el tráfico de las bicicletas se junta con el de los vehículos que dan vuelta a la derecha antes de la línea de parada este volumen debe ser ignorado y solo debe considerarse el flujo de peatones.

Para los movimientos de vueltas a la derecha sin interrupciones de bicicletas se debe usar la siguiente ecuación.



$$OCC_r = OCC_{pedg}$$

Donde:

$OCC_r$  = Ocupación relevante de la zona en conflicto

Para los movimientos de vueltas a la izquierda se debe comparar el tiempo de despeje de la cola opuesta  $g_p$  con el tiempo de verde peatonal  $g_q$ , si  $g_q \geq g_p$  entonces  $f_{Lpb} = 1.0$  ya que el tiempo de la cola opuesta consume todo el tiempo de verde peatonal, caso contrario la ocupación peatonal luego de que la cola de oposición se despeje  $OCC_{pedu}$  debe ser calculado mediante la siguiente ecuación.

$$OCC_{pedu} = OCC_{pedg} \left[ 1 - 0.5 \left( \frac{g_q}{g_p} \right) \right]$$

Donde:

$OCC_{pedu}$  = Ocupación peatonal luego de que la cola de opuesta se despeje

$OCC_{pedg}$  = Ocupación peatonal promedio

$g_q$  = Tiempo de despeje de la cola opuesta (s)

$g_p$  = Tiempo de verde peatonal (s)

La ocupación relevante de la zona de conflicto  $OCC_r$ , luego de que la cola opuesta se despeje se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$OCC_r = OCC_{pedu} \left[ e^{-\left(\frac{5}{3600}\right)V_o} \right]$$

Donde:

$OCC_r$  = Ocupación relevante de la zona en conflicto

$OCC_{pedu}$  = Ocupación peatonal luego de que la cola de opuesta se despeja

$V_o$  = Disponibilidad de espacios en el trafico opuesto

**Calcular los factores de ajuste de peatones para movimientos de giro,  $A_{pbT}$ :** Para el cálculo de  $A_{pbT}$  cuando el número de carriles de giro es igual a número de carriles de recepción se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_{pbT} = 1 - OCC_r$$

Cuando el número de carriles de giro es menor al número de carriles de cruce los vehículos tendrán que maniobrar alrededor de los peatones y probablemente reducirán su

velocidad, en base a esto  $A_{pbT}$  se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$A_{pbT} = 1 - 0.6(OCC_r)$$

**Determinar los factores de ajuste por peatones para vueltas a la izquierda y a la derecha,  $f_{Lpb}$  y  $f_{Rpb}$ :** Los factores de ajuste  $f_{Lpb}$  y  $f_{Rpb}$  establecen el efecto del flujo peatonal sobre tasa de flujo de saturación para el giro de vehículos, estos factores dependen del volumen de tráfico que usa las fases protegidas. Los factores  $f_{Lpb}$  y  $f_{Rpb}$  se calculan mediante las siguientes ecuaciones respectivamente.

$$f_{Lpb} = 1.0 - P_{LT}(1 - A_{pbT})(1 - P_{LTA})$$

$$f_{Rpb} = 1.0 - P_{RT}(1 - A_{pbT})(1 - P_{RTA})$$

Donde:

$F_{Lpb}$  = Factor de ajuste por peatones para vueltas a la izquierda

$F_{Rpb}$  = Factor de ajuste por peatones para vueltas a la derecha

$P_{LT}$  = Proporción de vueltas a la izquierda en el grupo de carriles

$P_{RT}$  = Proporción de vueltas a la derecha en el grupo de carriles

$P_{LTA}$  = Proporción de vueltas a la izquierda que usan la fase protegida

$P_{RTA}$  = Proporción de vueltas a la derecha que usan la fase protegida

### 3.3.4. Capacidad “c” y relación volumen-capacidad “V/c”

#### Capacidad “c”

La capacidad de las intersecciones está basada en el concepto de intensidad de saturación y la proporción de verde efectivo del grupo de carriles.

La capacidad está dada para los grupos de carriles de un movimiento de tráfico y está definida por la siguiente ecuación que se muestra a continuación:

$$c_i = s_i * \left(\frac{g_i}{C}\right)$$

Donde:

$c_i$  = Capacidad del grupo de carriles i (veh/h)

$s_i$  = Tasa de flujo de saturación ajustado del grupo de carriles  $i$  (veh/h/carril)

$g_i$  = Tiempo de verde efectivo para el grupo de carriles (s)

$C$  = Longitud del ciclo (s)

### Relación volumen-capacidad "V/c"

La relación volumen-capacidad también conocida como grado de saturación  $X_i$  se calcula mediante la siguiente ecuación.

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

Reemplazando la ecuación de capacidad en la anterior ecuación se obtiene la siguiente ecuación.

$$X_i = \frac{\left(\frac{v}{s}\right)_i}{\left(\frac{g_i}{C}\right)}$$

Donde:

$X_i$  = Grado de saturación del grupo de carriles  $i$

$\left(\frac{v}{s}\right)_i$  = Relación de flujo del grupo de carriles  $i$

$\left(\frac{g_i}{C}\right)$  = Relación de verde efectivo del grupo de carriles  $i$

El cálculo del grado de saturación crítico  $X_c$ , generalmente es calculado para valorar globalmente la intersección y considera los grupos de carriles con las relaciones de flujo más altas para cada fase y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$X_c = \left(\frac{C}{C - L}\right) \left[ \sum \left(\frac{v}{s}\right)_{ci} \right]$$

Donde:

$X_c$  = Grado de saturación crítico

$C$  = Longitud del ciclo (s)

$L$  = Tiempo total perdido por ciclo (s)

$\sum \left(\frac{v}{s}\right)_{ci}$  = Sumatoria de todas las relaciones de flujo para los grupos de carriles  $i$

### 3.3.5. Medidas de efectividad

#### Determinación de las demoras

El cálculo de las demoras representa la demora media de control que perciben los vehículos durante el periodo de análisis incluyendo las demoras por sobresaturación del flujo. La demora “d” representa el movimiento de vehículos a velocidades bajas, efectos de la desaceleración y detenciones en los accesos por los dispositivos de control.

La demora “d” para un grupo de carriles se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$d = d_1 + d_2 + d_3$$

Donde:

d = Demora media de control (s/veh)

d<sub>1</sub> = Demora uniforme (s/veh), suponiendo llegas uniformes

d<sub>2</sub> = Demora incremental (s/veh), efecto de llegadas aleatorias y flujo sobresaturado

d<sub>3</sub> = Demora de cola inicial (s/veh)

**Demora uniforme, d<sub>1</sub>:** La demora uniforme ocurre cuando los vehículos llegan uniformemente distribuidos y no existe saturación de flujo en ningún ciclo durante el tiempo de verde efectivo. La demora d<sub>1</sub> se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min \left(1, X\right) \frac{g}{C}\right]}$$

Donde:

d<sub>1</sub> = Demora uniforme (s/veh)

C = Longitud del ciclo (s)

$\left(\frac{g}{C}\right)$  = Relación de verde efectivo del grupo de carriles

X = Grado de saturación del grupo de carriles

**Demora incremental,  $d_2$ :** La demora incremental considera que las llegadas son aleatorias lo cual ocasiona que el flujo se sobresature en algunos ciclos, además supone que no hay una cola inicial al inicio del periodo de análisis. La demora  $d_2$  se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$d_2 = 900T \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right]$$

Donde:

- $d_2$  = Demora incremental (s/veh)
- $X$  = Grado de saturación del grupo de carriles
- $T$  = Duración del periodo de análisis (15 minutos)
- $c$  = Capacidad del grupo de carriles (veh/h)
- $k$  = Factor de demora incremental,  $k = 0.50$  para intersecciones prefijadas
- $I$  = Factor de ajuste por entradas de la intersección corriente arriba

**Factor de ajuste por entradas de la intersección corriente arriba,  $I$ :** El factor de ajuste  $I$ , explica el efecto de llegadas que han sido filtradas por un dispositivo de control corriente arriba de la intersección.

Para intersecciones aisladas (Es decir, a una distancia de 1,60 km de la intersección anterior) el valor de  $I = 1.00$ , en intersecciones no aisladas se puede utilizar la siguiente ecuación o la tabla 8 para estimar en función de  $X_u$ .

$$I = 1.0 - 0.91(X_u)^{2.68} \geq 0.090$$

Donde:

- $I$  = Factor de ajuste por entradas de la intersección corriente arriba
- $X_u$  = Relación volumen-capacidad ponderada para todos los movimientos corriente arriba que contribuyen al volumen del grupo en estudio

Tabla 8: Valores recomendados de  $I$  para cada grupo de carriles

	Grado de saturación en la intersección corriente arriba						
	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	$\geq 1.0$
$I$	0.922	0.858	0.769	0.650	0.500	0.314	0.090

Fuente: Manual de capacidad de carreteras 2000

La relación volumen-capacidad  $X_u$  para intersecciones urbanas se puede aproximar como la relación  $V/c$  del movimiento directo en el grupo de carriles.

**Demora por cola inicial,  $d_3$ :** La demora por cola inicial, se produce por una demanda insatisfecha en el periodo de análisis anterior y no por fluctuaciones que se producen ciclo a ciclo que ocasionalmente exceden su capacidad.

Cuando en un grupo de carriles  $X > 1$ , significa que el siguiente periodo de análisis iniciará con una cola inicial  $Q_b$  que debe observarse al inicio del rojo y que producirá una demora  $d_3$  que se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$d_3 = \frac{1800Q_b(1 + u)t}{cT}$$

Donde:

$Q_b$  = Cola inicial al inicio del periodo  $T$  (veh)

$T$  = Duración del periodo de análisis (0.25 h)

$c$  = Capacidad del grupo de carriles (veh/h)

$u$  = Parámetro de demora

$t$  = Duración de la demanda insatisfecha (h)

Existen cinco casos posibles para evaluar la demora  $d_3$ :

1. Periodo no saturado donde  $Q_b = 0$ , por lo tanto  $d_3 = 0$
2. Periodo sobresaturado donde  $Q_b = 0$ , por lo tanto  $d_3 = 0$
3. Periodo  $T$  es capaz de disipar la cola  $Q_b$ , para que esto ocurra debe cumplirse que  $Q_b + vT < cT$ , donde  $vT$  es la demanda y  $cT$  es la capacidad
4. Al final del periodo  $T$  existe una demanda insatisfecha decreciente  $Q_b$ , para que esto ocurra debe cumplirse que  $vT < cT$
5. Al final del periodo  $T$  existe una demanda insatisfecha creciente  $Q_b$ , para que esto ocurra debe cumplirse que  $vT > cT$

**Para los casos 3, 4, 5:**

**Cálculo de la duración de la demanda insatisfecha, t:** La duración de la demanda insatisfecha se calcula para cada grupo de carriles mediante la siguiente ecuación.

$$t = \min \left\{ T, \frac{Q_b}{c[1 - \min(1, X)]} \right\}$$

Donde:

t = Duración de la demanda insatisfecha (h)

$Q_b$  = Cola inicial al inicio del periodo T (veh)

T = Duración del periodo de análisis (0.25 h)

c = Capacidad del grupo de carriles (veh/h)

X = Grado de saturación del grupo de carriles

**Cálculo del parámetro de demora, u:** El parámetro de demora se calcula para cada grupo de carriles mediante la siguiente ecuación.

$$u = 0 \text{ si } t < T, \quad \text{caso contrario } u = 1 - \frac{cT[1 - \min(1, X)]}{Q_b}$$

Donde:

u = Parámetro de demora

t = Duración de la demanda insatisfecha (h)

$Q_b$  = Cola inicial al inicio del periodo T (veh)

T = Duración del periodo de análisis (0.25 h)

c = Capacidad del grupo de carriles (veh/h)

X = Grado de saturación del grupo de carriles

**Cálculo de las demoras agregadas:** Las demoras agregadas para un acceso se determinan mediante un promedio ponderado de las demoras y los flujos ajustados de cada grupo de carriles.

