

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 ANTECEDENTES**

“Estudio sobre la influencia de la semaforización en la capacidad vehicular en tramos urbanos de mayor circulación”

Debido a la observación de los constantes problemas de tráfico que se tiene en el área urbana de la ciudad de Tarija, y con el diagnóstico preliminar de que la causa para tal sería la reducción de la capacidad vehicular debido a la semaforización. Es que se realiza un estudio, para determinar la influencia que puede tener la semaforización en la reducción de la capacidad vehicular de tramos seleccionados por cuestiones no especificadas.

El área de estudio abarca cuatro intersecciones, de las cuales todas cuentan con semáforos, para ello se obtuvieron información básica referente a los volúmenes de tráfico.

La metodología utilizada para el cálculo de capacidades, es la proporcionada por el manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

El cálculo de la capacidad en cada una de las intersecciones se lo realizó para intersecciones semaforizadas y no semaforizadas, de donde se obtuvo relaciones gráficas de semaforización-capacidad, gráficas donde se muestra el porcentaje de influencia de la semaforización en la capacidad vehicular.

## **1.2 SITUACIÓN ACTUAL**

Actualmente la ciudad de Tarija cuenta con un número de 79 intersecciones semaforizadas, las cuales se encuentran distribuidas en diferentes avenidas y calles de mayor circulación. Se debe destacar que sólo se pudo apreciar, la presencia de 2 intersecciones con semáforos peatonales, ubicadas en la zona del Mercado Campesino.

La mayor concentración de intersecciones semaforizadas, se ubica en el casco viejo de la ciudad, que está comprendido desde la calle Domingo Paz hasta la calle 15 de Abril (en sentido horizontal) y desde la calle J.M. Saracho hasta la calle Méndez (sentido vertical).

Las demás ubicaciones comprenden la calle Oconnor, Av. Cochabamba, Av. Panamericana, Corrado, Av. Circunvalación, Av. La Paz.

El funcionamiento de los semáforos en las intersecciones se da de lunes a domingo, de horas 6:00 a 22:00 continuamente.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

En vista a la problemática de tráfico que se viene observando en las diferentes calles de la ciudad de Tarija, que consisten en largas colas de vehículos, largos periodos de demora, e incomodidad en el flujo libre de vehículos y de peatones, es necesario realizar un estudio para analizar el congestionamiento que ocurre en las diferentes intersecciones semaforizadas con capacidad rebasada de vehículos.

Actualmente ya existe un estudio, el cual determina la influencia de la semaforización sobre la capacidad vehicular para las intersecciones; pero, cabe recalcar que este estudio sólo cuenta con valores de porcentajes en la reducción de la capacidad y no nos da a entender el grado de congestionamiento que provocan los semáforos, ni podemos hacer notar el área de influencia que puede tener estos congestionamientos.

El presente estudio plantea realizar un análisis de los diferentes parámetros que constituyen un congestionamiento vehicular para determinar el grado de influencia que pueda tener el funcionamiento de los semáforos en la diferentes intersecciones; además, de ello obtener valores que nos demuestren o nos den a entender la característica de funcionalidad que puedan provocar el funcionamiento de semáforos en cada intersección.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar el estudio del congestionamiento vehicular examinando su naturaleza y la relación que guarda con la funcionalidad de las intersecciones semaforizadas.

#### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar toda la información necesaria que comprenda metodologías de cálculo, información de datos ya existentes, y procedimientos para analizar el congestionamiento en intersecciones semaforizadas.
- Determinar las características geométricas de las diferentes calles que componen las intersecciones de estudio.
- Determinar los diferentes flujos vehiculares que son afectados por las intersecciones semaforizadas.
- Determinar las horas de mayor congestionamiento de las intersecciones.
- Determinar el número medio de vehículos que atraviesan cada intersección.
- Determinar la capacidad de servicio con que cuentan cada uno de los accesos de cada intersección.
- Cuantificar el grado de influencia que pueden tener los tiempos de ciclo de los semáforos en las intersecciones.
- Determinar la demora que se experimenta al atravesar por los puntos semaforizadas.
- Determinar el número medio de vehículos que son afectados por el congestionamiento, en cada una de las intersecciones.
- Determinar la longitud máxima de la cola a causa del congestionamiento.
- Determinar la calidad de flujo y nivel de servicio con que cuentan las intersecciones en estudio.

#### **1.5 ALCANCE DEL TRABAJO**

Los parámetros fundamentales de la zona de estudio son los flujos vehiculares y las capacidades de cada intersección por lo que se deberá recabar todos los datos necesarios para cuantificar estos parámetros, volúmenes, intensidades, horas de mayor circulación.

El presente estudio comprende el análisis del congestionamiento a causa de las intersecciones semaforizadas; por tanto, es indispensable conocer los tiempos de ciclo y de fase con que cuentan cada uno de los semáforos en cada intersección, conocer la cantidad

de vehículos que son afectados y el tiempo que demoran para atravesar los diferentes puntos conflictivos de estudio.

Por tanto, será necesario calcular las capacidades en cada una de las intersecciones y los niveles de servicio con los que están funcionando actualmente todas estas intersecciones semaforizadas.

Los datos necesarios para conocer estos parámetros, son la cantidad de vehículos que atraviesan la intersección, el porcentaje de automóviles que giran tanto a la izquierda como a la derecha, el porcentaje de vehículos pesados, las paradas designadas al transporte público, el estacionamiento si está permitido o no.

Obtenidas las intersecciones de estudio, pasamos a determinar los diferentes parámetros que nos ayudaran a cuantificar o calificar el grado de congestionamiento en que se encuentran cada una de estas intersecciones y dar un análisis cualitativo del funcionamiento que ofrecen al flujo vehicular.

Para concluir con el análisis del congestionamiento, necesitamos conocer los parámetros como tiempos necesarios para que se disipe la cola en una intersección, proporción de vehículos detenidos, longitud máxima de la cola, longitud promedio de la cola por ciclo, demora máxima que experimenta un vehículo.

## **1.6 MEDIOS Y METODOLOGÍA**

La recopilación de información y datos consiste en la averiguación de otros estudios similares o sobre temas parecidos al presente estudio, también se realizó la investigación de las características para las respectivas intersecciones a analizar, como ser el tipo de funcionamiento que tienen los semáforos.

Se llevará a cabo una toma de muestras de las 79 intersecciones semaforizadas se seleccionara un numero de 23 que estarán distribuidas en diferentes áreas, estas intersecciones son de dos, tres y cuatro accesos.

La medición de las propiedades geométricas de los accesos que componen las intersecciones, se lo realizara, con ayuda de una cinta métrica. Los resultados obtenidos serán llevados a planos donde se representara en dibujo de planimetría, la estructura geométrica de cada una de las intersecciones.

Se realizaran diferentes aforos o medición de la cantidad del flujo vehicular en ciclos continuos de doce horas, para determinar las horas de máxima demanda en las intersecciones.

El control debe realizarse con la medición de cantidad de vehículos por hora que atraviesan el acceso y para ello se hará uso de cronómetros.

Los parámetros a determinar como porcentaje de vehículos pesados, porcentaje de vehículos que giran a la izquierda, porcentaje de vehículos que giran a la derecha, se lo realizará con ayuda de planillas modelo, este proceso se realizará en las horas de máxima demanda del acceso.

La determinación de capacidades, nivel de servicio, están basados en el procedimiento que nos proporciona el manual HCM 1985.

El proceso de cálculo se realizará una vez obtenido todos los parámetros necesarios, que consiste fundamentalmente en parámetros que nos dan a entender el grado de congestión con que cuenta cada intersección y los diferentes parámetros que lo componen.

Posteriormente se realizara el análisis de resultados y su interpretación mediante tablas, y análisis cualitativo.

## 2. ASPECTOS GENERALES DE LA INGENIERÍA DE TRÁNSITO

### 2.1 DEFINICIONES

Las siguientes definiciones, nos ayudan a comprender los conceptos, tanto técnicos como científicos que corresponden a aquellos aspectos que engloban la Ingeniería de Tránsito:

- ***Ingeniería de Tráfico***

La Ingeniería de Tráfico, es una ciencia que se ocupa de estudiar, analizar y encontrar soluciones a la problemática del transporte en general y al tránsito o tráfico en particular, tanto de pasajeros como de carga.

- ***Ingeniería de Transporte***

Aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planeación, al proyecto funcional, a la operación y a la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte, con el fin de proveer la movilización de personas y mercancías de una manera segura, rápida, confortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente.

- ***Transportar.***- Llevar una cosa de un paraje o lugar a otro. Llevar de una parte a otra por el porte o precio convenido.
- ***Transporte o Transportación.***- Acción y 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.

### 2.2 ALCANCES DE LA INGENIERÍA DE TRÁNSITO

#### 2.2.1 Características de Tránsito

Se analizan los diversos factores, las limitaciones de los vehículos y los usuarios como elementos de la corriente de tránsito. Se investigan: la velocidad, el volumen y la densidad; el origen, destino del movimiento, la capacidad de las calles y carreteras; el funcionamiento de pasos a desnivel, terminales, intersecciones canalizadas y se analizan los accidentes, etc...Así se pone en evidencia la influencia

de la capacidad y limitaciones del usuario en el tránsito; se estudia al usuario particularmente desde el punto de vista psíquico-físico, indicándose la rapidez de las reacciones para frenar, para acelerar, para maniobrar, su resistencia al cansancio, etc., empleando en todo esto, métodos modernos e instrumentos psicotécnicos, así como la metodología estadística.

### **2.2.2 Reglamentación del Tránsito**

La técnica debe establecer las bases para los reglamentos del tránsito; debe señalar sus objeciones, legitimidad y eficacia, así como sanciones y procedimientos para modificarlos y mejorarlos. Así, por ejemplo, deben ser estudiadas las reglas en materia de licencias; responsabilidad de los conductores, peso y dimensiones de los vehículos, accesorios obligatorios y equipo de iluminación, acústicos y de señalamiento, revista periódica, comportamiento de la circulación, etc.

Igual atención se da a otros aspectos, tales como: prioridad de paso, tránsito en un sentido; zonificación de la velocidad; limitaciones en el tiempo de estacionamiento; control policiaco en las intersecciones; procedimiento legal y sanciones relacionadas con accidentes, peatones y transporte público.

### **2.2.3 Señalamiento y Dispositivos de Control**

Este aspecto tiene por objeto determinar los proyectos, construcción, conservación y uso de las señales, iluminación, dispositivos de control, etc. Los estudios deben complementarse con investigaciones de laboratorio, aunque el técnico en tránsito, no es responsable de la fabricación de estas señales y semáforos a él incumbe señalar su alcance, promover su empleo y juzgar su eficiencia.

### **2.2.4 Planificación Vial**

Es indispensable en la ingeniería de tránsito, realizar investigaciones y analizar los diferentes métodos, para planificar la vialidad en un país, en un municipio, o en un área pequeña, para poder adaptar el desarrollo de las calles y carreteras a las necesidades de tránsito.

### **2.2.5 Administración**

Es necesario examinar las relaciones entre las distintas dependencias que tienen competencia en materia vial y su actividad administrativa al respecto. Deben considerarse los distintos aspectos tales como: económico, político, fiscal, de relaciones públicas, de sanciones, etc.

## **2.3 PROBLEMAS DE TRÁNSITO Y SU SOLUCIÓN**

### **2.3.1 Factores que Intervienen en el Problema de Tránsito**

Las ciudades dependen grandemente de sus sistemas de calles, ofreciendo servicios de transporte. Muchas veces, estos sistemas tienen que operar por arriba de su capacidad, con el fin de satisfacer los incrementos de demanda por servicios de transporte, ya sea para tránsito de vehículos livianos, tránsito comercial, transporte público, acceso a las distintas propiedades o estacionamientos, etc., originando obviamente problemas de tránsito, cuya severidad por lo general se puede medir en términos de accidentes y congestiónamiento.

A pesar de que en los últimos tiempos con los avances tecnológicos, se han logrado proyectar y construir sistemas viales más acordes con los vehículos que los utilizan, al igual que diseños urbanos modernistas, los problemas de tránsito en muchos lugares aún persisten.

A continuación se enuncian cinco factores que podrían incrementar estos problemas y que deben ser tomados en cuenta en cualquier intento de solucionarlos:

#### *1. Diferentes tipos de vehículos en la misma vialidad*

- Diferentes dimensiones, velocidades y características de aceleración.
- Automóviles diversos.
- Camiones y autobuses, de alta velocidad.
- Camiones pesados, de baja velocidad, incluyendo remolques.
- Vehículos tirados por animales, que aún subsisten en algunos países.
- Motocicletas, bicicletas, vehículos de mano, etc.

## *2. Superposición del tránsito motorizado en vialidades inadecuadas*

- Relativamente pocos cambios en el trazo urbano.
- Calles angostas, torcidas y pronunciadas pendientes.
- Aceras insuficientes.
- Carreteras que no han evolucionado.

## *3. Falta de planificación en el tránsito*

- Calles, carreteras y cuentes que se siguen construyendo con especificaciones anticuadas.
- Intersecciones proyectadas sin base técnica.
- Previsión casi nula para estacionamiento.
- Localización inapropiada de zonas residenciales en relación con zonas industriales o comerciales.

## *4. El automóvil no considerado como una necesidad pública*

- Falta de apreciación de las autoridades sobre la necesidad del vehículo dentro de la economía del transporte.
- Falta de apreciación del público en general a la importancia del vehículo automotor.

### **2.3.2 Tipos de Solución**

Si el problema del tránsito causa pérdida de vidas y bienes, o sea que equivale a una situación de falta de seguridad para las personas y de eficiencia económica del transporte, la solución, lógicamente, se obtendrá haciendo el tránsito seguro y eficiente.

Hay tres tipos de solución que se pueden dar al problema de tránsito:

#### ***1. Solución integral***

Si el problema es causado por un vehículo moderno sobre carreteras y calles antiguas, la solución integral consistirá en construir nuevos tipos de vialidades que sirvan a este vehículo, dentro de la previsión posible. Se necesitará crear ciudades

con trazo nuevo, revolucionario, con calles destinadas a alojar al vehículo moderno, con todas las características inherentes al mismo.

Se debe diseñar el trazo propuesto para nuevas ciudades, el cual se inspira en los sistemas circulatorios de la naturaleza, como el de la sangre en el hombre, de los ríos y de las plantas. En este proyecto se busca el equilibrio de la oferta y la demanda con el trazo de arterias troncales con control de accesos para facilitar el viaje al centroide, con calles secundarias que drenan las zonas de habitación y trabajo hacia el lógico desfogue que las lleve a las zonas centroidales.

Esta solución es casi imposible de aplicar en las ciudades actuales, ya que se necesitaría empezar por barrer con todo lo existente. Las carreteras y calles actuales tendrían que ser sustituidas por otras cuya velocidad de proyecto fuese, por ejemplo, de 130 kilómetros por hora o más.

## ***2. Solución parcial de alto costo***

Esta solución equivale a sacar el mejor partido posible de lo que actualmente se tiene, con ciertos cambios necesarios que requieren fuertes inversiones. Los casos críticos, como calles angostas, cruceros peligrosos, obstrucciones naturales, capacidad restringida, falta de control en la circulación, etc., pueden atacarse mediante la inversión necesaria que es, siempre, muy elevada. Entre las medidas que pueden tomarse están: el ensanchamiento de calles, modificación de intersecciones rotatorias, creación de intersecciones canalizadas, sistemas de control automático con semáforos, estacionamientos públicos y privados, etc.

## **3. Solución parcial de bajo costo**

Consiste en el aprovechamiento máximo de las condiciones existentes, con el mínimo de obra material y el máximo en cuanto a regulación funcional del tránsito, a través de técnica depurada, así como disciplina y educación por parte del usuario. Incluye, entre otras cosas, la legislación y reglamentación adaptadas a las necesidades del tránsito; las medidas necesarias de educación vial, el sistema de

calles con circulación en un sentido, el estacionamiento de tiempo limitado, el proyecto específico y apropiado de señales de tránsito y semáforos, la canalización del tránsito a bajo costo, las facilidades para la construcción de terminales y estacionamientos, etc.

### **2.3.3 Bases para la Solución**

De cualquier manera, la experiencia demuestra que en determinado tipo de solución deberán existir tres bases en que se apoye la misma. Son los tres elementos que, trabajando simultáneamente, van a dar lo que se quiere: un tránsito seguro y eficiente.

Estos tres elementos son:

- 1. La ingeniería de tránsito**
- 2. La educación vial**
- 3. La legislación y vigilancia policiaca**

Aquel medio en el que falta alguno de estos tres elementos, también llamados columnas del Templo de la Seguridad, no tendrá un tránsito exento de accidentes y de congestionamientos. Es necesario que, cualquiera que sea el tipo de solución que se adopte, tome en cuenta estas tres herramientas indispensables. Es esencial que un técnico especializado en ingeniería de tránsito, resuelva los problemas del proyecto físico de la carretera o calle con todos sus detalles; que las instituciones educativas y el gobierno tomen por su cuenta la preparación del individuo para la era motorizada en que vive y, finalmente, que las autoridades sepan crear leyes y reglamentos adaptados a las necesidades del tránsito moderno y que las hagan cumplir por medio de agentes de tránsito especialmente preparados para tal fin.

### **2.3.4 Metodología**

Para atacar este problema se deben seguir cuatro pasos sucesivos que permitirán el planteamiento del mismo, de tal manera que la solución sea lógica y práctica. Los cuatro pasos necesarios son los siguientes:

1. Recopilación de los datos
2. Análisis de los datos
3. Proposición concreta y detallada
4. Estudio de los resultados obtenidos

Como primer paso es indispensable reunir toda la información necesaria. En esta recopilación de datos, lo que se necesitan son precisamente las estadísticas, los informes oficiales y los hechos veraces. No es suficientemente útil conocer la opinión del amigo o del comerciante de la esquina; se necesitan datos estadísticos obtenidos oficialmente, en el lugar de los accidentes u obtenidos de fuentes de información dignas de crédito.

Segundo, para el análisis de estos datos se necesita una mente entrenada que pueda dar una interpretación real a los mismos. De estos análisis se desprende una parte muy importante de la solución y sólo un especialista en la materia deberá llevarlo a cabo.

Después del análisis, el encargado de resolver el problema deberá presentar un proyecto de solución, cubriendo los tres elementos básicos, incluyendo el aspecto físico, adaptado a las características del vehículo y del usuario, conteniendo las modalidades necesarias en cuanto a educación vial, así como las reformas y sistemas legislativos y policíacos, que permitan impartir la solución.

Finalmente, es conveniente observar, durante cierto periodo posterior, el resultado que tuvo la solución aplicada. Este resultado se observará directamente a través de las estadísticas levantadas en cuanto a la eficiencia del movimiento vehicular y de peatones, así como en cuanto a la disminución o aumento de accidentes. Es posible que muchas soluciones requieran una revisión y perfeccionamiento, por lo que éste último paso, es de gran importancia.

## **2.4 DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL DE TRÁNSITO**

### **2.4.1 Clasificación de los Dispositivos de Control**

Se denominan dispositivos para el control del tránsito, a las señales, marcas, semáforos y cualquier otro dispositivo, que se colocan sobre o adyacente a las calles y carreteras por una autoridad pública, para prevenir, regular y guiar a los usuarios de las mismas. Los dispositivos de control indican a los usuarios las precauciones (prevenciones) que deben tener en cuenta, las limitaciones (restricciones) que gobiernan el tramo en circulación y las informaciones (guías) estrictamente necesarias, dadas las condiciones específicas de la calle o carretera.

Los dispositivos para el control del tránsito en calles y carreteras se clasifican en:

#### 1. Señales

- Preventivas.
- Restrictivas.
- Informativas.

#### 2. Marcas

- Rayas.
- Símbolos
- Letras

#### 3. Obras y dispositivos diversos

- Cercas.
- Defensas.
- Indicadores de obstáculos.
- Indicadores de alineamiento.
- Tachuelas o botones.
- Reglas y tubos guía.
- Bordos.
- Vibradores.
- Guardaganados.
- Indicadores de curva peligrosa.

#### 4. Dispositivos para protección en obra

- Señales preventivas, restrictivas e informativas.
- Canalizadores.
- Señales manuales.
- Semáforos
- Vehiculares.
- Peatonales.
- Especiales

#### **2.4.2 REQUISITOS**

Cualquier dispositivo para el control del tránsito, debe llenar los siguientes requisitos fundamentales:

- Satisfacer una necesidad.
- Llamar la atención.
- Transmitir un mensaje simple y claro.
- Imponer respeto a los usuarios de las calles y carreteras.
- Estar en el lugar apropiado con el fin de dar tiempo para reaccionar.

El ingeniero de tránsito generalmente es el encargado de asegurar la necesidad y efectividad de los dispositivos de control. Existen cuatro consideraciones básicas para asegurarse que los dispositivos de control sean efectivos; entendibles y satisfagan los requisitos fundamentales anteriores. Estos factores son:

- **Proyecto:** La combinación de las características tales como forma, tamaño, color, contraste, composición, iluminación o efecto reflejante, deberán llamar la atención del usuario y transmitir un mensaje simple y claro.
- **Ubicación:** El dispositivo de control deberá estar ubicado dentro del cono visual del conductor, para llamar la atención, facilitar su lectura e interpretación, de acuerdo con la velocidad de su vehículo y dar el tiempo adecuado para una respuesta apropiada.

- **Uniformidad:** Los mismos dispositivos de control o similares deberán aplicarse de manera consistente, con el fin de encontrar igual interpretación de los problemas de tránsito a lo largo de una ruta.
- **Conservación:** Los dispositivos deberán mantenerse física y funcionalmente conservados, estos son, limpios y legibles, lo mismos que deberán colocarse o quitarse tan pronto como se vea la necesidad de ello.

Por tanto, al proyectar dispositivos de control del tránsito, lo más importante es lograr la uniformidad de: formas, tamaños, símbolos, colores, ubicación, etc., de manera que satisfagan una necesidad, llamen la atención, impongan respeto y transmitan un mensaje claro y legible.

## 2.5 VOLUMEN DE TRÁNSITO

### 2.5.1 Definiciones

#### 2.5.1.1 Volumen de Tránsito

Se define volumen de tránsito, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado. Se expresa como:

—

Donde:

Q= vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/periodo)

N = número total de vehículos que pasan (vehículos)

T= periodo determinado (unidades de tiempo)

#### 2.5.1.2 Volúmenes de Tránsito Absoluto o Totales

Es el número total de vehículos que pasan durante el lapso de tiempo determinado, se tienen los siguientes, dependiendo de la duración del lapso de tiempo determinado, tienen los siguientes volúmenes de tránsito absolutos o totales:

**1. Tránsito anual ( )**

Es el número total de vehículos que pasan durante un año. En este caso, año.

**2. Tránsito mensual ( )**

Es el número total de vehículos que pasan durante un mes. En este caso, mes.