Se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$d_A = \frac{\sum_{i=1}^A d_i v_i}{\sum_{i=1}^A v_i}$$

Donde:

A = Número de grupos de carriles en el acceso

$d_A$  = Demora en el acceso A (s/veh)

$d_i$  = Demora en el grupo de carriles i (s/veh)

$v_i$  = Volumen ajustado del grupo de carriles i (veh/h)

La demora total de la intersección se determina mediante un promedio ponderado de las demoras y los flujos ajustados de cada acceso.

Se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$d_I = \frac{\sum d_A v_A}{\sum v_A}$$

Donde:

I = Número de accesos de la intersección

$d_I$  = Demora en la intersección I (s/veh)

$d_A$  = Demora en el acceso A (s/veh)

$v_A$  = Volumen ajustado del acceso A (veh/h)

### **Determinación del nivel de servicio**

Como se mencionó anteriormente el nivel de servicio está directamente relacionado con las demoras por vehículo, una vez obtenidas las demoras para cada grupo de carriles, para cada acceso y para la intersección, se determina el nivel de servicio empleando la tabla 4.



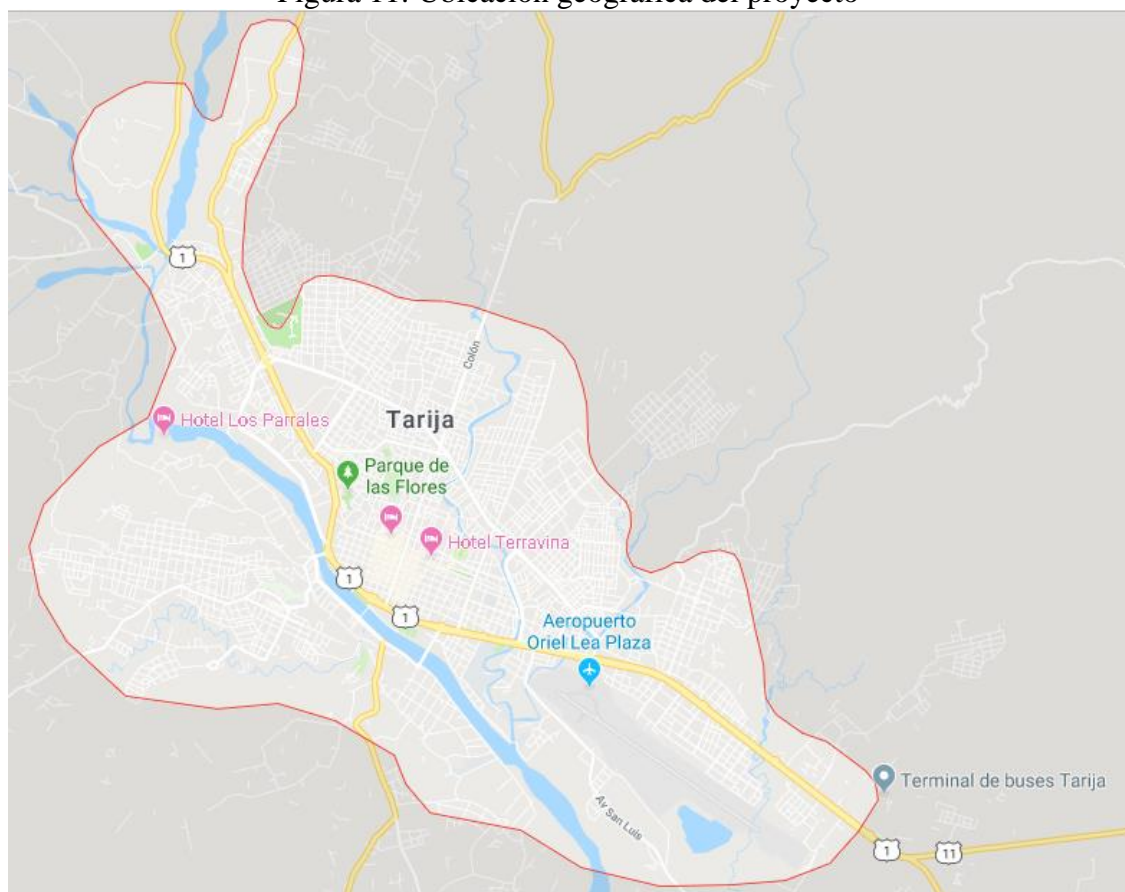
## CAPITULO IV

### PROCEDIMIENTO DE APLICACION

#### 4.1. Ubicación y definición de intersecciones

El área de estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Tarija, departamento del mismo nombre, localizada al sur de Bolivia.

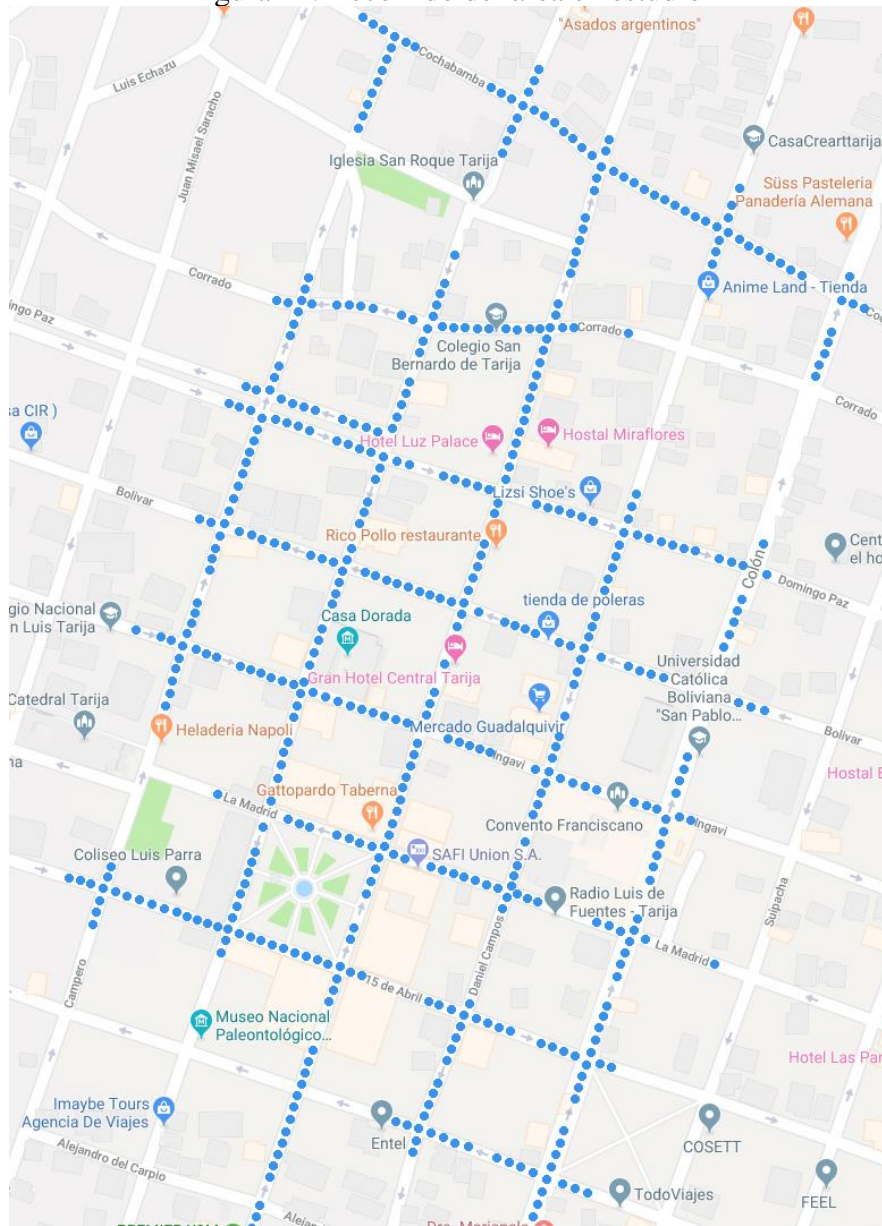
Figura 11: Ubicación geográfica del proyecto



Fuente: Google maps

El centro de la ciudad de Tarija es una zona muy transcurrida de la capital, el área en estudio está comprendida de 34 intersecciones semáforizadas, debido a su ubicación céntrica ha estado expuesto a un progresivo crecimiento inmobiliario y una mayor demanda de servicios públicos y privados, a consecuencia de ello es que presenta un alto índice de tránsito vehicular. En la figura 12, se observa todo el recorrido del área en estudio de la ciudad de Tarija.

Figura 12: Recorrido del área en estudio



Fuente: Elaboración propia

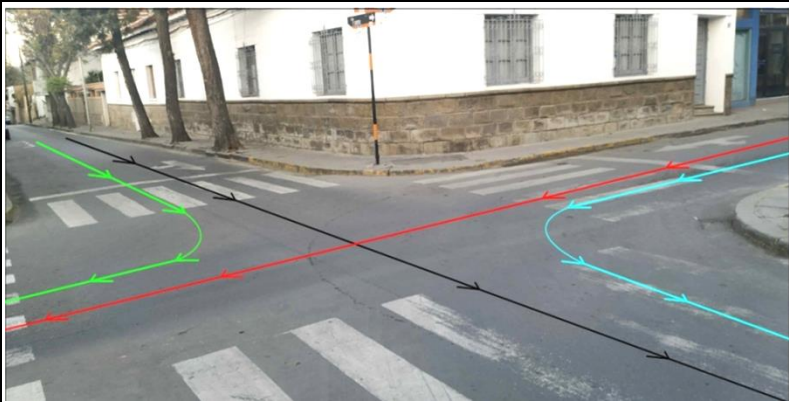

## 4.2. Zonificación

Para el estudio de las intersecciones fue importante reconocer el tipo de edificaciones y el uso del suelo que se le da a la zona, pues a partir de ello se define si son puntos que generan atracción a los usuarios o no. Se identifican distintos usos de suelo en los alrededores de las intersecciones seleccionadas, predominando las zonas de comercio, instituciones públicas y privadas, educación básica (Colegios), educación superior

universitaria y viviendas familiares. Actualmente las intersecciones se encuentran ubicadas en una zona central de comercio (CBD), por lo que se recomienda tomar un factor de ajuste por tipo de área,  $fa = 0.90$ .

#### 4.3. Características de la intersección

Tabla 9: Descripción de las intersecciones en estudio

		Campero	15 de Abril
	Ancho de calzada	5.30	5.30
	Ancho de carril	2.65	2.65
	Pendiente (%)	0.15	-0.15
Estacionamiento	Si	Si	
		Campero	Ingavi
	Ancho de calzada	5.30	5.30
	Ancho de carril	2.65	2.65
	Pendiente (%)	0.20	-0.20
Estacionamiento	Si	Si	

Fuente: Elaboración propia

La descripción de las demás intersecciones en estudio se encuentran en el anexo 1.

#### 4.4. Ficha de aforo vehicular

Nos ayudó a determinar el número de vehículos que transitan en las intersecciones semáforizadas en intervalos de tiempo determinado, y de esta manera poder clasificarlos. El aforo vehicular se realizó por un periodo de una semana por un lapso de 15 horas continuas de 06:00 a 21:00 horas, con intervalos de 15 minutos para cada intersección. Así también, para determinar qué sentido toman los carros se realizó un conteo de giros,

para ello se consideraron las maniobras de giros hacia la derecha y a la izquierda.






Figura 13: Formato para aforo de tráfico vehicular



Aforo vehicular diario																												
Intersección:		Calle principal - Calle secundaria								Sentido:		N - S <input type="checkbox"/>		S - N <input type="checkbox"/>		E - O <input type="checkbox"/>		O - E <input type="checkbox"/>										
Hora de inicio:		06:00 - 21:00								Fecha:																		
Periodo cada 15 min.	Calle principal										Calle secundaria																	
	Veh. livianos		Veh. pesados pasajeros			Veh. pesados carga			Otros		Veh. livianos		Veh. pesados pasajeros			Veh. pesados carga		Otros										
	Automóvil vagoneta	Camioneta	Mimibús	Micro	Camión pequeño	Camión mediano	Moto	Bici	Peñón	Automóvil vagoneta	Camioneta	Mimibús	Micro	Camión pequeño	Camión mediano	Moto	Bici	Peñón										
	→	D	→	D	→	D	→	D	→	D	-	-	-	D	←	D	←	D	←	D	←	D	←	D	←	-	-	-
06:30 - 06:45																												
06:45 - 07:00																												
07:00 - 07:15																												
07:15 - 07:30																												

Fuente: Elaboración propia

Los tipos de vehículos aforados son los siguientes:

Tabla 10: Clase de vehículos considerados en el estudio

Clasificación vehicular	Tipos de vehículos	Clases de vehículos	Esquema vehicular	Definición
Vehículos de pasajeros	Ciclos	Bicicletas		-
		Motocicletas		Ciclomotores de 2,3 o 4 ruedas.
	Livianos	Automóviles		Automoviles de uso particular, destinados al transporte de personas.
		Vagoneta, jeep		
		Camioneta		
Vehículos de carga	Pesados de carga	Camión liviano de carga		Vehiculos destinados al transporte de mercancia, dotados solo de cuatro ruedas es decir, furgonetas y camionetas (Camiones ligeros).
		Camión de carga		Camiones rigidos dedicados al transporte de mercancia, de mas de 4 ruedas, (Eje simple – ruedas dobles).

Vehículos de pasajeros	Pesados de pasajeros	Minibús		Son los vehículos destinados al transporte público, que incluyen los minibuses pequeños (Hasta 15 pasajeros) y microbus mediano (Hasta 25 pasajeros).
		Microbús		

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.5. Análisis de parámetros obtenidos en campo

Luego de tener la información de campo, se realizó el procesamiento de estos datos mediante la herramienta excel 2010, lo cual permitió realizar el análisis que se presenta a continuación.

##### 4.5.1. Análisis de volumen de tráfico vehicular

El aforo vehicular fue realizado para cada uno de los carriles de la intersección y para cada uno de los movimientos presentes, empleando una clasificación vehicular según el tipo y capacidad de carga del vehículo (autos, camionetas, micros y camiones). Además, se han determinado la hora pico dentro de las 15 horas aforadas.

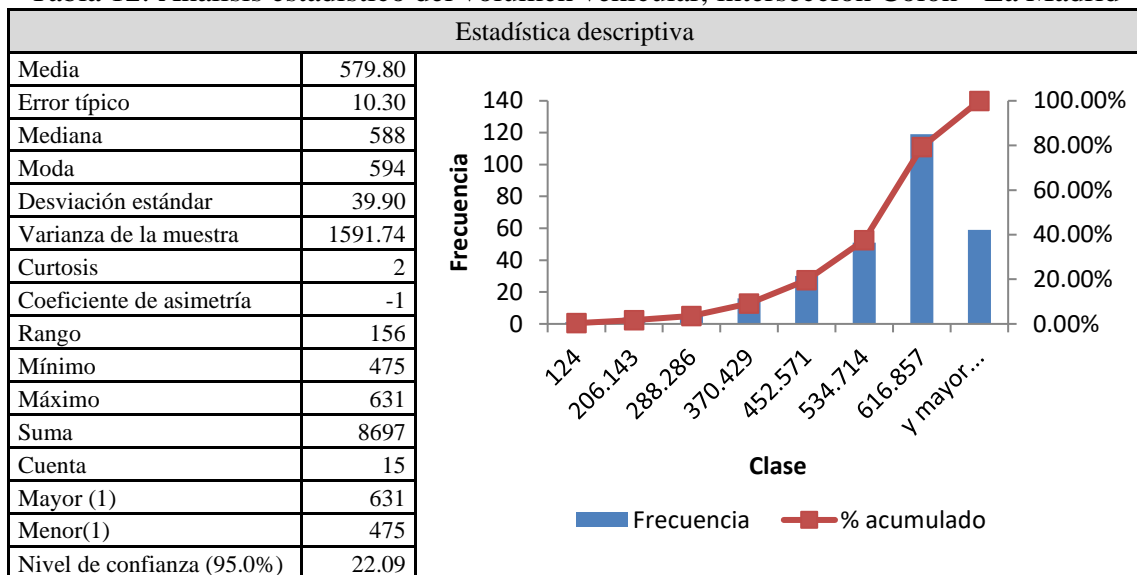
A continuación se muestra, en la siguiente figura el resumen de los flujos vehiculares obtenidos durante toda la semana de estudio para la intersección Colón – La Madrid, en la figura 14 se puede distinguir la hora pico que ocurren durante el día, siendo el pico del día viernes 15/02/19 por el medio día el más acentuado (10:45 – 11:45), por lo tanto, es con esa hora pico con el que se trabajará para los subsecuentes cálculos en el sistema de análisis, para la metodología del HCM 2000.

Para las demás intersecciones en estudio se muestra su variación horaria del volumen total de toda la semana, el volumen vehicular de la hora pico y el volumen promedio en el anexo 2.



Para la simulación con el software PTV Vissim en su versión para estudiante se utilizó el volumen vehicular promedio, ya que los aforos vehiculares se realizaron en distintas fechas para las intersecciones en estudio, se tomaron en cuenta las 3 horas más típicas de cada intersección donde se genera mayor congestión vehicular (De 08:00 – 09:00, de 12:00 – 13:00 y de 16:00 – 17:00) para la intersección Colón – La Madrid, en la tabla 12 se muestra el volumen vehicular promedio para esta intersección.

Tabla 12: Análisis estadístico del volumen vehicular, intersección Colón - La Madrid



Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.2. Análisis de velocidades

Mediante el registro de los tiempos de recorrido en las vías analizadas, se pudo obtener las velocidades correspondientes a cada intersección a lo largo de cada vía. Se registraron cinco tiempos de recorridos en la hora de mayor demanda vehicular para cada vía en estudio.

Tabla 13: Registro de tiempos de recorrido de la calle Sucre

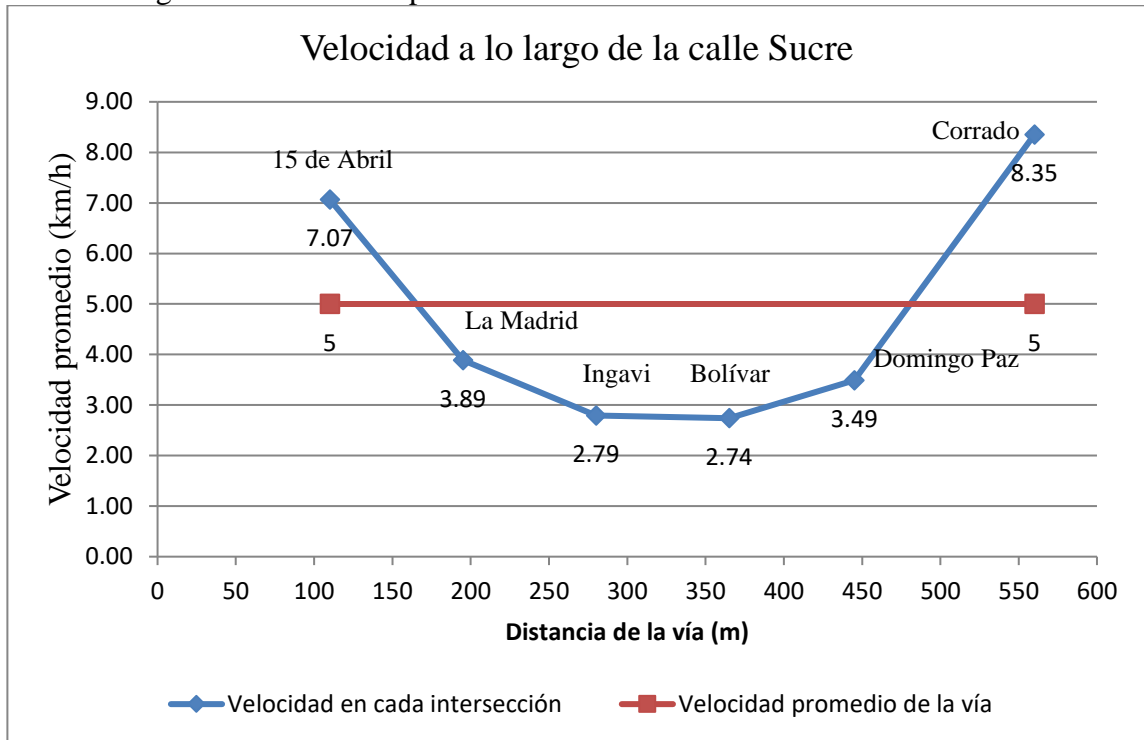
Calle	Velocidad promedio de la vía								
	Intersección	Distancia (m)	Tiempo de recorrido (segundos)					Tiempo promedio	Velocidad Promedio
			Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3	Tiempo 4	Tiempo 5		
Sucre - 15 de Abril	110	30	63	79	61	47	56	7.07	
Sucre - Madrid	85	47	83	110	88	65	79	3.89	
Sucre - Ingavi	85	71	141	139	124	74	110	2.79	
Sucre - Bolívar	85	84	125	143	119	88	112	2.74	
Sucre - Domingo Paz	80	77	87	92	85	72	83	3.49	
Sucre - Corrado	115	29	62	73	49	35	50	8.35	
Tiempo de recorrido en la vía		00:05:38	00:09:21	00:10:36	00:08:46	00:06:21	00:08:08		

Distancia total de la vía	560	Velocidad promedio de toda la vía (Km/h)	4.72
		Velocidad asumida de toda la vía (Km/h)	5.00

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el diagrama de velocidades correspondiente a la calle Sucre con su correspondiente velocidad en cada intersección.

Figura 15: Velocidad promedio de la calle Sucre en cada intersección



Fuente: Elaboración propia

Para las demás vías en estudio se muestra la velocidad promedio en el anexo 3.

#### 4.5.3. Análisis de ciclos semafórico

Mediante el registro de los semáforos en las intersecciones analizadas, se pudo registrarlos ciclos correspondientes a cada intersección así como los tiempos de verde, rojo y ámbar para cada semáforo en dichas vías.

Cabe resaltar que cada semáforo fue registrado independientemente, mínimo por cinco ciclos para efectos de exactitud en los registros en el turno de la mañana y la tarde.



Tabla 14: Registro de ciclo semafórico en la intersección Colón – 15 de abril

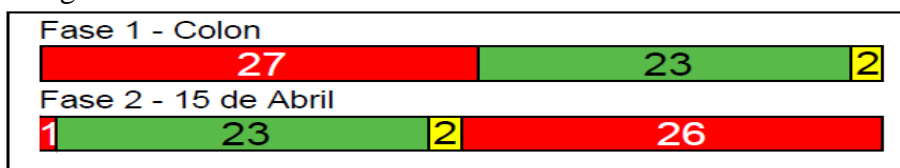
Tiempos de ciclos medidos en las intersecciones en estudio															
Turno		Mañana													
Intersección	Intervalo de fase	Tiempos registrados en campo					Fase		Tiempos registrados en campo					Fase	
		Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Promedio	Asumido	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Promedio	Asumido
Colón 15 de Abril	Rojo	27.1	26.5	26.9	26.9	27.4	26.96	27	27.1	27	26.6	26.8	26.6	26.82	27
	Amarillo	1.6	1.9	1.7	1.9	1.8	1.78	2	1.6	1.9	1.8	1.7	2.3	1.86	2
	Verde	23.3	23	23.3	22.6	23	23.04	23	23.3	23.2	22.9	23	23.1	23.10	23
Turno		Tarde													
Colón 15 de Abril	Rojo	27.2	26.3	26.9	27	27.3	26.94	27	27.2	27	27.1	26.2	26.5	26.80	27
	Amarillo	1.7	1.7	1.9	1.9	1.7	1.78	2	1.7	1.7	1.6	2	2.2	1.84	2
	Verde	23.4	22.8	22.9	23.2	22.9	23.04	23	23.4	23	23	23.2	23	23.12	23

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los diagramas de fase de los semáforos para las intersecciones, se registraron 3 longitudes de ciclos diferentes de 52, 40 y 36 segundos.