**3. Tránsito semanal ( )**

Es el número total de vehículos que pasan durante una semana. En este caso, T = 1 semana.

**4. Tránsito diario ( )**

Es el número total de vehículos que pasan durante un día. En este caso, día.

**5. Tránsito horario ( )**

Es el número total de vehículos que pasan durante una hora. En este caso, T = 1 hora.

**6. Tasa de flujo o flujo ( )**

Es el número total de vehículos que pasan durante un periodo inferior a una hora. En este caso, hora.

En todos los casos anteriores, los periodos especificados, un año, un mes, una semana, un día, una hora y menos de una hora, no necesariamente son de orden cronológico. Por lo tanto, pueden ser 365 días seguidos, 30 días seguidos, 7 días seguidos, 24 horas seguidas, 60 minutos seguidos y periodos en minutos seguidos inferiores a una hora.

**2.5.1.3 Volúmenes de Tránsito Promedio Diarios**

Se define el volumen de tránsito promedio diario ( ), como el número total de vehículos que pasan durante un periodo dado (en días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido entre el número de días del periodo. De acuerdo al número de días de este periodo, se presentan los siguientes volúmenes de tránsito promedio diario, dado en vehículos por día:

4.9.1 Tránsito promedio diario anual ( )

—

4.9.2 Tránsito promedio diario mensual ( )

—

3. Tránsito promedio diario semanal ( )

—

#### 2.5.1.4 Volúmenes de Tránsito Horarios

1. *Volumen horario máximo anual* ( )

Con base en la hora seleccionada, se definen los siguientes volúmenes de tránsito horarios, dados en vehículos por hora:

Es el máximo volumen horario que ocurre en un punto o sección de un carril o de una calzada durante un año determinado. En otras palabras, es la hora de mayor volumen de las 8 760 horas del año.

2. *Volumen horario de máxima demanda* ( )

Es el máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril o de una calzada durante 60 minutos consecutivos. Es el representativo de los periodos de máxima demanda que se pueden presentar durante un día en particular.

3. *Volumen horario-décimo, vigésimo, trigésimo-anual*

Es el volumen horario que ocurre en un punto o sección de un carril o de una calzada durante un año determinado, que es excedido por 9, 19 y 29 volúmenes horarios, respectivamente. También se denomina volumen horario de la 10a, 20ava y 30ava hora de máximo volumen.

4. *Volumen horario de proyecto* ( )

Es el volumen de tránsito horario que servirá para determinar las características geométricas de la vialidad.

Fundamentalmente se proyecta con un volumen horario pronosticado. No se trata de considerar el máximo número de vehículos por hora que se puede presentar dentro de un año, ya que exigiría inversiones demasiado cuantiosas, sino un volumen horario que se pueda dar un número máximo de veces en el año, previa convención al respecto

### **2.5.2 Uso de los Volúmenes de Tránsito**

De una manera general, los datos sobre volúmenes de tránsito se utilizan ampliamente en los siguientes campos:

#### **1. Planeación**

- Clasificación sistemática de redes de carreteras.
- Estimación de los cambios anuales en los volúmenes de tránsito
- Modelos de asignación y distribución de tránsito.
- Desarrollo de programas de mantenimiento, mejoras y prioridad
- Análisis económicos.
- Estimaciones de la calidad del aire.
- Estimaciones del consumo de combustibles.

#### **2. Proyecto**

- Aplicación a normas de proyecto geométrico.
- Requerimientos de nuevas carreteras.
- Análisis estructural de superficies de rodamiento.

#### **3. Ingeniería de Tránsito**

- Análisis de capacidad y niveles de servicio en todo tipo de vialidades.
- Caracterización de flujos vehiculares.
- Necesidad de dispositivos para el control del tránsito.
- Estudio de estacionamientos.

#### **4. Seguridad**

- Cálculo de índices de accidentes y mortalidad.
- Evaluación de mejoras por seguridad.

#### **5. Investigación**

- Nuevas metodologías sobre capacidad.

- Análisis e investigación en el campo de los accidentes y la seguridad.
- Estudio sobre ayudas, programas o dispositivos para el cumplimiento de las normas de tránsito.
- Estudios de antes y después.
- Estudios sobre el medio ambiente y la energía.

## 6. Usos Comerciales

- Hoteles y restaurantes.
- Urbanismo.
- Autoservicios.
- Actividades recreacionales y deportivas.

Específicamente, dependiendo de la unidad de tiempo en que se expresen los volúmenes de tránsito, éstos se utilizan para:

### 1.- *Los volúmenes de tránsito anual ( )*

- Determinar los patrones de viaje sobre áreas geográficas.
- Estimar los gastos esperados de los usuarios de las carreteras.
- Calcular índices de accidentes.
- Indicar las variaciones y tendencias de los volúmenes de tránsito, especialmente en carreteras de cuota.

### 2.- *Los volúmenes de tránsito promedio diario ( )*

- Medir la demanda actual en calles y carreteras.
- Evaluar los flujos de tránsito actuales con respecto al sistema vial.
- Definir el sistema arterial de calles.
- Localizar áreas donde se necesite construir nuevas vialidades o mejorar las existentes.
- Programar mejoras capitales.

### 3.- *Los volúmenes de tránsito horario ( )*

- Determinar la longitud y magnitud de los periodos de máxima demanda.
- Evaluar deficiencias de capacidad.
- Establecer controles en el tránsito, como: colocación de señales, semáforos y marcas viales, jerarquización de calles, sentidos de circulación, rutas de tránsito y prohibición de estacionamiento, paradas y maniobras de vueltas.
- Proyectar y rediseñar geoméricamente calles e intersecciones.

### 4.- *Las tasas de flujo*

- Analizar flujos máximos.
- Analizar variaciones del flujo dentro de las horas de máxima demanda.
- Analizar limitaciones de capacidad en el flujo de tránsito.
- Analizar las características de los volúmenes máximos.

#### **2.5.3 Características de los Volúmenes de Tránsito**

Los volúmenes de tránsito siempre deben ser considerados como dinámicos, por lo que solamente son precisos para el periodo de duración de los aforos. Sin embargo, debido a que sus variaciones son generalmente rítmicas y repetitivas, es importante tener un conocimiento de sus características, para así programar aforos, relacionar volúmenes en un tiempo y lugar con volúmenes de otro tiempo y lugar, y prever con la debida anticipación la actuación de las fuerzas dedicadas al control del tránsito y labor preventiva, así como las de conservación. Por ejemplo, si se sabe que en Semana Santa se va a tener el mayor número de accidentes de tránsito, se debe planear una campaña preventiva para actuar antes y durante esa semana. Por otro lado, en esta semana no se deben realizar trabajos de reparación normal en la calle o carretera, pues pueden estorbar o resultar peligrosos.

Por tanto, es fundamental, en la planeación y operación de la circulación vehicular, conocer las variaciones periódicas de los volúmenes de tránsito dentro de las horas de máxima demanda, en las horas del día, en los días de la semana o en los meses del año. Aún más, también es importante conocer las variaciones de los volúmenes de tránsito en función de su distribución por carriles, su distribución direccional y su composición.

#### **2.5.4 Distribución y Composición del Volumen de Tránsito**

La distribución de los volúmenes de tránsito por carriles debe ser considerada, tanto en el proyecto como en la operación de calles y carreteras. Tratándose de tres o más carriles de operación en un sentido, el flujo se asemeja a una corriente hidráulica. Así, al medir los volúmenes de tránsito por carril, en zona urbana, la mayor velocidad y capacidad generalmente se logran en el carril del medio; las fricciones laterales, como paradas de autobuses y taxis. Las vueltas izquierdas y derechas, causan un flujo más lento en los carriles extremos, llevando el menor volumen el carril cercano a la acera. En carretera, a volúmenes bajos y medios suele ocurrir lo contrario, por lo que se reserva el carril cerca de la faja separadora central para vehículos más rápidos y para rebases, se presentan mayores volúmenes en el carril inmediato al acotamiento. En autopistas de tres carriles con altos volúmenes de tránsito, rurales o urbanas, por lo general hay mayores volúmenes en el carril inmediato a la faja separadora central.

En cuanto a la distribución direccional, en las calles que comunican el centro de la ciudad con la periferia de la misma, el fenómeno común que se presenta en el flujo de tránsito es de volúmenes máximos hacia el centro en la mañana y hacia la periferia en las tardes y noches. Es una situación semejante al flujo y reflujo que se presenta los fines de semana cuando los vacacionistas salen de la ciudad, el viernes o sábado y regresan el domingo en la tarde. Este fenómeno se presenta especialmente en arterias del tipo radial. En cambio, ciertas arterias urbanas que comunican “centros de gravedad” importantes, no registran variaciones direccionales muy marcadas en los volúmenes de tránsito.

Igualmente, en los estudios de volúmenes de tránsito muchas veces es útil conocer la composición y variación de los distintos tipos de vehículos. La composición vehicular se mide en términos de porcentajes sobre el volumen total. Por ejemplo, porcentaje de automóviles, de autobuses y de camiones. En los países más adelantados, con un mayor grado de motorización, los porcentajes de autobuses y camiones en los volúmenes de tránsito son bajos. En cambio, en países con menor grado de desarrollo, el porcentaje de estos vehículos grandes y lentos es mayor.

### **2.5.5 Variación del Volumen de Tránsito en la Hora de Máxima Demanda**

En zonas urbanas, la variación de los volúmenes de tránsito dentro de una misma hora de máxima demanda, para una calle o intersección específica, puede llegar a ser repetitiva y consistente durante varios días de la semana. Sin embargo, puede ser bastante diferente de un tipo de calle o intersección a otro, para el mismo periodo máximo. En cualquiera de estos casos, es importante conocer la variación del volumen dentro de las horas de máxima demanda y cuantificar la duración de los flujos máximos, para así realizar la planeación de los controles del tránsito para estos periodos durante el día, tales como prohibición de estacionamientos, prohibición de ciertos movimientos de vuelta y disposición de los tiempos de los semáforos.

Un volumen horario de máxima demanda, a menos que tenga una distribución uniforme, no necesariamente significa que el flujo sea constante durante toda la hora. Esto significa que existen periodos cortos dentro de la hora con tasas de flujo muchos mayores a las de la hora misma.

Para la hora de máxima demanda, se llama factor de la hora de máxima demanda,  $F_{hd}$ , a la relación entre el volumen horario de máxima demanda,  $V_{hd}$ , y el flujo,  $Q$ , que se presenta durante un periodo dado dentro de dicha hora. Matemáticamente se expresa como:

---

Donde:

$N$  = número de periodos durante la hora de máxima demanda

Los periodos dentro de la hora de máxima demanda pueden ser de 5, 10 o 15 minutos, utilizándose éste último con mayor frecuencia, en cuyo caso el factor de la hora de máxima demanda es:

---

Para periodos de 5 minutos, el factor de la hora de máxima demanda es:

---

El factor de la hora de máxima demanda, es un indicador de las características del flujo de tránsito en periodos máximos. Indica la forma como están distribuidos los flujos máximos dentro de la hora. Su mayor valor es la unidad, lo que significa que existe una distribución uniforme de flujos máximos durante toda la hora. Valores bastante menores que la unidad indican concentraciones de flujos máximos en periodos cortos dentro de la hora.

### **2.5.6 Variación Horaria del Volumen de Tránsito**

Las variaciones de los volúmenes de tránsito a lo largo de las horas del día, dependen del tipo de ruta, según las actividades que prevalezcan en ella, puesto que hay rutas de tipo turístico, agrícola, comercial, etc.