El ciclo semafórico para esta intersección es de 52 segundos como se puede observar en la figura. Además, presenta una fase de todo rojo de 2 segundos.

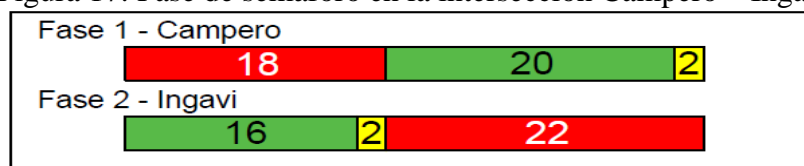
Figura 16: Fase de semáforo en la intersección Colón – 15 de Abril



Fuente: Elaboración propia

El ciclo semafórico para esta intersección es de 40 segundos como se puede observar en la figura. Esta intersección no presenta fase todo rojo.

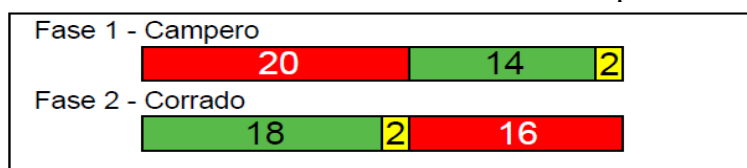
Figura 17: Fase de semáforo en la intersección Campero – Ingavi



Fuente: Elaboración propia

El ciclo semafórico para esta intersección es de 36 segundos como se puede observar en la figura. Esta intersección no presenta fase todo rojo.

Figura 18: Fase de semáforo en la intersección Campero – Corrado



Fuente: Elaboración propia

Para las demás intersecciones en estudio se muestra su longitud de ciclo en el anexo 4.

#### 4.6. Parámetros de entrada

Los datos obtenidos del conteo vehicular y las características geométricas que se determinaron en campo son ingresados a una planilla de entrada (Hoja de excel) para la construcción de un modelo que permite el análisis de estas intersecciones.

Para poder obtener los datos reales de la infraestructura vial se realizó el levantamiento en campo considerando una serie de características las cuales fueron: Sentido de circulación, ancho de calzada, pendiente de calzada (%), número de carriles y ancho de carriles. De igual forma se obtuvo los tiempos en verde ámbar y rojo en cada semáforo.

En las siguientes planillas se muestran todos los parámetros de entrada para la evaluación de la condición actual de cada intersección. También se puede apreciar el croquis de las intersecciones, donde se identifican los movimientos que se puede realizar en cada vía.

Para las demás intersecciones en estudio se muestra su planilla de parámetros de entrada en el anexo 5.

Tabla 15: Planilla de parámetros de entrada de la intersección Colón - 15 de Abril

Planilla de entrada													
Intersección: Calle Colón - Calle 15 de Abril							Fecha: Miércoles 20 / 02 / 2019						
Periodo de análisis: 15:00 - 16:00							Tipo de área: CBD						
Geometría y movimientos													
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen de vehículos directo</li> <li>• Volumen de vehículos a la izquierda</li> </ul> </div> <div style="width: 45%; text-align: center;"> </div> </div>													
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen de vehículos directo</li> <li>• Volumen de vehículos a la derecha</li> </ul>													
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen total de vehículos de la intersección en hora pico (Veh/h). <b>748</b></li> </ul>													
Cuadro de entrada de volúmenes													
Orientación		Este			Oeste			Norte			Sur		
Dirección		Izq	Directo	Derch	Izq	Directo	Derch	Izq	Directo	Derch	Izq	Directo	Derch
Volumen (veh/h) tiempo c/d 15 min.	15:00 - 15:15				20	82	-				-	77	29
	15:15 - 15:30				12	62	-				-	69	24
	15:30 - 15:45				20	70	-				-	56	38
	15:45 - 16:00				15	70	-				-	66	38
Total (veh/h)		V			67	284	0				0	268	129
% Vehículos pesados		VP				0.28						0.76	
Carriles exclusivos		Iz o De				No						No	
Ancho de carril		W				3.00						2.70	
Pendiente %		i				-0.15						0.20	
Número de carriles		N				1						1	
Estacionamientos		-				0						21	
N° de buses paran por hora		N <sub>b</sub>				0						0	
Factor hora pico		FHP				0.899						0.899	
Volumen de bicicletas		V <sub>bic</sub>				4						11	
Volumen peatonal		V <sub>ped</sub>				107						239	
Diagrama													
Tiempo de semáforo	Rojo			seg.	27	seg.			seg.	27	seg.		
	Amarillo			seg.	2	seg.			seg.	2	seg.		
	Verde			seg.	23	seg.			seg.	23	seg.		
Ciclo				seg.	52	seg.			seg.	52	seg.		

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7. Cálculo de los módulos de análisis para la condición actual

Para aplicar la metodología del HCM2000 se han utilizado las planillas propuestas por el manual que se encuentran en el apéndice I. En dichas tablas se utilizaron las ecuaciones que fueron explicadas en el capítulo 3 del presente estudio. Luego, se procedió a utilizar los datos extraídos del periodo de hora pico.

**Módulo de ajuste de volúmenes:** Siguiendo la metodología propuesta por el HCM2000, primero se debe determinar el ajuste de demanda para las intersecciones. En la tabla 16 se han determinado los ajustes por volumen, factor hora pico (FHP) y proporciones de giro; todo esto por cada movimiento.

$$\text{Flujo ajustado (15 de Abril)} = \frac{284 + 67}{0.899} = 390 \frac{\text{Veh}}{\text{h}}$$

$$\text{Flujo ajustado (Colón)} = \frac{268 + 129}{0.899} = 442 \frac{\text{Veh}}{\text{h}}$$

$$\text{Proporción vuelta a la izquierda (15 de Abril)} = \frac{75}{390} = 0.192$$

$$\text{Proporción vuelta a la derecha (Colón)} = \frac{143}{442} = 0.192$$

Tabla 16: Módulo de ajuste de volumen intersección Colón - 15 de Abril

Planilla de análisis y estimación de capacidad en una intersección semáforizada y estimación del nivel de servicio												
Información general												
Descripción del proyecto:						Calle Colón - Calle 15 de Abril						
Módulo de ajuste de volúmenes												
Sentido del flujo vehicular	Este			Oeste			Norte			Sur		
Dirección	Izq	Directo	Derch	Izq	Directo	Derch	Izq	Directo	Derch	Izq	Directo	Derch
Volúmenes: V (veh/h)				67	284	0				0	268	129
Factor hora pico FHP					0.899						0.899	
Flujo ajustado: Vp (veh/h)				75	316	0				0	298	143
Grupo de carriles					Iz-D						D-De	
Número de carriles: N					1						1	
Flujo del grupo: Vi (veh/h)					390						442	
Proporción vuelta a la izq. - derch.: PLT - PRT				0.192	-	0				0	-	0.324

Fuente: Manual de capacidad de carreteras 2000

**Módulo del flujo de saturación:** Los factores necesarios para el cálculo de la tasa de flujo de saturación ajustada son hallados con las ecuaciones que fueron explicadas en el capítulo 3 del presente estudio, para cada tipo de movimiento de cada intersección.

$$S_i = 1900 * 0.933 * 0.997 * 1.001 * 1 * 1 * 0.9 * 1 * 0.99 * 1 * 0.977 * 1$$

$$\text{Flujo de saturación ajustado (15 de Abril)} = 1540 \frac{\text{Veh. carril}}{h}$$

Tabla 17: Módulo de flujo de saturación intersección Colón - 15 de Abril

Módulo del flujo de saturación										
Flujo de saturación base: So (veh/h/carril)					1900					1900
Factor de ajuste por ancho de carril: fw					0.933					0.900
Factor de ajuste por vehículos pesados: fhv					0.997					0.992
Factor de ajuste por pendiente del acceso: fg					1.001					0.999
Factor de ajuste por estacionamiento: fp					1.000					0.795
Factor de ajuste por bloqueo de buses: fbb					1.000					1.000
Factor de ajuste por tipo de área: fa					0.900					0.900
Factor de ajuste por utilización del carril: flu					1.000					1.000
Factor de ajuste por vueltas a la izquierda: flt					0.990					1.000
Factor de ajuste por vueltas a la derecha: frt					1.000					0.950
Factor de ajuste izquierdo peatones: flpb					0.977					1.000
Factor de ajuste derecho peatones: frpb					1.000					1.000
Flujo de saturación ajustado: Si (veh/h/carril)					1540					1152

Fuente: Manual de capacidad de carreteras 2000

**Módulo de análisis de capacidad:** Una vez obtenidos los ajustes de oferta y demanda, siguiendo la metodología que propone el HCM2000, se procede a evaluar la capacidad de las intersecciones estudiadas. Las capacidades para cada grupo de carril se calcularon para luego hallar el grado de saturación X para dichos grupos de carril. También, se ha calculado el grado de saturación correspondiente a cada acceso y a las intersecciones estudiadas.

$$\text{Capacidad} = 1540 * \frac{23}{52} = 681 \frac{\text{Veh}}{h}$$

$$\text{Grado de saturación} = \frac{390}{681} = 0.573$$

Tabla 18: Módulo de análisis de capacidad intersección Colón - 15 de Abril

Módulo de análisis de capacidad										
Número de la fase: φi					2					1
Tipo de fase: P= prefijada, A= accionada					P					P
Flujo del grupo: Vi (veh/h)					390					442
Tiempo verde efectivo: gi (s)					23					23
Relación de verde: gi/C					0.442					0.442
Capacidad del grupo de carriles: ci (veh/h)					681					509
Relación volumen-capacidad: Xi=Vi/ci					0.573					0.868
Relación de flujo: Vi/si					0.253					0.384
Grupo de carriles críticos por fase: X					√					√
Grado de saturación crítico: Xc										0.72

Fuente: Manual de capacidad de carreteras 2000

**Módulo de nivel de servicio:** Una vez obtenidos la capacidad y el grado de saturación, se procede a estimar el nivel de servicio para cada intersección. Para esto, habrá que determinar la demora de control que, según la tabla 4, nos indicará en qué nivel de servicio se encuentran las intersecciones. Las planillas que se presentan a continuación son utilizadas para el cálculo de los tres tipos de demora:  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$ .

$$\text{Demora uniforme } (d_1) = \frac{0.5 * 52 * \left(1 - \frac{23}{52}\right)^2}{1 - \left(0.573 * \frac{23}{52}\right)} = 10.84 \frac{s}{\text{Veh}}$$

Demora incremental ( $d_2$ )

$$900 * 0.25 \left[ (0.573 - 1) + \sqrt{(0.573 - 1)^2 + \frac{8 * 0.5 * 0.795 * 0.573}{681 * 0.25}} \right] = 2.78 \frac{s}{\text{Veh}}$$

$$\text{Demora por cola inicial } (d_3) = \frac{1800 * 6 * (1 + 0) * 0.02}{681 * 0.25} = 1.3 \frac{s}{\text{Veh}}$$

Tabla 19: Demora por cola inicial total, intersección Colón - 15 de Abril

Periodos de cola inicial ( $d_3$ )				Total demora ( $d_3$ )
Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	
1.3	3.6	3.0	2.3	10.20

Fuente: Elaboración propia

Esta planilla al contar con todos los valores de demora también se utilizó para hallar los niveles de servicio para los grupos de carril así como para los accesos y las intersecciones en conjunto.

$$\text{Demora en toda la intersección} = \frac{(23.84 * 390) + (39.00 * 442)}{390 * 442} = 31.89 \frac{s}{\text{Veh}}$$

Tabla 20: Módulo de nivel de servicio, intersección Colón - 15 de Abril

Módulo de nivel de servicio										
Flujo del grupo: $V_i$ (veh/h)					390					442
Capacidad del grupo de carriles: $c_i$ (veh/h)					681					509
Demora uniforme: $d_1$ (s/veh)					10.84					13.13
Demora incremental: $d_2$ (s/veh)					2.78					7.76
Demora por cola inicial: $d_3$ (s/veh)					10.2					18.1
Demora media por control de grupo: $d$ (s/veh)					23.84					39.00
Nivel de servicio del grupo de carriles					C					D
Demora por acceso: $d_A$ (s/veh)					23.84					39.00
Nivel de servicio por acceso					C					D
Demora en toda la intersección (s/veh)	<b>31.89</b>									
Nivel de servicio global de la intersección	<b>C</b>									

Fuente: Manual de capacidad de carreteras 2000

Al finalizar el análisis por el método del HCM 2000 podemos observar que el nivel de servicio general de la intersección Colón – 15 de Abril es “C”.

Para las demás intersecciones en estudio se muestra su planilla de análisis de capacidad y nivel de servicio en el anexo 6.

#### 4.8. Modelo de microsimulación software Vissim

El Vissim es un software utilizado para la simulación microscópica y multimodal de tránsito. En un modelo de simulación microscópica, el ámbito de aplicación del Vissim comprende desde la ingeniería de tránsito, pasando por la planificación de transporte, estudios de movilidad para visualizaciones en 3D. El software calcula las demoras de tiempos reales, según la calibración que se le dé.

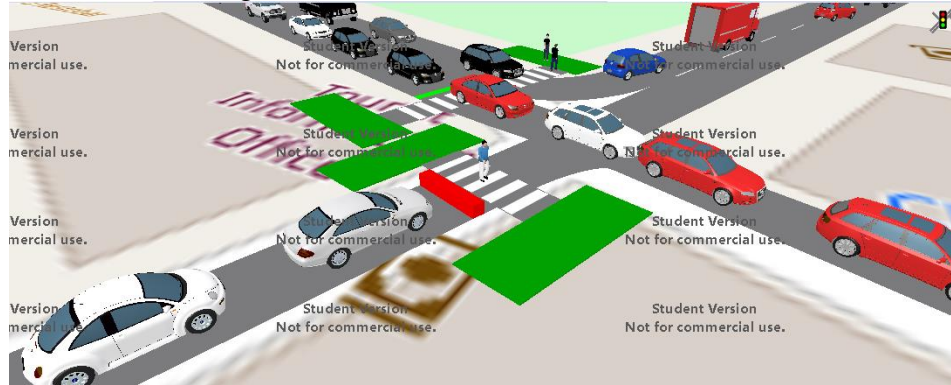
En el modelo que se realizó en Vissim se trazaron tramos y conectores para modelar la geometría de la red en cuestión. Se entiende por tramo, aquel segmento de vialidad que tiene un número de carriles fijo y de ancho constante, al que se le pueden ingresar entradas vehiculares desde su inicio. Los conectores son segmentos de vialidad que unen dos tramos mediante un número constante de carriles. Para que el trazo fuera preciso se utilizó como base el mapa que trae precargado Vissim 2020 figura 19, que trae georeferenciados los mapas y las longitudes son muy precisas. Sobre las calles que vienen trazadas en el mapa se fueron dibujando las vialidades en su punto exacto para tener la precisión deseada.



Fuente: Software PTV Vissim 2020

Por otro lado, en la figura 20 se observa el modelo realizado para el estudio del tráfico de una intersección semáforizada. En ella considera la presencia de movimientos laterales, cambio de carriles y seguimiento vehicular.

Figura 20: Simulación de una intersección

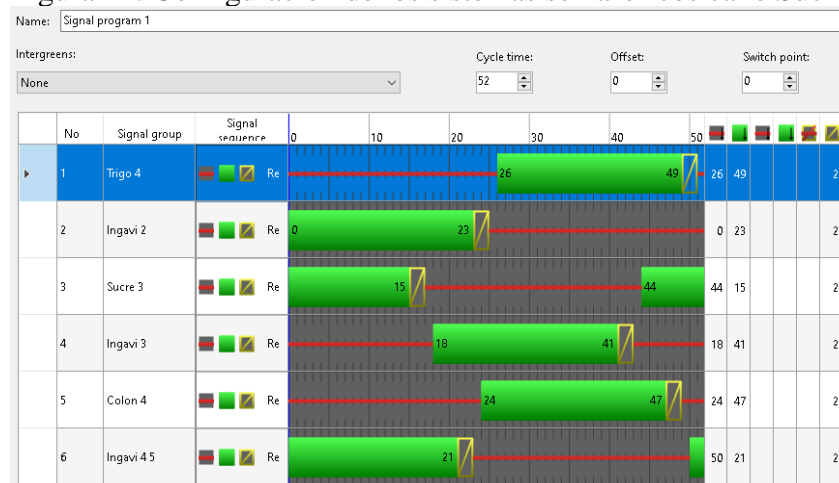


Fuente: Software PTV Vissim 2020

#### 4.8.1. Señales de control

El registro de los tiempos semafóricos fue la base para definir los controladores. Para este caso fue preciso observar con cuidado el comportamiento de los grupos de señales, ya que los semáforos funcionan como líneas de alto se define la programación con base a los grupos de señales. También fue prescindible usar el tiempo de desfase de los semáforos para poder programar a lo largo del tiempo los ciclos semafóricos. A continuación se muestra el diagrama ingresado a Vissim, correspondiente a cada intersección semáforizada para la calle Ingavi.

Figura 21: Configuración de los sistemas semafóricos calle Sucre



Fuente: Software PTV Vissim 2020



#### 4.9. Resultados de intersecciones estudiadas

En este subtítulo se analizará los parámetros necesarios para determinar la calidad del funcionamiento del tráfico en la intersección estudiada y presentar propuestas de mejora, en caso fuera necesario, con el fin de optimizar el diseño vial y verse reflejado en la circulación de los usuarios.

Al realizar la construcción del modelo microscópico, se hizo la calibración correspondiente para que la simulación se asemeje bastante a la realidad, como puede verse los valores de las demoras y el nivel de servicio en la microsimulación son prácticamente similares a los resultados obtenidos por el manual del HCM 2000, sin embargo el modelo aun así presenta ciertas diferencias con la realidad, producto de causas que no pueden modelarse tal cual en una simulación.

En resumen, la tabla 21 presenta el nivel de servicio de todas las intersecciones en el centro de la ciudad de Tarija pertenecientes a la red vial semáforizada. Respecto al nivel de servicio, se tiene que 22 intersecciones se encuentran en el nivel C y 12 en el nivel D.

Tabla 21: Resultados obtenidos por el método HCM 2000 y el software PTV Vissim

N°	Intersección	HCM 2000		PTV Vissim	
		Demora (s/veh)	Nivel de Servicio	Demora (s/veh)	Nivel de Servicio
1	Campero - 15 de Abril	25.22	C	24.84	C
2	Campero - Ingavi	24.73	C	22.96	C
3	Campero - Bolívar	43.92	D	42.88	D
4	Campero - Domingo Paz	26.75	C	25.44	C
5	Campero - Corrado	21.73	C	24.40	C
6	Campero - Cochabamba	28.48	C	27.16	C
7	Gral. Trigo - 15 de Abril	26.31	C	40.01	D
8	Gral. Trigo - La Madrid	21.49	C	50.97	D
9	Gral. Trigo - Ingavi	32.48	C	34.04	C
10	Gral. Trigo - Bolívar	35.90	D	40.85	D
11	Gral. Trigo - Domingo Paz	29.23	C	28.96	C
12	Gral. Trigo - Corrado	43.58	D	34.59	C
13	Gral. Trigo - Cochabamba	34.54	C	26.90	C
14	Sucre - 15 de Abril	33.59	C	33.66	C
15	Sucre - La Madrid	28.92	C	50.20	D
16	Sucre - Ingavi	35.87	D	35.21	D
17	Sucre - Bolívar	39.10	D	54.23	D
18	Sucre - Domingo Paz	41.12	D	45.19	D
19	Sucre - Corrado	37.40	D	39.54	D

20	Sucre - Cochabamba	25.20	C	30.46	C
21	Daniel Campos - Virginio Lema	29.34	C	30.51	C
22	Daniel Campos - 15 de Abril	30.89	C	34.80	C
23	Daniel Campos - La Madrid	24.82	C	23.54	C
24	Daniel Campos - Ingavi	36.85	D	43.74	D
25	Daniel Campos - Bolívar	45.26	D	46.83	D
26	Daniel Campos - Domingo Paz	30.98	C	29.22	C
27	Daniel Campos - Cochabamba	22.89	C	28.90	C
28	Colón - Virginio Lema	30.73	C	30.46	C
29	Colón - 15 de Abril	31.89	C	28.88	C
30	Colón - La Madrid	34.86	C	31.23	C
31	Colón - Ingavi	39.57	D	38.40	D
32	Colón - Bolívar	41.34	D	44.86	D
33	Colón - Domingo Paz	36.60	D	37.04	D
34	Colón - Cochabamba	29.59	C	21.24	C

Fuente: Elaboración propia

#### 4.10. Propuestas de mejoras

Al haber realizado el análisis de la red, y con el propósito de obtener una mejora en su funcionamiento se presentarán dos propuestas, las cuales puedan ser tomadas en cuenta según la preferencia y comodidad.

Como primera alternativa se pretende hacer un cambio de los ciclos actuales de los semáforos (optimizarlo), las fases semafóricas y coordinación, la segunda alternativa es el incremento de la infraestructura vial reduciendo un carril de estacionamiento, en las vías donde se cuente con el ancho de calzada suficiente para un buen funcionamiento de la vía.

A continuación se presenta el nuevo ciclo de semáforo en la figura 22, el cual pudo ser hallado mediante el uso de la ecuación Webster's que provee el ciclo semafórico óptimo.

##### 4.10.1. Análisis del ciclo semafórico óptimo

Con la ayuda de las siguientes ecuaciones se podrá obtener la nueva longitud de ciclo y los tiempos de distribución como se indicó en el capítulo 2 en la sección 2.9.1., esto se aplicara a las intersecciones de entrada y de salida a la zona central de la ciudad como la intersección Colón – Bolívar.

Cálculo de los intervalos de amarillo y todo rojo.

Intervalo amarillo
Intervalo todo rojo

Intervalo de cambio de fase  $\longrightarrow Y = \left(t + \frac{v}{2a}\right) + \left(\frac{W + L}{v}\right)$

$$Y = \left(1 + \frac{8.333}{2 * 3.05}\right) + \left(\frac{5.30 + 6.50}{8.333}\right) = (2.37) + (1.42)$$

Se mostrara tres valores de intervalos de cambio de fase correspondiente a velocidades de 30 km/h 20km/h y 10 km/h.

Tabla 22: Intervalos de cambio de fases en la intersección Colón - Bolívar

Intervalo de cambio de fases			
Velocidad (Km/h)	Amarillo	Todo Rojo	Y (seg)
30	2	1	3.79
20	2	2	4.03
10	1	4	5.71

Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente en nuestro diseño se tomara los siguientes tiempos, pertenecientes a la velocidad de 30 km/h, ya que presentan un intervalo de cambio de fases más adecuado a las necesidades de nuestra situación actual.

Intervalo amarillo	Intervalo todo rojo	Intervalo de cambio de fase
2 segundos	1 segundo	3 segundos

Por lo tanto remplazando en la siguiente ecuación.

$$L = \sum_{i=1}^{\phi} A_i + TR_i \quad ; \quad L = 2 + 2 + 1 + 1 = 6$$

En consecuencia el intervalo de cambio de fase es igual a 6 segundos.