En zonas agrícolas las variaciones horarias dentro de la época de cosecha son extraordinarias; puede ser que en ciertas horas de la noche no haya absolutamente ningún vehículo; sin embargo, a determinadas horas del día hay tal cantidad de vehículos que pueden llegar a saturar, por ejemplo, una carretera de dos carriles. En el caso de una carretera de tipo turístico, durante los días entre semana existe un tránsito más o menos normal a lo largo de todas las horas; pero los sábados y domingos puede llegar a volúmenes sumamente altos, encontrándose varias horas del día con demandas máximas. El día sábado, de las 8 de la mañana a las 11 y 12,

el volumen horario es muy grande, en la tarde baja ya en la noche es bastante pequeño. El domingo, en la mañana presenta volúmenes horarios medianos y en la tarde máximos en las horas del regreso a la ciudad, ocurriendo largas filas de automóviles. Son variaciones horarias que ocurren en cualquier parte del mundo, que se pueden prever mediante los estudios necesarios.

En las ciudades se tiene una variación típica de la siguiente manera:

La madrugada empieza con bajo volumen de vehículos, el cual se va incrementando hasta alcanzar cifras máximas entre las 7:30 y las 9:30 horas. De las 9:30 a las 13:00 horas vuelve a bajar y empieza a ascender para llegar a otro máximo entre las 14:00 y las 15:00 horas. Vuelve de nuevo a disminuir entre las 14:00 y las 18:00 horas, cuando asciende otra vez para alcanzar un tercer valor máximo entre las 18:00 y las 20:00 horas. De esta hora en adelante tiende a bajar al mínimo en la madrugada.

En zonas urbanas, para el caso de intersecciones, se acostumbra tomar los datos de volúmenes de tránsito según sus movimientos direccionales.

### **2.5.7 Variación Diaria del Volumen de Tránsito**

Se han estudiado cuáles son los días de la semana que llevan los volúmenes normales de tránsito. Así, para carreteras principales de lunes a viernes los volúmenes son muy estables; los máximos, generalmente se registran durante el fin de semana, ya sea el sábado o el domingo, debido a que durante estos días por estas carreteras circula una alta demanda de usuarios de tipo turístico y recreacional. En carreteras secundarias de tipo agrícola, los máximos volúmenes se presentan entre semana. En las calles de la ciudad, la variación de los volúmenes de tránsito diario no es muy pronunciada entre semana, esto es, están más o menos distribuidos en los días laborales; sin embargo, los más altos volúmenes ocurren el viernes.

También vale la pena mencionar, con referencia a la variación diaria de los volúmenes de tránsito tanto a nivel urbano como rural, que se presentan máximos en

aquellos días de eventos especiales como: Semana Santa, Navidad, fin de año, competencias deportivas nacionales e internacionales, etc..

### **2.5.8 Variación Mensual del Volumen de Tránsito**

Hay meses que las calles y carreteras llevan mayores volúmenes otros, presentando variaciones notables. Los más altos volúmenes de tránsito se registran en Semana Santa, en las vacaciones escolares o fiestas de fin de año. Esta razón los volúmenes de tránsito promedio diarios que caracterizan cada mes son diferentes, dependiendo también, en cierta manera de la categoría y del tipo de servicio que presten las calles y carreteras. Sin embargo, el patrón de variación de cualquier vialidad no cambia mente de año a año, a menos que ocurran cambios importantes en su diseño, en los usos de la tierra, o se construyan nuevas calles funcionen como alternas.

## **2.6 ESTUDIO DE VOLÚMENES DE TRÁNSITO**

Los estudios sobre volúmenes de tránsito, se realizan con el propósito de obtener datos reales relacionados con el movimiento de vehículos y/o personas, sobre puntos o secciones específicas dentro de un sistema vial de carreteras o calles. Dichos datos se expresan en relación con el tiempo, y de su conocimiento se hace posible el desarrollo de metodologías que permiten estimar de manera razonable, la calidad del servicio que el sistema presta a los usuarios.

Estos estudios varían desde los muy amplios en toda una red o sistema vial, hasta los muy sencillos en lugares específicos tales como en intersecciones aisladas, puentes, casetas de cobro, túneles, etc. Las razones para llevar a cabo los estudios de volúmenes de tránsito son tan variadas como los lugares mismos donde se realizan.

El tipo de datos recolectados en un estudio de volúmenes de tránsito depende mucho de la aplicación que se le vaya a dar a los mismos. Así por ejemplo, algunos estudios requieren detalles como la composición vehicular y los movimientos direccionales, mientras que otros sólo exigen conocer los volúmenes totales. También, en algunos casos es necesario aforar vehículos únicamente durante periodos cortos de una hora o

menos, otras veces el periodo puede ser de un día, una semana o un mes e inclusive un año.

Existen diversas formas para obtener los recuentos de volúmenes de tránsito, para lo cual se ha generalizado el uso de aparatos de medición de diversa índole. Estas formas incluyen: los aforos manuales a cargo de personas, los cuales son particularmente útiles para conocer el volumen de los movimientos direccionales en intersecciones, los volúmenes por carriles individuales y la composición vehicular. Los aforos por combinación de métodos manuales y mecánicos, tales como el uso de contadores mecánicos accionados manualmente por observadores. Los aforos con el uso de dispositivos mecánicos, los cuales automáticamente contabilizan y registran los ejes de los vehículos; y los aforos con la utilización de técnicas tan sofisticadas como las cámaras fotográficas, las filmaciones y los equipos electrónicos adaptados a computadoras.

## **2.7 ANÁLISIS DEL FLUJO VEHICULAR**

### **2.7.1 Variables Relacionadas con el Flujo**

Las variables relacionadas con el flujo son la tasa de flujo, el volumen, intervalo simple entre vehículos consecutivos y el intervalo promedio entre varios vehículos.

#### *1. Tasa de flujo o flujo y volumen*

La tasa de flujo,  $q$ , es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por punto o sección transversal de un carril o calzada. Es pues, el número de vehículos,  $N$ , que pasan durante un intervalo de tiempo específico  $t$ , inferior a una hora en unidades de minutos o segundos. No obstante, la tasa de flujo,  $q$ , puede ser expresada en vehículos por hora, teniendo cuidado de su interpretación, pues no se trata del número vehículos que efectivamente pasan durante una hora completa o volumen horario,  $Q$ . La tasa de flujo,  $q$ , se calcula entonces con la siguiente expresión:

—

### 2. *Intérvalo simple* ( )

Es el intervalo de tiempo entre el paso de dos vehículos consecutivos generalmente expresado en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.

### 3. *Intérvalo promedio* ( )

Es el promedio de todos los intervalos simples, existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de promedio se expresa en segundos por vehículo (s/veh) y se calcula, mediante la siguiente expresión:

## 2.7.2 Variables Relacionadas con la Velocidad

Las variables del flujo vehicular relacionadas con la velocidad son la velocidad instantánea, la velocidad media temporal, la media espacial, la de recorrido, la de marcha, la distancia de recorrido y el tiempo de recorrido.

## 2.7.3 Variables Relacionadas con la Densidad

Las variables del flujo vehicular relacionadas con la densidad son la densidad o concentración, el espaciamiento simple entre vehículos consecutivos y el espaciamiento promedio entre varios vehículos.

### 2.7.3.1 Densidad o Concentración ( $K$ )

Es el número, de vehículos que ocupan una longitud específica,  $d$ , de una vialidad en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro (veh/km), ya sea referido a un carril o a todos los carriles de una calzada.

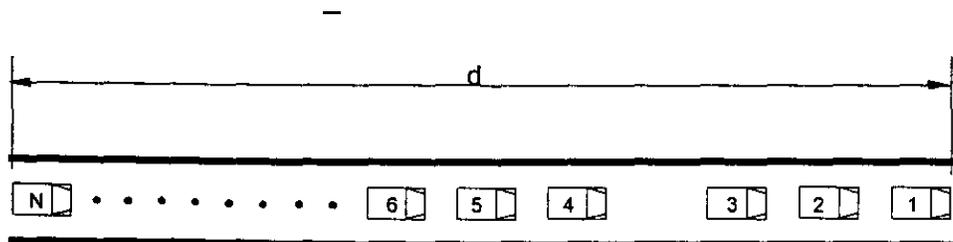


Figura N° 2.1 Esquema para determinar la densidad o concentración

### 2.7.3.2 Espaciamiento Simple (S1)

Es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, usualmente expresada en metros y medida entre sus defensas traseras.

### 2.7.3.3 Espaciamiento Promedio ( $\bar{s}$ )

Es el promedio de todos los espaciamientos simples,  $s$ , existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en metros por vehículo (m/veh) y se calcula, mediante la siguiente expresión:

$$\bar{s} = \frac{\sum s_i}{N-1}$$

Donde:

$\bar{s}$  = espaciamiento promedio (m/veh)

$N$  = número de vehículos (veh)

$N-1$  = número de espaciamientos (veh)

$s_i$  = espaciamiento simple entre el vehículo  $i$  y el vehículo  $i-1$

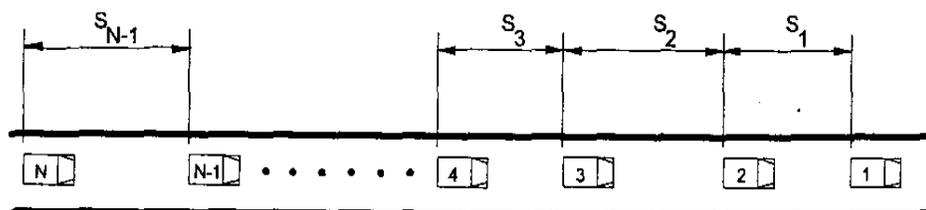


Figura N° 2.2 Esquema de Espaciamiento Promedio

Obsérvese que las unidades del espaciamiento promedio (m/veh) son las unidades inversas de la densidad  $k$  (veh/m), por lo que también puede plantearse la siguiente relación:

$$\bar{s} = \frac{1}{k}$$

### 2.7.4 Modelos Básicos de Flujo Vehicular

Los anteriores conceptos y relaciones fundamentales, constituyen el punto de partida para analizar aún más las características del flujo vehicular a través de sus tres variables principales flujo ( $q$ ), velocidad ( $v$ ) y densidad ( $k$ ), relacionadas

mediante la ecuación fundamental de flujo vehicular que, como se demostró, su forma general es:

Si se establece una relación entre cualquiera dos de las tres variables, la relación de estas dos con la tercera la determina la ecuación . Naturalmente, las posibles combinaciones son velocidad-densidad ( ), flujo- densidad ( ) y velocidad-flujo ( ). La variable más fácil de medir es el flujo  $q$ , siguiéndole en su orden la velocidad  $v$  y la densidad  $k$ . Por esta razón, usualmente se considera la densidad como la variable dependiente. De todas maneras no existe una variable dependiente aislada como tampoco existe cuando se representa un punto en el espacio en función de sus tres coordenadas  $(x, y, z)$ .

Uno de los objetivos finales que busca el ingeniero de tránsito, es el de optimizar la operación de los sistemas de tránsito existentes y el de intervenir en el proyecto de sistemas viales futuros bastante eficientes. De esta manera, la optimización en tránsito indica la selección de las mejores condiciones de operación, sujeto a las habilidades del sistema o recursos y a las restricciones del usuario y del medio ambiente.

Las medidas de efectividad, que entran en el objetivo definido como una función, inherentes en el criterio de optimización, serán aquellas que se puedan expresar como una función de las variables de tránsito presentes en el problema, llamadas variables de decisión. La tarea es, desde luego, elegir valores para las variables de decisión o control que hagan óptima la función objetivo.