El valor “y” en cada aproximación es igual a la relación entre el flujo existente en la misma dividido para su flujo de saturación.

$$y = \frac{V}{S} \quad ; \quad y_1 = \frac{343}{1213} = 0.283 \quad ; \quad y_2 = \frac{387}{1228} = 0.315$$

Se ha investigado la relación entre la demora del tráfico y los tiempos óptimos de los ciclos de los semáforos. Y se ha determinado que el tiempo de ciclo óptimo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\phi} Y_i} = \frac{1.5 * 6 + 5}{1 - (0.336 + 0.260)} = 34.82 \text{ seg}$$

Tiempo de ciclo adoptado 35 segundos.

Una vez obtenido el valor de  $y_{total}$ , calcularemos el tiempo de ciclo óptimo para cada una de las intersecciones donde se realizara la modificación de longitud de ciclo, con el rango de velocidades recomendadas, se obtiene los resultados en la tabla 23:

Tabla 23: Tiempos de ciclo óptimo para las seis intersecciones modificadas

Intersecciones	Ciclo óptimo (seg)		
	30 km/h	20 km/h	10 km/h
Colón – Bolívar	35	45	60
Daniel Campos - Bolívar	35	45	60
Sucre - Bolívar	35	35	40
Gral. Trigo – Bolívar	35	35	40
Colón – Domingo Paz	40	70	85
Gral. Trigo – La Madrid	35	35	35

Fuente: Elaboración propia

El tiempo efectivo de verde es aquel tiempo que es utilizado efectivamente por los movimientos de los vehículos. El tiempo de verde efectivo total  $g_T$ , disponible por ciclo para todos los accesos de la intersección está dado por:

$$g_T = C - L = 35 - 6 = 29 \text{ seg}$$

Para obtener una demora total mínima en la intersección, el tiempo de verde efectivo total  $g_T$  debe distribuirse entre las diferentes fases en proporción a sus valores de “ $y_i$ ”, así:

$$g_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^{\phi} Y_i} (g_T) \quad ; \quad g_1 = \frac{0.283}{0.283 + 0.315} * 29 = 13.715 \text{ seg}$$

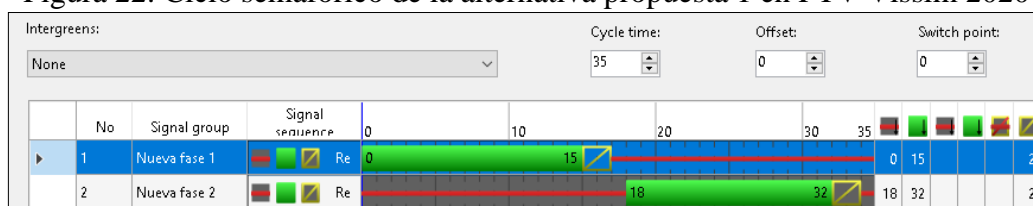
Como ya se tienen los valores del ciclo completo, luz ámbar y luz verde, podemos encontrar el tiempo de luz roja el cual será igual a:

Tabla 24: Nueva distribución de los tiempos o fases de la longitud de ciclo, intersección Colón - Bolívar

	Verde	Amarillo	Rojo
Tiempos de fases 1 calculados (seg)	13.715	2	19.285
Tiempos de fases1 adoptado (seg)	14	2	19
Tiempos de fases 2 calculados (seg)	15.285	2	17.715
Tiempos de fases 2 adoptado (seg)	15	2	18

Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Ciclo semafórico de la alternativa propuesta 1 en PTV Vissim 2020



Fuente: Elaboración propia

Utilizando el mismo procedimiento se realiza para las demás intersecciones seleccionadas para una nueva distribución de los tiempos de ciclo, se muestran en el anexo 7.

#### 4.10.2. Análisis de volumen vehicular por hora

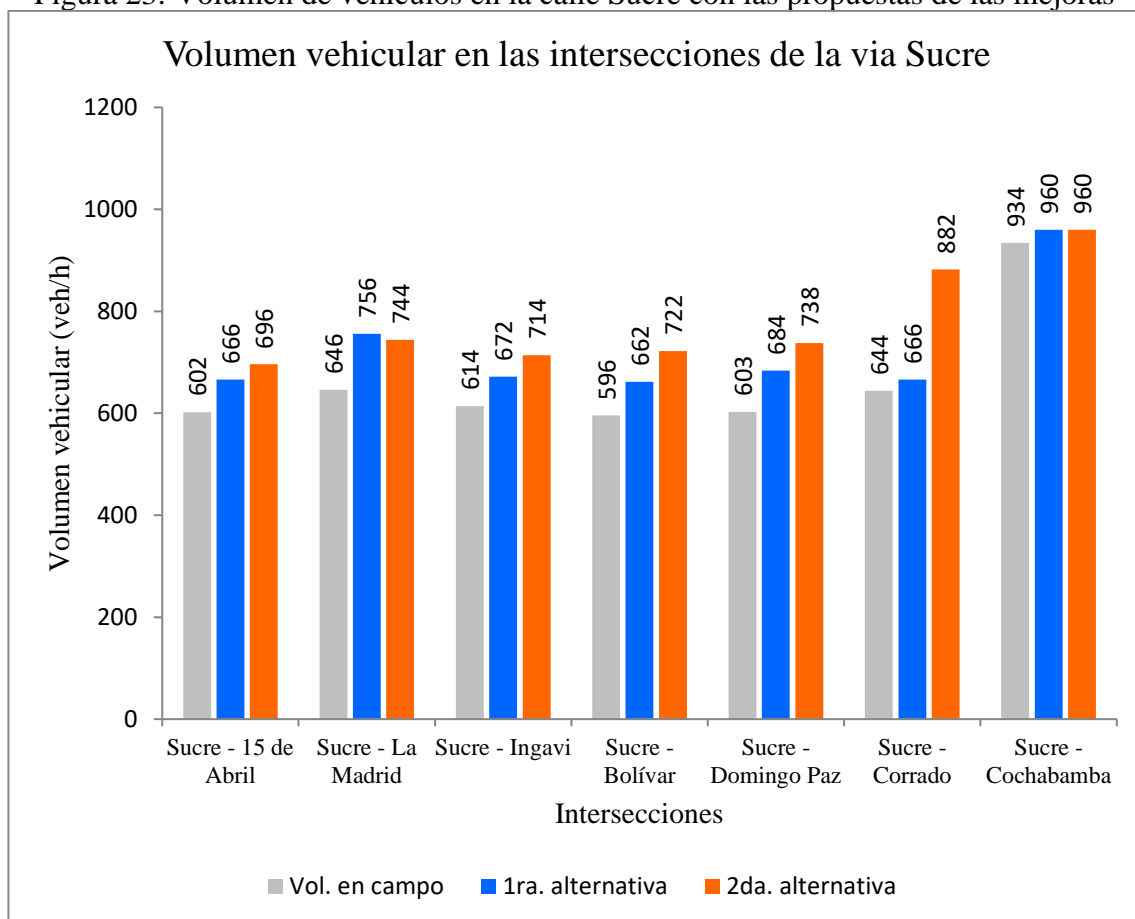
Este episodio muestra el análisis de los volúmenes vehiculares obtenidos del modelo de simulación, se puede apreciar que la mayoría de las intersecciones incrementaron su volumen con las mejoras propuestas, ya que se logró ordenar el ingreso y salida del centro de la ciudad reduciendo la duración de ciclo en estos puntos, en la siguiente tabla se presenta los resultados que se obtuvieron en la modelación de estas mejoras. Se realizó el análisis operacional de la calle Sucre.

Tabla 25: Volúmenes producto de las mejoras

Intersección	Volumen actual (Veh/h)	Propuestas de mejora simulación		% de incremento vehicular	
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 1	Alternativa 2
Sucre - 15 de Abril	602	666	696	11	16
Sucre - La Madrid	646	756	744	17	15
Sucre - Ingavi	614	672	714	9	16
Sucre - Bolívar	596	662	722	11	21
Sucre - Domingo Paz	603	684	738	13	22
Sucre - Corrado	644	666	882	3	37
Sucre - Cochabamba	934	960	960	3	3
Incrementó promedio de la vía Sucre				10	19

Fuente: Elaboración propia

Figura 23: Volumen de vehículos en la calle Sucre con las propuestas de las mejoras



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los volúmenes con las propuestas de las mejoras para las demás vías se pueden apreciar en el anexo 8.

#### 4.10.3. Longitudes de colas

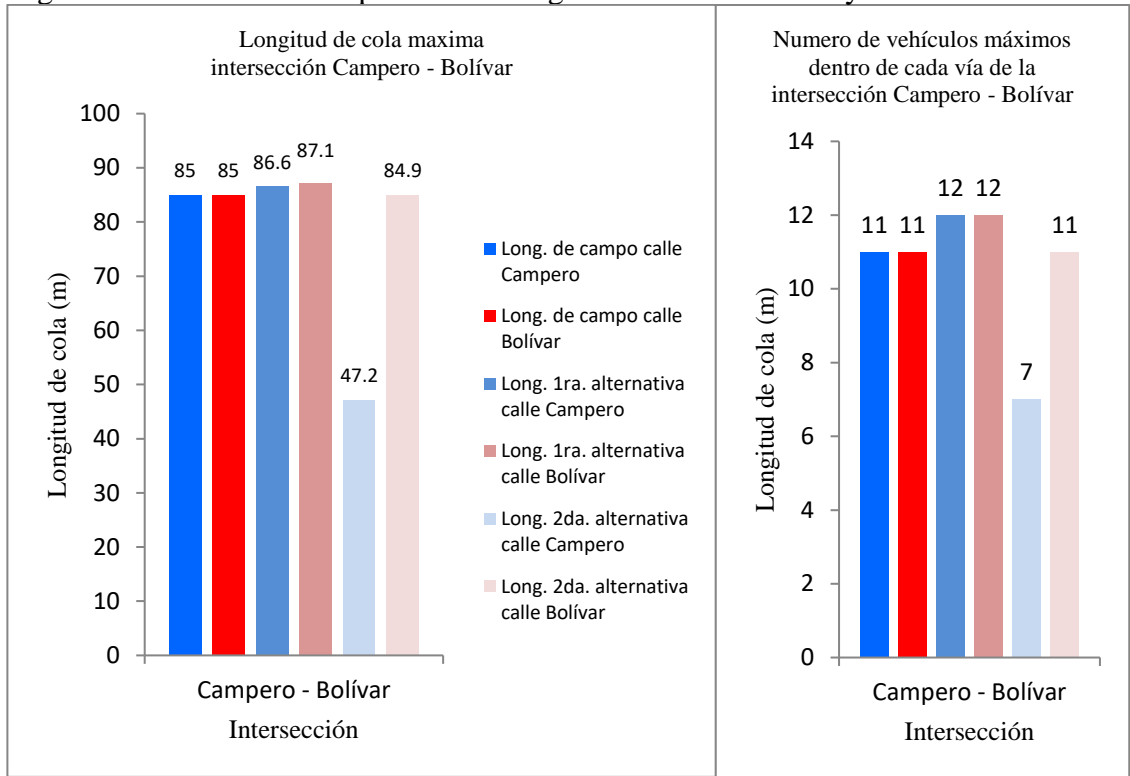
En las mediciones de las longitudes de colas se pudo verificar que las longitudes de colas máximas se mantienen casi iguales ya que las longitudes en las calles son cortas y estas se llegan a ocupar completamente en ciertos momentos de la hora pico, como se puede observar en la siguiente figura.

Tabla 26: Longitud de cola máxima, intersección Campero - Bolívar

Intersección	Longitud de cola máxima (m)					
	Longitud de campo		Long. 1ra. alternativa		Long. 2da. alternativa	
	Campero	Bolívar	Campero	Bolívar	Campero	Bolívar
Campero - Bolívar	85	85	86.57	87.09	86.71	87.16

Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Evaluación comparativa de longitud máxima de colas y número de vehículos



Fuente: Elaboración propia

La capacidad de vehículos que ingresan a la vía son 11 vehículos como máximo y los demás vehículos solo podrán proseguir su marcha cuando haya espacio suficiente para que el vehículo pase completamente la intersección sin obstruirla aunque la mayoría de los conductores no respeten esto, ya que este tipo de imprudencias por parte de ellos se ven en la mayoría de las intersecciones del área central de la ciudad de Tarija.