En los enfoques determinístico, cálculo preciso de lo que le pasaría a una variable si las otras variables tomaran ciertos valores específicos, aplicados a problemas de tránsito, se supone que las relaciones funcionales entre las variables de entrada y los parámetros que miden la efectividad son constantes. Esto es, sólo ocurrirá un valor de la función objetivo para cualquier conjunto dado de valores de las variables de entrada.

En general los modelos del flujo vehicular se pueden clasificar en dos grandes clases: microscópicos y macroscópicos. Los modelos microscópicos consideran los espaciamientos y las velocidades individuales de los vehículos, con base en la teoría del seguimiento vehicular. Los modelos macroscópicos describen la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios.

Los esfuerzos en tratar de relacionar las diferentes parejas de las tres variables principales del flujo vehicular ( ) se han basado en toma de datos y ajuste simple a curvas o regresión, en métodos deductivos a partir de condiciones límite o de frontera y en analogías físicas. Estas tres formas de aproximarse al fenómeno del tránsito, han dado como resultado el desarrollo de modelos macroscópicos, los cuales suponen un movimiento homogéneo o condiciones de flujo estacionario y describen las características generales o globales de la corriente vehicular.

### **2.7.5 Descripción Probabilística del Flujo Vehicular**

Si todos los vehículos que circulan por una determinada vialidad se encuentran espaciados uniformemente, sería fácil determinar su flujo y los diferentes niveles de congestión. Sin embargo, en muchos casos los vehículos no viajan a intervalos uniformes, sino que lo hacen en grupos con un intervalo promedio para cada uno, reflejando concentraciones vehiculares que se mueven en forma de ondas a través del tiempo.

Más aún, en situaciones más cercanas a la realidad, los vehículos circulan en forma completamente dispersa. Todos aquellos enfoques que tratan de tener en cuenta la heterogeneidad del flujo, suponen que el patrón de llegadas o de paso de los vehículos corresponde, en cierta manera, a un proceso aleatorio. En muchos problemas de ingeniería de tránsito es de gran utilidad describir el flujo vehicular, de tal manera que conserve algunas de sus características discretas, considerando de esta forma los aspectos probabilísticos de su comportamiento.

Para seleccionar la distribución de probabilidad que más fielmente represente un flujo vehicular específico, es necesario que éste cumpla tres condiciones:

- Primero.**- Cada conductor sitúa su vehículo independientemente de los demás, excepto cuando su espaciamiento es muy pequeño.
- Segundo.**- Para cualquier flujo, el número de vehículos que pasan por un punto en un intervalo de tiempo dado es independiente del número de vehículos que pasan por otro punto durante el mismo intervalo.
- Tercero.**-El número de vehículos que pasan por un punto dado en un intervalo de tiempo es independiente del número de vehículos que pasan por el mismo punto durante otro intervalo.

## **2.8 CONGESTIONAMIENTO VEHICULAR**

La congestión de tránsito ha ido en aumento en gran parte del mundo, desarrollado o no, y todo indica que seguirá agravándose, constituyendo un peligro cierto sobre la calidad de vida urbana. El explosivo aumento del parque automotor y el indiscriminado deseo de usarlos, por razones de comodidad o estatus, especialmente en los países en desarrollo, ejercen una gran y creciente presión sobre la capacidad de las vías públicas existentes.

Los fuertes impactos de la congestión, tanto inmediatos como de largo plazo, exigen esfuerzos multidisciplinarios para mantenerla bajo control, mediante el diseño de políticas y medidas apropiadas, no siendo sencillo encontrar las soluciones más indicadas.

Todo señala que debe intentarse un conjunto de acciones sobre la oferta y la demanda de transporte, a fin de mejorar el uso de las vías públicas.

El control de la congestión forma parte de la elaboración de una visión estratégica de largo plazo del desarrollo de una ciudad, que permita compatibilizar, la movilidad y el crecimiento, con la calidad de vida.

### **2.8.1 Definición**

La palabra “congestionamiento”, se utiliza frecuentemente en el contexto del tránsito vehicular, tanto por técnicos como por los ciudadanos en general. El diccionario de la Lengua Española (Real Academia Española, 2001) la define como “acción y efecto de congestionar o congestionarse”, en tanto que “congestionar” significa “obstruir o entorpecer el paso, la circulación o el movimiento de algo”, que en nuestro caso es el tránsito vehicular.

Habitualmente se entiende como la condición en que existen muchos vehículos circulando y cada uno de ellos avanza lenta e irregularmente.

La causa fundamental del congestionamiento, es la fricción entre los vehículos en el flujo de tránsito. Hasta un cierto nivel de tránsito, los vehículos pueden circular a una velocidad relativamente libre, determinada por los límites de velocidad, la frecuencia de las intersecciones, etc. Sin embargo, a volúmenes mayores, cada vehículo adicional estorba el desplazamiento de los demás; es decir, comienza el fenómeno de la congestión.

Entonces, una posible definición objetiva sería: “La congestión, es la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás”.

### **2.8.2 Causas del Congestionamiento Vehicular**

Las causas de la congestión vehicular son varias. Sin embargo, entre los factores que la provocan se encuentran factores o causas de corto y de largo plazo.

#### **2.8.2.1 Causas de Corto Plazo**

- Rápido crecimiento poblacional y de trabajo.
- Un uso intensivo de vehículos automotores.
- Deficiente construcción de infraestructura vial.
- Los conductores no perciben todos los costos que generan.

### **2.8.2.2 Causas de Largo Plazo**

- Concentración de los viajes de trabajo en el tiempo.
- Deseo de viajar en vehículos privados.

### **2.8.3 Efectos de la Congestión Vehicular**

Los efectos perjudiciales de la congestión caen sobre todos los habitantes de la ciudad, en términos de deterioro de su capacidad de vida en distintos aspectos, como mayor contaminación acústica y atmosférica, impacto negativo sobre la salud mental, y otros. Por lo tanto, de una forma u otra, nadie queda inmune a sus consecuencias.

Enfocando el análisis en quienes deben transportarse, se pueden analizar los efectos de la congestión mediante el desglose de su costo en dos componentes fundamentales: el tiempo personal y los costos operacionales de los vehículos, especialmente combustible. Ambos se ven aumentados al viajar bajo condiciones de congestión.

Sin embargo los automovilistas no son los únicos que sufren los efectos de la congestión. La congestión agrava la condición ya deteriorada del transporte colectivo, de modo que también sus usuarios se ven afectados seriamente por ella.

### **2.8.4 Medidas Sobre la Oferta y la Demanda**

#### **2.8.4.1 Medidas Sobre la Oferta**

Lo lógico es enfrentar la congestión mediante medidas sobre la oferta de transporte; es decir, sobre la disponibilidad y calidad de la infraestructura, pues ello representa un aumento de la capacidad para efectuar desplazamientos.

Son muchas las deficiencias que presenta la vialidad urbana actual y que es necesario corregir; se debe mejorar el diseño de las intersecciones, demarcar y señalar apropiadamente las vías y corregir el ciclo de los semáforos.

Estas medidas pueden traer un importante alivio a la congestión, siendo el conocimiento de la ingeniería de tránsito el principal requisito.

No hay que descartar del todo la construcción o el ensanche de vías donde sea apropiado y factible, en el contexto de un desarrollo urbanístico armónico, que asegure los espacios destinados a peatones o paseantes, y preserve el patrimonio arquitectónico.

Un sistema de semáforos gestionado desde un computador central, puede ser una solución al congestionamiento, su costo algo elevado desde la perspectiva de muchos municipios podría hacer aconsejable que se aborde por etapas y sectores de la ciudad, comenzando con el progresivo reemplazo de los semáforos obsoletos por otros que porten la tecnología necesaria.

Otra necesidad real es organizar un sistema de transporte público que brinde un servicio efectivo, posiblemente reordenar las líneas en troncales y alimentadoras, y restablecer determinadas preferencias para su circulación.

#### **2.8.4.2 Medidas Sobre la Demanda**

Las medidas sobre la demanda tienen por objeto lograr que una cantidad importante de automovilistas, que circulan en zonas o períodos de alto tránsito, se muevan por medios no motorizados, o cambien el horario de su desplazamiento. Ciertas medidas son de tipo reglamentario e imponen restricciones, otras establecen desincentivos económicos para favorecer conductas que mitiguen la congestión. Ambas deben tenerse en cuenta para un mejor resultado global, considerando que las económicas podrían no ser del todo efectivas y las reglamentarias, vulnerables si los controles son débiles.

La educación vial, llevada a cabo en forma permanente desde la niñez, contribuye a aminorar la congestión, enseñando a evitar la conducción indisciplinada o la falta de respeto hacia los demás, sean peatones o vehículos.

A su vez, los peatones también deben ser orientados a observar las reglas de circulación y cruzar las calles sólo en los lugares y momentos habilitados para ello.

### **2.8.5 Estudio del Congestionamiento**

Uno de los objetivos fundamentales de los ingenieros de tránsito y transporte, es el de planear, diseñar y operar los sistemas viales, de tal manera que las demoras inducidas a los usuarios sean mínimas.

En los períodos de máxima demanda, el movimiento vehicular se va tomando deficiente con pérdidas de velocidad, lo que hace que el sistema tienda a saturarse, hasta llegar a funcionar a niveles de congestionamiento con las consiguientes demoras y colas asociadas.

Las demoras pueden causarlas los dispositivos para el control del tránsito al interrumpir el flujo, y las ocasionadas por la misma corriente vehicular en situaciones de flujo continuo.

En el primer caso, todos los tipos de SEMÁFOROS, así como las señales de ALTO Y CEDA EL PASO producen detenciones en un viaje normal. En segundo caso, se tienen demoras periódicas que ocurren corriente arriba de “cuellos de botella” durante las mismas horas del día, y las demoras no periódicas, ya sea por un accidente de tránsito o producto de incidentes o cierres eventuales de un carril o calzada.

La influencia de todas estas demoras puede medirse como una relación de demora, que consiste en la diferencia entre la relación del movimiento observado y la relación del movimiento considerada como normal para diferentes tipos de vías urbanas.

Los valores mínimos para la relación del movimiento normal en términos de velocidad recorrida son: para autopistas de acceso controlado 56 km/h; para arterias principales 40 km/h y para calles secundarias 32 km/h.

Con estos datos se puede conocer, comparativamente, cuales son las calles de la ciudad que están en condiciones más críticas. También se pueden comparar las calles de una ciudad con otra, conociendo algunas calles que trabajen en condiciones ideales, para así establecer la comparación con las otras que se hayan medido y saber el grado de congestión en que se encuentran.

Las demoras y las colas, resultado del congestionamiento, es un fenómeno de espera comúnmente asociado a muchos problemas de tránsito. La teoría de las colas, mediante el uso de algoritmos y modelos matemáticos, es una herramienta importante para el análisis de este fenómeno. En general las situaciones de demoras ocasionan la variabilidad del flujo de tránsito, pues hay periodos en que la demanda puede llegar a ser muy grande, o se presentan porque la capacidad del sistema varíe con el tiempo al darse el servicio por periodos.

## **2.9 CAPACIDAD VIAL**

### **2.9.1 Principios y Conceptos Generales**

#### **2.9.1.1 Capacidad Vial**

En las fases de planeación, estudio, proyecto, operación de carreteras 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.

Aparte del estudio de la capacidad de las carreteras y calles, el propósito que también se sigue, es el de determinar la calidad del servicio que presta cierto tramo o componente de arteria.

Teóricamente la capacidad ( $C_i$ ), se define como la tasa máxima de flujo que puede soportar una carretera 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.

La infraestructura vial, sea ésta una carretera o calle, puede ser de circulación continua o discontinua. Los sistemas viales de circulación continua 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.

Dependiendo del tipo de infraestructura vial a analizar, se debe establecer un procedimiento para el cálculo de su capacidad.

### **2.9.1.2 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; éstos se agrupan en tres tipos generales:

#### 1. Condiciones de la Infraestructura Vial.-

Son las características físicas de la carretera o calle (de tránsito continuo o discontinuo, con o sin control de accesos, dividida o no, de dos o más carriles, etc.), 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.

#### 2. Condiciones de Tránsito.-

Se refiere a la distribución del tránsito en el tiempo, en el espacio y a su composición en tipos de vehículos: livianos, camiones, autobuses y vehículos recreativos.

### 3. 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.).

#### **2.9.2 Capacidad en Vías Interrumpidas**

Cuando hablamos de capacidad en vías interrumpidas, nos referimos específicamente a la capacidad de calles o arterias dentro de una ciudad. Estas vías poseen características de circulación que obedecen a interrupciones en períodos de tiempo o en longitudes determinadas dadas por las intersecciones, las cuales originan la interrupción del tráfico.

La determinación de la capacidad en este tipo de vías está dada por una capacidad teórica, una capacidad práctica y una capacidad real en función de factores de reducción.

En la determinación de la capacidad se tiene como premisa que las intersecciones serán semaforizadas o en su caso accionadas por un agente de tráfico que regula la circulación.

##### **2.9.2.1 Capacidad Teórica**

La capacidad teórica ha sido estudiada en función a condiciones ideales como ser ancho de carril, visibilidad, velocidad de diseño, ciclo de semáforo, etc. Esas condiciones y tomando en cuenta las diferentes zonas de un área urbana la forma de estacionamiento cerca de la intersección es que se han establecido ábacos que nos proporcionan una capacidad básica ideal o teórica.

##### **2.9.2.2 Capacidad Práctica**

La capacidad práctica, es un concepto de que por diferentes razones no siempre se van a mantener las condiciones ideales en la circulación; por lo tanto, se debe colocar un factor de seguridad de por lo menos el 10% con referencia a la capacidad teórica.

### **2.9.2.3 Capacidad Real**

La capacidad real, es el producto de la capacidad práctica por una serie de factores que reducen la capacidad de una intersección como ser el % de vehículos pesados, los movimientos de giro y las condiciones de estacionamiento cercanos a la intersección.

## **2.10 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.

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.

El Manual de Capacidad de Carreteras de 1985, Special Report 209, del TRB, traducido al español por la Asociación Técnica de Carreteras de España, ha establecido seis niveles de servicio denominados: A, B, C, D, E y F, que van del mejor al peor.

- **Nivel de Servicio “A”**

Representa una circulación a flujo libre. Los usuarios, considerados en forma individual, están virtualmente exentos de los efectos de la presencia de otros en la circulación. Poseen una altísima libertad para seleccionar sus velocidades deseadas y maniobrar dentro del tránsito.

El nivel general de comodidad y conveniencia proporcionado por la circulación al motorista, pasajero o peatón, es excelente.

- **Nivel de Servicio “B”**

Está dentro del rango del flujo estable, aunque se empiezan a observar otros vehículos integrantes de la circulación. La libertad de selección de las velocidades deseadas sigue relativamente inafectada, aunque disminuye un poco la libertad de maniobra en relación con la del nivel de servicio A. El nivel de comodidad y conveniencia es algo inferior a los del nivel de servicio A, porque la presencia de otros comienza a influir en el comportamiento individual de cada uno.

- **Nivel de Servicio “C”**

Pertenece al rango del flujo estable; pero, marca el comienzo del dominio en el que la operación de los usuarios individuales se ve afectada de forma significativa por las interacciones con los otros usuarios. La selección de velocidad se ve afectada por la presencia de otros, y la libertad de maniobra comienza a ser restringida. El nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.

- **Nivel de Servicio “D”**

Representa una circulación de densidad elevada, aunque estable. La velocidad y libertad de maniobra quedan seriamente restringidas, y el conductor o peatón experimenta un nivel general de comodidad y conveniencia bajo. Los pequeños incrementos del flujo generalmente ocasionan problemas de funcionamiento.

- **Nivel de Servicio “E”**

El funcionamiento está en el, o cerca del, límite de su capacidad. La velocidad de todos se ve reducida a un valor bajo, bastante uniforme. La libertad de maniobra para circular es extremadamente difícil, y se consigue forzando a un vehículo o peatón a “ceder el paso”. Los niveles de comodidad y conveniencia son enormemente bajos, siendo muy elevada la frustración de los conductores o peatones. La circulación es normalmente inestable, debido a que los pequeños aumentos del flujo o ligeras perturbaciones del tránsito producen colapsos.

- **Nivel de Servicio “F”**

Representa condiciones de flujo forzado. Esta situación se produce cuando la cantidad de tránsito que se acerca a un punto, excede la cantidad que puede pasar por él. En estos lugares se forman colas, donde la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, extremadamente inestables.

### **3. CONGESTIONAMIENTO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS**

#### **3.1 INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS**

##### **3.1.1 Semáforos**

Los semáforos son dispositivos electromagnéticos y electrónicos proyectados específicamente para facilitar el control del tránsito de vehículos y peatones, mediante indicaciones visuales de luces de colores universalmente aceptados, como lo son el verde, amarillo y el rojo. Su finalidad principal es la de permitir el paso, alternadamente, a las corrientes de tránsito que se cruzan, permitiendo el uso ordenado y seguro del espacio disponible.

A medida que pasa el tiempo, el congestionamiento y los accidentes aumentan, por lo que para su atenuación, el uso de semáforos ha alcanzado un notable desarrollo. Actualmente no se puede suponer, en las grandes ciudades del mundo, que el control del tránsito no se realice con los sistemas más avanzados de semáforos, incluyendo la coordinación computarizada y la incorporación de detectores automáticos de vehículos, que dependiendo de su variación hacen que cambie en forma dinámica y continua el tiempo asignado a cada acceso de las intersecciones. Esto ha permitido establecer estrategias para el control del tránsito a lo largo de las diferentes horas del día a través de programas específicos para periodos de máxima y mínima demanda.

##### **3.1.1.1 Numero de Lentes y de Caras**

La lente es la parte de la unidad óptica que por refracción dirige la luz proveniente de la lámpara y de su reflector en la dirección deseada. Se recomienda que la cara de todo semáforo tenga cuando menos tres lentes: rojo, ámbar y verde y cuando más, cinco lentes: rojo, ámbar, flecha de frente ( $\uparrow$ ), flecha izquierda ( $\leftarrow$ ) y flecha derecha ( $\rightarrow$ ), donde el orden de colocación es el que se indica. Como excepción, algunos semáforos pueden llevar una o dos lentes solamente cuando se trata de semáforos de destello o indicadores de dirección. En semáforos con lentes en posición horizontal se sigue el mismo orden general, excepto que de las flechas se deben colocar primero la de vuelta

hacia la izquierda, seguida de la flecha hacia el frente y finalmente, la de vuelta hacia la derecha (← ↑ →).

La cara de un semáforo es el conjunto de unidades ópticas (lente, reflector, lámpara y portalámparas). Se recomiendan dos caras por cada acceso a la intersección, que pueden complementarse con semáforos para peatones. El doble semáforo permite ver las indicaciones aunque uno de ellos lo tape un vehículo grande, lo mismo que representa un factor de seguridad cuando hay exceso de anuncios luminosos o se funde alguna lámpara. La necesidad de colocar más de dos semáforos por acceso dependerá de las condiciones locales, tales como número de carriles, indicaciones direccionales, isletas para canalización, etc.

### **3.1.2 Ventajas y Desventajas**

Si la instalación y operación de los semáforos es correcta, éstos podrán aportar diversas ventajas. En cambio, si uno o más semáforos son deficientes, servirán para entorpecer el tránsito, tanto de vehículos como de peatones. Es muy importante que antes de seleccionar y poner a funcionar un semáforo, se efectúe un estudio completo de las condiciones de la intersección y del tránsito, se cumpla con los requisitos que la experiencia ha fijado. También es importante que después que el sistema de semáforos empiece a funcionar, se compruebe que éste responde a las necesidades del tránsito y, en su caso, que se hagan los ajustes pertinentes.

Un semáforo o un sistema de semáforos, que opere correctamente, tendrá una o más de las siguientes:

#### **VENTAJAS**

- Ordena la circulación del tránsito y en muchos casos, mediante una asignación apropiada del derecho al uso de la intersección, optimiza la capacidad de las calles.
- Reduce la frecuencia de cierto tipo de accidentes.
- Con espaciamientos favorables se pueden sincronizar para mantener una circulación continua, o casi continua, a una velocidad constante en una ruta

determinada. En algunos casos, esa velocidad constante, es conveniente reducirla para fines de seguridad.

- Permiten interrumpir periódicamente los volúmenes de tránsito intensos de una arteria, para conceder el paso de vehículos y peatones de las vías transversales.
- En la mayoría de los casos representan una economía considerable por su mayor habilidad en el control del tránsito con respecto a la utilización de otras formas de control, como por ejemplo, señales o policías de tránsito.

Cuando el proyecto o la operación de un semáforo o sistema de semáforos es deficiente, ya sea por falta de elementos de juicio, o bien porque se ha abusado de los semáforos como una panacea para resolver todos los problemas, puede presentarse una o varias de las siguientes:

#### **DESVENTAJAS**

- Se incurre en gastos no justificados para soluciones que podían haberse resuelto solamente con señales o en otra forma económica.
- Causan demoras injustificadas a cierto número de usuarios, especialmente tratándose de volúmenes de tránsito pequeños al causar retardos molestos por excesiva duración de luz roja o del tiempo total del ciclo.
- Producen reacción desfavorable en el público, con la consiguiente falta de respeto hacia ellos o hacia las autoridades.
- Incrementan el número de accidentes del tipo alcance, por cambios sorpresivos de color.
- Ocasionan pérdidas innecesarias de tiempo en las horas del día, cuando se presentan escasos volúmenes de tránsito que no requieren control de semáforos.
- Aumentan la frecuencia o gravedad de ciertos accidentes cuando la conservación es deficiente, especialmente en casos de focos fundidos o interrupciones del servicio eléctrico.
- En intersecciones rurales, la aparición intempestiva de un semáforo ocasiona accidentes cuando no hay avisos previos adecuados.

### **3.1.3 Semáforos de Tiempo Fijo**

Los semáforos de tiempo fijo, se utilizan en intersecciones donde los patrones de tránsito son relativamente estables, o en las que las variaciones de intensidad de la circulación se pueden adaptar a un programa previsto, sin ocasionar demoras o congestionamientos excesivos.

Los controles de tiempo fijo, se adaptan especialmente a intersecciones en las que se desea sincronizar el funcionamiento de los semáforos con los de otras instalaciones próximas.

Sus principales ventajas son las siguientes:

- Facilitan la coordinación con semáforos adyacentes, con más precisión que en el caso de semáforos accionados por el tránsito.
- No dependen de los detectores, por lo que no se afectan desfavorablemente cuando se impide la circulación normal de vehículos por los detectores.
- En general, el costo del equipo de tiempo fijo es menor que el de equipo accionado por el tránsito y su conservación es más sencilla.

El control de tiempo fijo sin mecanismo de sincronización es aconsejable para intersecciones aisladas de poca importancia, de las que no se prevea necesidad de coordinar con otras.