La evaluación comparativa de las demás intersecciones se puede ver en el anexo 9.

#### 4.10.4. Comparación de resultados

Con respecto a las propuestas elegidas para el mejoramiento del nivel de servicio en las intersecciones en estudio, a continuación de muestra la comparación de las demoras y nivel de servicio de la situación existente con las propuestas de mejora, esta comparación se realizó para cada intersección como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27: Análisis y comparación de resultados de alternativas

N°	Intersección	Software PTV Vissim		1ra. alternativa		2da. alternativa		Observación	
		Demora	Nivel de servicio	Demora	Nivel de servicio	Demora	Nivel de servicio	1ra. alternativa	2da. alternativa
1	Campero - 15 de Abril	24.84	C	25.16	C	23.40	C	Se mantiene	Se mantiene
2	Campero - Ingavi	22.96	C	23.79	C	15.75	B	Se mantiene	Mejóro
3	Campero - Bolívar	42.88	D	41.65	D	12.39	B	Se mantiene	Mejóro
4	Campero - Domingo Paz	25.44	C	23.67	C	18.84	B	Se mantiene	Mejóro
5	Campero - Corrado	24.40	C	24.02	C	18.22	B	Se mantiene	Mejóro
6	Campero - Cochabamba	27.16	C	22.05	C	22.05	C	Mejóro	Mejóro
7	Gral. Trigo - 15 de Abril	40.01	D	37.93	D	26.07	C	Se mantiene	Mejóro
8	Gral. Trigo - La Madrid	50.97	D	39.54	D	42.00	D	Mejóro	Mejóro
9	Gral. Trigo - Ingavi	34.04	C	31.43	C	28.59	C	Mejóro	Mejóro
10	Gral. Trigo - Bolívar	40.85	D	36.13	D	28.57	C	Mejóro	Mejóro
11	Gral. Trigo - Domingo Paz	28.96	C	23.99	C	18.00	B	Mejóro	Mejóro
12	Gral. Trigo - Corrado	34.59	C	33.29	C	17.36	B	Se mantiene	Mejóro
13	Gral. Trigo - Cochabamba	26.90	C	24.54	C	24.54	C	Se mantiene	Se mantiene
14	Sucre - 15 de Abril	33.66	C	37.48	D	15.75	B	Empeoró	Mejóro
15	Sucre - La Madrid	50.20	D	34.35	C	31.90	C	Mejóro	Mejóro
16	Sucre - Ingavi	35.21	D	36.45	D	39.00	D	Se mantiene	Se mantiene
17	Sucre - Bolívar	54.23	D	51.49	D	43.39	D	Se mantiene	Mejóro
18	Sucre - Domingo Paz	45.19	D	37.95	D	33.81	C	Mejóro	Mejóro
19	Sucre - Corrado	39.54	D	38.78	D	12.87	B	Se mantiene	Mejóro
20	Sucre - Cochabamba	30.46	C	30.65	C	30.65	C	Se mantiene	Se mantiene
21	Daniel Campos - Virginio Lema	30.51	C	31.55	C	26.01	C	Se mantiene	Se mantiene
22	Daniel Campos - 15 de Abril	34.80	C	28.82	C	21.22	C	Mejóro	Mejóro
23	Daniel Campos - La Madrid	23.54	C	54.17	D	43.95	D	Empeoró	Empeoró
24	Daniel Campos - Ingavi	43.74	D	40.30	D	39.25	D	Mejóro	Mejóro
25	Daniel Campos - Bolívar	46.83	D	34.37	C	38.85	D	Mejóro	Mejóro
26	Daniel Campos - Domingo Paz	29.22	C	24.96	C	26.77	C	Mejóro	Se mantiene
27	Daniel Campos - Cochabamba	28.90	C	26.76	C	26.76	C	Se mantiene	Se mantiene
28	Colón - Virginio Lema	30.46	C	31.32	C	30.02	C	Se mantiene	Se mantiene
29	Colón - 15 de Abril	28.88	C	25.36	C	19.45	B	Mejóro	Mejóro
30	Colón - La Madrid	31.23	C	34.85	C	14.32	B	Se mantiene	Mejóro
31	Colón - Ingavi	38.40	D	36.20	D	21.97	C	Se mantiene	Mejóro
32	Colón - Bolívar	44.86	D	41.44	D	24.27	C	Mejóro	Mejóro
33	Colón - Domingo Paz	37.04	D	29.43	C	22.63	C	Mejóro	Mejóro
34	Colón - Cochabamba	21.24	C	21.50	C	21.50	C	Se mantiene	Se mantiene

Fuente: Elaboración propia

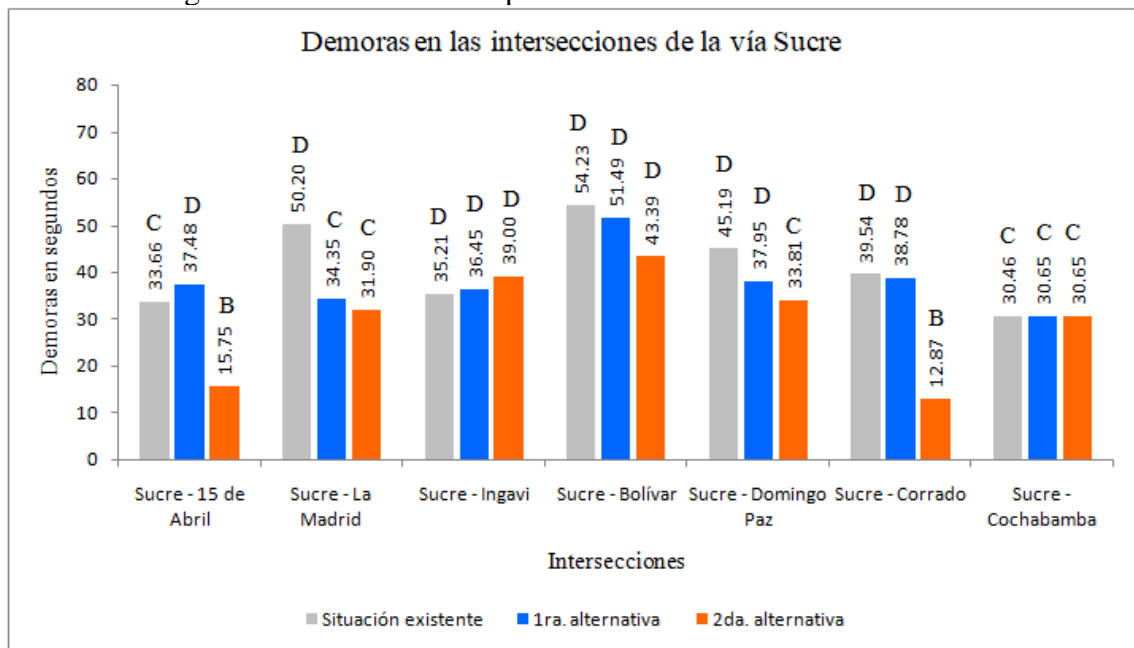


#### 4.10.5. Demoras vehiculares

Este parámetro de eficiencia seleccionado es utilizado con mayor frecuencia en el análisis de intersecciones, este considera el tiempo que se pierde en el viaje de un vehículo entre dos puntos debido a la concentración de tráfico.

La figura 25 muestra el valor de demoras vehiculares por intersección, y para cada escenario (situación existente, propuesta 1 y propuesta 2).

Figura 25: Evaluación comparativa de demoras en la calle Sucre



Fuente: Elaboración propia

La figura 25 muestra que las propuestas 1 y 2 presentan disminución de demoras vehiculares en tres intersecciones con respecto a los valores de demora de la situación existente, por el contrario las demás intersecciones se mantienen o aumentan muy poco la demora ya que el volumen de vehículos incrementa considerablemente, demostrando que la reducción de la longitud de ciclo en ciertas intersecciones contribuye a un mejor ordenamiento del ingreso y salida de los vehículos, para las demoras de las demás intersecciones ver anexo 10.

Tabla 28: Incremento de volumen vehicular a lo largo de la calle Sucre en las intersecciones semáforizadas

Intersección	Volumen vehicular (Veh/h)			N° de vehículos incrementados	
	Campo	1ra. alternativa	2da. alternativa	1ra. alternativa	2da. alternativa
Sucre - 15 de Abril	602	666	696	64	94
Sucre - La Madrid	646	756	744	110	98
Sucre - Ingavi	633	672	714	39	81
Sucre - Bolívar	604	552	722	0	118
Sucre - Domingo Paz	603	684	738	81	135
Sucre - Corrado	644	666	882	22	238
Sucre - Cochabamba	949	960	960	11	11

Fuente: Elaboración propia

En la primera alternativa se hizo una nueva configuración en los dispositivos de control en 6 intersecciones, 4 en la calle Bolívar, 1 en la intersección Colón – Domingo Paz y 1 en la Gral. Trigo – La Madrid, con el fin de determinar un ciclo óptimo del semáforo de 35 segundos, no debe de haber una gran diferencia de tiempo entre los accesos analizados (tiempo de verde efectivo), pues lo único que conseguirá será perjudicar las condiciones de circulación.

En el caso de la geometría (2da. alternativa), se realizaron cambios menores como reducir los carriles de estacionamiento en la calle Colón y en las intersecciones Daniel Campos – Virginio Lema, Sucre – Corrado, Gral. Trigo – 15 de Abril, Gral. Trigo – Domingo Paz, Gral. Trigo – Corrado, Campero – Bolívar y Campero – Domingo Paz incrementando la capacidad de las vías y obteniendo mayor fluidez al ver el incremento del número de vehículos.

#### 4.10.6. Análisis de proyección de volúmenes vehiculares

Para calcular la tasa de crecimiento anual del vehículo es necesario recurrir a los datos recolectados Con base en el registro único para la administración tributaria municipal (RUAT), el instituto nacional de estadística (INE), que realiza informes anuales de flujo vehicular por departamento, para esta investigación se procesan los aforos correspondientes a la ciudad de Tarija-Cercado, en los cuales se observa el crecimiento del volumen vehicular. En la tabla 29 se aprecian los volúmenes vehiculares aforados específicamente para la ciudad de Tarija-Cercado, si bien estos vehículos no usan

estrictamente la zona de estudio, su crecimiento porcentual corresponde a su parque automotor.

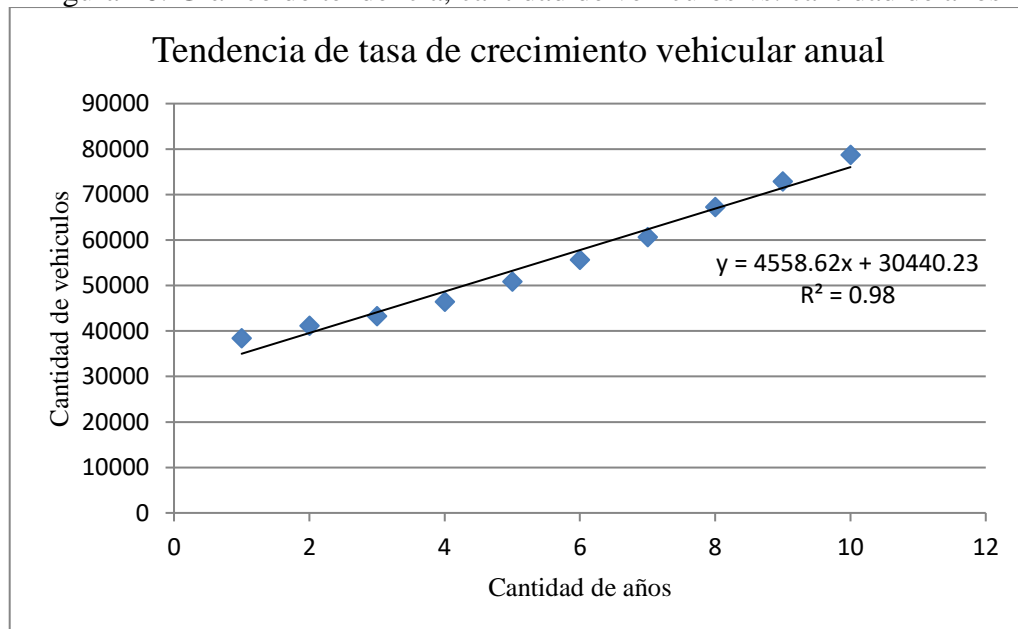
Tabla 29: Tasas de crecimiento vehicular anual 2010 - 2019

Año		Flujo vehicular (Unidades)	Tasa de crecimiento anual (%)
1	2010	38428	6.61
2	2011	41146	4.81
3	2012	43227	6.84
4	2013	46398	8.74
5	2014	50843	8.63
6	2015	55645	8.18
7	2016	60604	9.90
8	2017	67262	7.67
9	2018	72849	7.46
10	2019	78723	6.61

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se puede hallar la tendencia de comportamiento de las tasas de crecimiento proyectadas en un gráfico de dispersión con la ayuda del programa excel.