Si se hace necesario variar la duración del ciclo y su distribución durante el día, es preferible instalar un control del tipo accionado por el tránsito

Existe un sistema de control de tiempo fijo con mecanismo de sincronización, accionado por un motor, que se usa para intersecciones aislada cuando se prevea la necesidad de coordinar éstas con otros semáforos, que el semáforo sea supervisado por un control maestro. También debe ser aceptable la duración fija del ciclo y de los intervalos, todo el tiempo que dure la operación del control del tránsito. En algunos casos se puede emplear un control de dos o tres programas, para adaptarse con más flexibilidad a las variaciones del tránsito.

Excepto en intersecciones alejadas, donde la sincronización resulte impráctica, o en intersecciones secundarias comprendidas dentro de un sistema coordinado, en cuyo caso puede convenir más un control accionado por el tránsito, los semáforos de tiempo fijo se deben instalar sólo si se reúnen uno o más de los siguientes:

## REQUISITOS

### *1. Volumen Mínimo de Vehículos*

Aquí la intensidad del tránsito de las vías que se cruzan es la principal justificación. Se llena este requisito cuando en cualquiera de las ocho horas de un día representativo, se presenten los volúmenes mínimos indicados en la tabla 3.1

Los volúmenes para las calles principal y secundaria corresponden a las mismas ocho horas. El sentido del tránsito de mayor volumen en la calle secundaria puede ser para un acceso durante algunas horas y del otro sentido las restantes.

**Tabla N° 3.1** Volúmenes Mínimos

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal		Vehículos por hora en el acceso de mayor circulación de la calle secundaria	
Calle principal	Calle secundaria	Urbano	Rural	Urbano	Rural
1	1	500	350	150	105
2 o mas	1	600	420	150	105
2 o mas	2 o mas	600	420	200	140
1	2 o mas	500	350	200	140

### *2. Interrupción del Tránsito Continuo*

Se aplica cuando las condiciones de operación de la calle principal son de tal naturaleza que el tránsito en la calle secundaria sufre demoras, o riesgos excesivos, al entrar o cruzar la calle principal. El requisito se satisface cuando durante cada una de cualesquiera ocho horas de un día representativo, en la calle principal y en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria, se tienen los volúmenes mínimos indicados en la tabla 3.2 y si la instalación de semáforos no trastorna la circulación progresiva del tránsito.

**Tabla N° 3.2** Volumen mínima de vehículos

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal		Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)	
Calle principal	Calle secundaria	Urbano	Rural	Urbano	Rural
1	1	750	525	75	53
2 o mas	1	900	630	75	53
2 o mas	2 o mas	900	630	100	70
1	2 o mas	750	525	100	70

Los volúmenes para las calles principal y secundaria corresponden a las mismas ocho horas. Durante esas ocho horas, el sentido de circulación del volumen mayor de la calle secundaria, puede ser en un sentido por unas horas y en el otro por el resto. Si la velocidad media dentro de la cual circula el 85%, del tránsito de la calle principal excede de 60 km/h, o si la intersección está ubicada en una población de menos de 10 000 habitantes, el requisito se reduce al 70% de los valores indicados.

### 3. Volumen Mínimo de Peatones

Se satisface este requisito si durante cada una de cualesquiera de las ocho horas de un día representativo se tienen los siguientes volúmenes: 600 o más vehículos por hora en ambos sentidos en la calle principal, o bien 1 000 o más vehículos por hora si la calle principal tiene camellón y si durante las mismas ocho horas cruzan 150 o más peatones por hora, en el cruce de mayor volumen.

Cuando la velocidad promedio del 85% del tránsito exceda de 60 km/h o si la intersección está en una población de menos de 10 000 habitantes, el requisito se reduce al 70% de los valores indicados.

El semáforo que se instale conforme a este requisito en una intersección aislada, debe ser del tipo accionado por el tránsito con botón para uso de los peatones.

### 4. Circulación Progresiva

Este requisito se satisface en calles aisladas de un sentido y donde los semáforos, en caso de haber, están muy distantes entre sí para conservar los vehículos agrupados y a la velocidad deseada, y en el caso de una calle de doble circulación donde los

semáforos existentes no permiten el grado deseado de control, agrupamientos, velocidades, etc. En los sistemas alternos el espaciamiento entre un semáforo y los adyacentes, debe estar relacionado con la duración del ciclo (verde, ámbar y rojo), y con la velocidad de proyecto. No se debe considerar la instalación de semáforos bajo este requisito, si resultan espaciamientos menores de 300 metros.

##### 5. Antecedentes acerca de los Accidentes

Este requisito debe ir relacionado con alguno de los anteriores, ya que por sí solo no justifica la instalación de semáforos. En muchas ocasiones suceden más accidentes después de instalarlos que antes; por tanto, si ninguno de los requisitos, exceptuando el relativo a los accidentes, se satisface, debe presuponerse que no será necesario instalar el semáforo.

Los requisitos relativos a los accidentes se satisfacen:

- a) Si otros procedimientos menos restrictivos, que se han experimentado satisfactoriamente en otros casos, no han reducido la frecuencia de accidentes;
- b) Si cinco o más accidentes han ocurrido en los últimos doce meses, y cuyo tipo sea susceptible de corregirse con semáforos y en los que hubo heridos o daños físicos con valor mayor a treinta veces el salario mínimo vigente.
- c) Si existen volúmenes de peatones y vehículos, no menores del 80% de los que se especifican para los requisitos de los volúmenes mínimos.
- d) Si la instalación del semáforo no desorganiza la circulación progresiva del tránsito.

Los semáforos que se instalen con base en la experiencia de los accidentes deben ser del tipo semiaccionado. Si se instalan en una intersección aislada, deben ser totalmente accionados.

##### 6. Combinaciones de los Requisitos Anteriores

Cuando ninguno de los requisitos anteriores se cumplen en un 100%, pero dos o más se satisfacen en un 80% de los valores indicados para cada uno de ellos, se puede considerar justificada su instalación. Las decisiones, en estos casos excepcionales, deben basarse en un análisis completo de todos los factores que

intervienen. Antes de instalar semáforos de conformidad con el presente requisito, debe estudiarse la conveniencia de emplear otros métodos que ocasionen menos demoras al tránsito.

### **3.1.4 Distribución de los Tiempos del Semáforo**

Ya sea que la distribución de los tiempos en un semáforo se realice por métodos manuales o por modelación en computadoras, el ingeniero de tránsito necesita conocer los principios básicos que la sustentan. En ausencia de ese conocimiento, el ingeniero se verá en una posición relegada para poder interpretar correctamente los resultados y adaptarlos a las condiciones reales actuales de campo. En particular, la modelación por computadora no es más que un ejercicio de codificación, un acto de “fe ciega”. La ingeniería en lo que se refiere a la seguridad pública y la conveniencia, requiere mucho más que esto.

En una intersección, el flujo total de vehículos que llega a cada uno de sus accesos debe ser dividido en diferentes fases de movimiento, en cada una de las cuales se efectúa un desplazamiento específico de vehículos. Ciertos movimientos reciben el derecho al uso del espacio por medio de una señal verde o de siga, mientras que otros son detenidos con una señal de rojo o de alto.

En el análisis del control de intersecciones con semáforo y en los requisitos para la distribución de sus tiempos, es necesario precisar algunos términos básicos o parámetros de tiempo y así evitar posibles confusiones:

- **Indicación de señal:** Es el encendido de una de las luces del semáforo o una combinación de varias luces al mismo tiempo.
- **Ciclo o longitud de ciclo:** Tiempo necesario para que el disco indicador efectúe una revolución completa. En otras palabras, es el tiempo necesario para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.
- **Movimiento:** Maniobra o conjunto de maniobras de un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila.
- **Intervalo:** Cualquiera de las diversas divisiones del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones de señal del semáforo.

- **Fase:** Parte del ciclo asignada a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos. Es la selección y ordenamiento de movimientos simultáneos. Una fase puede significar un solo movimiento vehicular, un solo movimiento peatonal, o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales. Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que lo ganan. Un movimiento pierde el derecho de paso en el momento de aparecer la indicación ámbar.
- **Secuencia de fases:** Orden predeterminado en que ocurren las fases del ciclo.
- **Reparto:** Porcentaje de la longitud del ciclo asignado a cada una de las diversas fases.
- **Intervalo de despeje:** Tiempo de exposición de la indicación ámbar del semáforo que sigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.
- **Intervalo todo rojo:** Tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito que se prepara a circular. Es utilizado en la fase que recibe el derecho de paso después del ámbar de la fase que lo pierde, con el fin de dar un tiempo adicional que permita a los vehículos, que pierden el derecho de paso, despejar la intersección antes de que los vehículos, que lo ganan, reciban el verde. Se aplica sobre todo en aquellas intersecciones que sean excesivamente anchas. También puede ser utilizado para crear una fase exclusiva para peatones.
- **Intervalo de cambio de fase:** Intervalo que puede consistir solamente en un intervalo de cambio ámbar o que puede incluir un intervalo adicional de despeje todo rojo.

### 3.1.5 Cálculo de los Tiempos del Semáforo

Para obtener un mínimo de demoras, cada fase debe incluir el mayor número posible de movimientos simultáneos. Así se logrará admitir un mayor volumen de vehículos en la intersección. Este debe ser un objetivo permanente que no debe olvidarse.

En general, el número de fases diferentes debe reducirse al mínimo, considerando la seguridad y la eficiencia. La selección de los movimientos dentro de cada fase debe tender a reducir a un mínimo la frecuencia y gravedad de los puntos de conflicto. Igualmente, la secuencia de las fases debe tratar de reducir las demoras.

Como se mencionó anteriormente, una fase comienza con la pérdida del derecho de paso, final del verde, de los movimientos de los que están en conflicto con los que ganan el derecho. Esto es, la fase comienza con el ámbar que previene para detener los movimientos de los que pierden el derecho de paso y termina con el final del verde de los que lo tenían. Por tanto, una fase consta de un intervalo ámbar, uno todo rojo y uno verde.

La distribución de los tiempos de cada fase debe estar en relación directa con los volúmenes de tránsito de los movimientos correspondientes. En otras palabras, la duración de cada fase y del ciclo dependerá de la demanda.

Si los intervalos entre los vehículos que entran a una intersección, durante la hora de máxima demanda, es aproximadamente igual en los carriles críticos de las calles que se intersecan, la subdivisión del tiempo total del ciclo con indicación verde, será aproximadamente correcta si los lapsos correspondientes a cada calle se hacen directamente proporcionales a los volúmenes de tránsito en los carriles críticos.

### **3.1.6 Coordinación de Semáforos**

#### **3.1.6.1 Sistemas de Coordinación**

Los sistemas coordinados pueden, o no, estar sujetos a un control maestro. En caso de existir la interconexión puede lograrse mediante cables. En los controles locales de estos sistemas, se emplean motores de sincronización, de inducción, o bien, dispositivos electrónicos de tiempo.

En general, los semáforos de tiempo fijo dentro de un radio de 40 metros y que regulan las mismas condiciones de tránsito, deben funcionar coordinadamente, aún a distancias mayores, pueden resultar convenientes.