Figura 26: Gráfico de tendencia, cantidad de vehículos vs. cantidad de años



Fuente: Elaboración propia

En la figura 26 se observa la gráfica de dispersión en color azul, y la línea de tendencia lineal, que es la que mejor se adapta al modelo, de igual manera se observa la ecuación de la línea de tendencia con la cual se estimarán las tasas de crecimiento para los años 2020 al 2030 que se observan en la siguiente tabla.

Tabla 30: Tasa de crecimiento vehicular anual estimada

Año (X)		Flujo vehicular (Unidades) (Y)	Tasa de crecimiento anual (%)
11	2020	80585	2.31
12	2021	85144	5.35
13	2022	89702	5.08
14	2023	94261	4.84
15	2024	98820	4.61
16	2025	103378	4.41
17	2026	107937	4.22
18	2027	112495	4.05
19	2028	117054	3.89
20	2029	121613	3.75
21	2030	126171	3.61
Promedio			4.19

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 30 se observa que usando la ecuación de la línea de tendencia lineal de la figura 26 se puede calcular la tasa de crecimiento para los años solicitados, obteniéndose un promedio simple de 4.19% que viene a ser la tasa de crecimiento anual de los vehículos para la ciudad de Tarija estimada para la presente investigación.

Recalculando los flujos de las intersecciones proyectados al 2030 con la metodología de HCM 2000. Para esto se utilizan los valores porcentuales de la tabla 30, con este nuevo volumen vehicular proyectado y redistribuido por dirección en la intersección se procede a recalculando el nivel de servicio de la intersección para verificar si efectivamente las intersecciones colapsan con el nuevo volumen de la circulación vehicular proyectada al año 2030. Este procedimiento es el mismo que se detalló previamente en la sección de cálculo de niveles de servicio y capacidad vial, obteniéndose un nuevo análisis de la intersección que se puede apreciar en la tabla 31.

Tabla 31: Cálculo de demoras y nivel de servicio luego de la proyección y redistribución al 2024 del volumen vehicular en las intersecciones

Nº	Intersección	Flujo vehicular 2030	Capacidad	Demora 2030 (seg)	Nivel de servicio
1	Campero - 15 de Abril	988	1065	100.87	F
2	Campero - Ingavi	955	1086	115.61	F
3	Campero - Bolívar	984	1240	39.98	D
4	Campero - Domingo Paz	1264	1886	60.41	E
5	Campero - Corrado	901	1232	71.50	E

6	Campero - Cochabamba	1432	2044	102.05	F
7	Gral. Trigo - 15 de Abril	1097	1917	22.83	C
8	Gral. Trigo - La Madrid	956	1796	29.84	C
9	Gral. Trigo - Ingavi	953	1181	79.04	E
10	Gral. Trigo - Bolívar	947	1168	116.93	F
11	Gral. Trigo - Domingo Paz	1167	1237	70.64	E
12	Gral. Trigo - Corrado	1147	1374	16.35	B
13	Gral. Trigo - Cochabamba	1779	2131	101.44	F
14	Sucre - 15 de Abril	1129	1967	100.86	F
15	Sucre - La Madrid	1042	1903	49.90	D
16	Sucre - Ingavi	1094	1215	127.33	F
17	Sucre - Bolívar	984	1222	109.10	F
18	Sucre - Domingo Paz	1065	1241	135.19	F
19	Sucre - Corrado	1083	1872	18.72	B
20	Sucre - Cochabamba	1545	2191	75.67	E
21	Daniel Campos - Virginio Lema	908	1193	56.82	E
22	Daniel Campos - 15 de Abril	1015	1323	58.00	E
23	Daniel Campos - La Madrid	937	1298	45.07	D
24	Daniel Campos - Ingavi	1210	1622	71.65	E
25	Daniel Campos - Bolívar	1223	1290	170.89	F
26	Daniel Campos - Domingo Paz	1152	1155	134.13	F
27	Daniel Campos - Cochabamba	1580	2174	59.09	E
28	Colón - Virginio Lema	942	1062	98.66	F
29	Colón - 15 de Abril	1059	1928	27.78	C
30	Colón - La Madrid	994	1817	77.73	E
31	Colón - Ingavi	1306	2165	56.00	E
32	Colón - Bolívar	1258	1400	156.09	F
33	Colón - Domingo Paz	1172	1238	73.28	E
34	Colón - Cochabamba	1655	2188	95.96	F

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 31 se puede apreciar que el nivel de servicio para el año 2030 en su gran mayoría de las intersecciones va a llegar a ser F, con las mejoras propuestas, lo que nos indica realizar periódicamente un ajuste en la programación de los semáforos cada 5 años o cuando existan variaciones significativas en el flujo de vehículos.

En el anexo 11, de acuerdo a los resultados obtenidos para el nivel de servicio de cada intersección se hizo un esquema, donde se identifican los distintos niveles de servicio de las intersecciones en estudio para su estado actual, para la 1ra. alternativa, para la 2da. alternativa y para la proyección del año 2030.

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. Conclusiones**

Se concluye en base a los resultados que se obtuvieron del análisis de la situación existente, y las situaciones con propuestas de mejora 1 y 2. En el presente proyecto se determinó mediante la microsimulación de tráfico que, las condiciones existentes de circulación multimodal están saturadas, con longitud de colas largas, con tiempos de demora considerable y niveles de servicio medios en las intersecciones, en las cuales se aprecian demoras por encima de 40 a 50 segundos para las intersecciones más desfavorables, donde predominan niveles de servicio C y D, los resultados reflejan lo observado en campo, ya que, estas intersecciones generalmente operan bajo condiciones saturadas que se ven reflejados en el tráfico vehicular en las horas de mayor demanda, los resultados señalan que las vías más críticas son la calle Sucre y la calle Bolívar ya que éstas en todas sus intersecciones presentan un nivel de servicio D.

Habiendo determinado que las intersecciones evaluadas operan bajo niveles de servicio “D”, se presenta las siguientes alternativas de mejora. En la primera, se propone la optimización del ciclo y fases semafóricas, sin ninguna modificación geométrica, en esta propuesta no se logró reducir considerablemente el tiempo de demoras en las intersecciones ya que se incrementa el volumen vehicular por los cambios realizados (Un 10% en promedio para la 1ra. alternativa y un 19% para la 2da. alternativa), mediante el proceso del ciclo optimo se determinó un ciclo de 35 segundos para las 6 intersecciones modificadas, así mismo, queda comprobado que un tiempo menor de ciclo semafórico no garantiza un mejor funcionamiento en todas las intersecciones semáforizada, este cambio ocasionó un mayor aumento de demora en la intersección Daniel Campos – Madrid (Demora 54.17 segundos, nivel de servicio D).

Con los resultados obtenidos de la propuesta 1, se demuestra mediante la microsimulación que la semaforización actual influye en la generación de tráfico en las

intersecciones evaluadas, sin embargo, la reducción de longitud de colas y demoras son pequeñas, las mismas que se ven reflejadas en niveles de servicio similares a la situación existente. Por lo que se concluye que la influencia del tiempo de duración de los semáforos es nula ya que no genero un mejoramiento del nivel de servicio de las intersecciones, y en alguna intersección ocasiono mayor congestión.

En la segunda propuesta de mejora, se propone modificaciones en la semaforización y geometría, se implementara nuevos carriles de circulación para giros exclusivos en la calle Colón y en las intersecciones Daniel Campos – Virginio Lema, Sucre – Corrado, Gral. Trigo – 15 de Abril, Gral. Trigo – Domingo Paz, Gral. Trigo – Corrado, Campero – Bolívar y Campero – Domingo Paz. El ciclo y fases de la semaforización se utilizaron los mismos de la propuesta 1. Esta propuesta presenta mejoras considerables en la capacidad de las vías que se ven reflejadas en mejores niveles de servicio. Finalmente, la implementación de estas soluciones (Propuesta 2) generará una vialidad ordenada, más segura y más fluida, en las vías donde se aumentó la capacidad de las calles.

La capacidad y los niveles de servicio hallados en el análisis operacional varían dependiendo de los valores de intervalos que se adopte, se comprueba que al usar los valores propuestos por el HCM 2000, se obtienen niveles de servicio “C y D”, que indica que los accesos funcionan de una manera eficiente, y son similares a los que se obtuvieron en el software PTV Vissim. Adicionalmente, la utilización del programa Vissim 2020 nos permitió entender la influencia que tienen los semáforos cercanos a cada intersección, en el proceso de formación de congestiones, así mismo, los niveles de servicio obtenidos varían entre los niveles “C” y “D”, que indica que el área central está en los límites de lo que se podría considerar como un funcionamiento eficiente; la probabilidad de que esta colapse en los próximos años es muy alta. Asimismo el programa resulta favorable para evaluar posibles propuestas de mejora para el estudio de un proyecto sin que se tenga que intervenir físicamente en el área de estudio.

La simulación hecha para el año 2030 muestra que el crecimiento del parque automotor haría que para este año la propuesta no opere de manera correcta, obteniendo niveles de

servicio bajos (F), sin embargo, al adoptar la medida de restricción vehicular por número de placa, se puede lograr resultados satisfactorios, reduciendo la cantidad de autos que circularían por la intersección en el año 2030, en horas pico, se logra que la vías operen de una manera mucho mejor. Además, se debe considerar las ventajas que supone esta medida, como, por ejemplo, una reducción de la contaminación, entre otras.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda una nueva configuración de los dispositivos de control de las siguientes intersecciones semáforizadas: Colón - Domingo Paz, Colon - Bolívar, Daniel Campos - Bolívar, Sucre - Bolívar, Gral. Trigo - Bolívar, Gral. Trigo- La Madrid, con una duración de ciclo de 35 segundos para optimizar el funcionamiento de estas intersecciones.

Se recomienda incrementar la oferta de infraestructura reduciendo un carril de estacionamiento e implementar carriles de giro exclusivos en las intersecciones presentadas en los planos de este trabajo, también tomar en cuenta otras vías a parte de las ya mencionadas, lo que permitirá que los vehículos puedan movilizarse de una manera más eficiente.

En esta investigación se hizo seguimiento a 34 intersecciones en el área central de la ciudad de Tarija, se recomienda reducir el área de estudio para tener una mayor precisión sobre el comportamiento del tránsito vehicular, ya que de esa manera se podría obtener una solución más integral en la aplicación del software PTV Vissim.

El uso de simuladores, para el desarrollo de proyectos, es recomendable, debido a que permiten entender el comportamiento de un sistema de manera más profunda, de esta manera se garantiza que las propuestas planteadas tengan un correcto funcionamiento, por lo que se recomienda disponer en las universidades, de este tipo de software en su versión completa.