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

#### **3.1.6.1.1 Sistema Simultáneo**

Todos los semáforos muestran la misma indicación aproximadamente al mismo tiempo, útil para coordinar intersecciones muy cercanas. En condiciones de 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 e los demás. La relación entre la velocidad, ciclo y distancia, puede expresarse así:

---

Donde:

= velocidad de progresión entre intersecciones (km/h)

$D$  = distancia entre intersecciones (m)

$C$  = duración del ciclo (s)

#### **3.1.6.1.2 Sistema Alternado**

Los semáforos de intersecciones cercanas, por grupos, muestran indicaciones alternadas, a lo largo de una ruta. En el sistema sencillo tienen indicaciones contrarias en semáforos adyacentes. Los sistemas alternos dobles y triples constan de grupos de dos y tres semáforos que, respectivamente, muestran indicaciones contrarias. Mejora la circulación de los grupos de vehículos en comparación con el sistema anterior. Habrá más fluidez si las longitudes de las calles son más uniformes. En estas condiciones se consigue una banda del 100% siempre y cuando la velocidad de los vehículos sea:

No se adapta muy bien cuando las cuerdas son desiguales. El sistema doble reduce la capacidad de la calle con los volúmenes altos. El sistema alterno es operado con un solo control; pero, puede usar controles individuales, lo que es una ventaja sobre el sistema anterior.

#### **3.1.6.1.3 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 continua de grupos de vehículos a velocidad fija en “ondas verdes”. Cada intersección puede tener una división diferente de ciclo; pero, dicha división permanece fija. Este sistema puede estar supervisado por un control maestro, para mantener las relaciones debidas de tiempo entre las indicaciones de los semáforos. Es necesario realizar revisiones periódicas de los controles, por variaciones debidas a cambios de voltaje y temperatura.

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 tanteos, y no hay fórmula que relacione el ciclo con la velocidad de cruce y el tiempo de la faja disponible.

#### **3.1.6.1.4 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 carátulas múltiples, se pueden establecer varios programas para subdividir el ciclo. Además, es posible cambiar los desfases con la frecuencia deseada. Se pueden establecer programas de tiempo predeterminado 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 éste pueden variar en función de los cambios de volumen de vehículos. Con base en la variación de los volúmenes de tránsito y la selección de la velocidad adecuada, se puede lograr un movimiento continuo a lo largo de una arteria, especialmente si es de un solo sentido. La supervisión de los controles individuales de las intersecciones se logra desde un control maestro a través de circuitos interconectados por medio de señales de radio o bien, por intermedio de líneas, telefónicas. Para obtener la máxima flexibilidad de este sistema, los recuentos de tránsito se deben efectuar frecuentemente. Este sistema es el que da mejores resultados para intersecciones ubicadas a distancias variables.

El arreglo más usual en áreas urbanas proporciona tres diferentes programas: a) dando prioridad al flujo de entrada a la zona comercial, durante la mañana; b) equilibrando ambas direcciones de movimiento, fuera de las horas de máxima demanda; c) dando prioridad al flujo que sale de la zona comercial, en el otro periodo de grandes volúmenes.

### **3.1.7 Diagrama Espacio-Tiempo**

Mediante el diagrama espacio-tiempo, se pueden proyectar los desfases para obtener un movimiento continuo a lo largo de una arteria.

Como complemento del método gráfico, puede verificarse el proyecto por el método matemático, que permite conocer a fondo las condiciones en que funcionará el sistema. El ejemplo de dicho diagrama, que se presenta a continuación, ilustra los diferentes factores que intervienen.

Así, por ejemplo, el desfase entre la intersección A y la intersección B es:

—

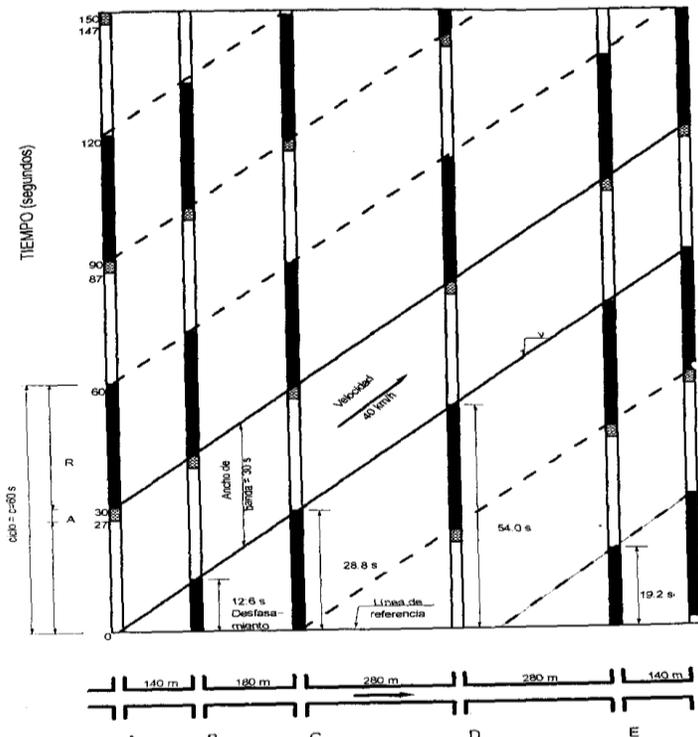


Figura N° 3.1 Diagrama Espacio-Tiempo

Todo proyecto de movimiento progresivo por este sistema debe ser comprobado sobre el terreno mediante mediciones de velocidad y de recorrido, una vez que operen los semáforos. En general, se realizarán los ajustes necesarios que, a su vez, serán verificados con otras mediciones. Como complemento, se recomienda instalar señales de tránsito indicando la velocidad a la cual se pueden desplazar los vehículos

### 3.1.8 Capacidad en Intersecciones con Semáforo

La capacidad en una intersección con semáforo se define para cada acceso, como la tasa de flujo máxima que puede pasar a través de la intersección bajo condiciones prevalecientes de tránsito, de la calle y del semáforo. Se mide en vehículos por hora (vph.) con base en flujos que tienen periodos pico de 15 minutos.

Las condiciones prevalecientes del tránsito incluyen los volúmenes por tipo de movimiento (izquierda, directo, derecha), su composición vehicular (automóviles, autobuses, camiones), maniobras de estacionamiento, conflictos peatonales y

paradas de autobuses. Las condiciones prevalecientes de la calle describen las características geométricas de los accesos en términos del número y ancho de carriles, pendientes y uso de carriles incluyendo carriles de estacionamiento. Las condiciones prevalecientes del semáforo incluyen la secuencia de fases, asignación de tiempos y el tipo de operación o control.

Entonces, para el análisis de la capacidad se debe calcular la relación volumen a capacidad ( $v/c$ ) para movimientos críticos en carriles simples o grupos de carriles en todo el acceso. La relación se determina dividiendo, para los 15 minutos pico, el flujo actual y del acceso o grupo de carriles entre su capacidad  $c$ . Un grupo de carriles, es un conjunto de carriles de un acceso que carga un conjunto de flujos vehiculares, formado con base en las características geométricas del acceso y en las características de los flujos vehiculares.

Para determinar la capacidad de un grupo de carriles se usa el concepto de flujo de saturación  $s$ . Se define como la tasa máxima de flujo, en un acceso o grupo de carriles, que puede pasar a través de la intersección bajo las condiciones prevalecientes del tránsito y la calle, suponiendo que dicho acceso o grupo de carriles tiene el 100% del tiempo disponible como verde efectivo. Se expresa en vehículos por hora de luz verde ( $vphv$ ). Por tanto, la capacidad para un acceso o grupo de carriles se define por:

Donde:

—

$C_i$  = capacidad del acceso o grupo de carriles  $i$  ( $vph$ )

$S_i$  = flujo de saturación del acceso o grupo de carriles  $i$  ( $vphv$ )

$g_i$  = tiempo verde efectivo para el acceso o grupo de carriles  $i$  (seg)

$C$  = ciclo del semáforo (sr)

$g_i / C$  = relación de verde para el acceso o grupo de carriles  $i$

Para un acceso o grupo de carriles  $i$ , a la relación ( $v/c$ ) se la llama grado de saturación.

### **3.1.9 Niveles de Servicio en Intersecciones con Semáforo**

El nivel de servicio de una intersección con semáforo se define a través de las demoras, las cuales representan para el usuario una medida del tiempo perdido de viaje, del consumo de combustible, de la incomodidad y de la frustración. Específicamente, el nivel de servicio se expresa en términos de la demora media por vehículo debida a las detenciones para un periodo de análisis de 15 minutos.

#### *1. Nivel de servicio A*

Operación con demoras muy bajas, menores de 5.0 segundos por vehículo. La mayoría de los vehículos llegan durante la fase verde y no se detienen del todo. Longitudes de ciclo corto puede contribuir a demoras mínimas.

#### *2. Nivel de servicio B*

Operación con demoras entre 5.1 y 15.0 segundos por vehículo. Algunos vehículos comienzan a detenerse.

#### *3. Nivel de servicio C*

Operación con demoras entre 15.1 y 25.0 segundos por vehículo. La progresión del tránsito es regular y algunos ciclos empiezan a malograrse.

#### *4. Nivel de servicio D*

Operación con demoras entre 25.1 y 40.0 segundos por vehículo. Las demoras pueden deberse a la mala progresión del tránsito o llegadas en la fase roja, longitudes de ciclo amplias, o relaciones de v/c muy altas. Muchos vehículos se detienen y se hacen más notables los ciclos malogrados.

#### *5. Nivel de servicio E*

Operación con demoras entre 40.5 y 60.0 segundos por vehículo. Se considera como el límite aceptable de demoras. Las demoras son causadas por progresiones pobres, ciclos muy largos y relaciones de v/c altas.

#### *6. Nivel de servicio F*

Operación con demoras superiores a los 60.0 segundos por vehículo. Los flujos de llegada exceden la capacidad de la intersección, lo que ocasiona congestión y operación saturada.

### **3.1.10 Metodología de Análisis Operacional de Intersecciones con Semáforo**

Mediante el análisis operacional, se determina la capacidad y el nivel de servicio de cada grupo de carriles o acceso, lo mismo que el nivel de servicio de la intersección como un todo o globalmente. Como este análisis es bastante complejo, el procedimiento para simplificar las actividades a llevar a cabo se dividen en cinco módulos.

#### *1. Módulo de entrada*

- Condiciones geométricas
- Condiciones del tránsito
- Condiciones de los semáforos

#### *2. Módulo de ajuste de volúmenes*

- Factor de la hora de máxima demanda
- Establecimiento de grupos de carriles
- Asignación de volúmenes a grupos de carriles

#### *3. Módulo de flujo de saturación*

- Flujo de saturación ideal
- Ajustes

#### *4. Módulo de análisis de capacidad*

- Cálculo de las capacidades por grupos de carriles
- Cálculo de la relación  $v/c$  por grupos de carriles
- Resultados agregados

#### *5. Módulo de nivel de servicio*

- Cálculo de demoras por grupos de carriles
- Demoras agregadas
- Determinación del nivel de servicio

## 3.2 CONGESTIONAMIENTO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

### 3.2.1 Elementos de un Sistema de Filas de Espera

Para caracterizar un fenómeno de espera en un sistema vial de servicios es necesario responder a interrogantes tales como:

- ¿A qué hora empieza y termina el congestionamiento?
- ¿Cuál es el número medio de vehículos en el sistema?
- ¿Cuál es el número medio de vehículos en la cola?
- ¿Cuál es el tiempo medio en el sistema?
- ¿Cuál es el tiempo medio de espera o demora media?
- ¿Cuál es la longitud máxima de cola?
- ¿Cuál es la demora máxima?
- ¿Cuál es la demora total de todo el tránsito?
- ¿Cuál es la proporción de tiempo en que se utiliza el sistema?
- ¿Cuál es la proporción de tiempo cuando el sistema permanece inactivo?

Se genera una cola cuando los usuarios (vehículos) llegan a una estación de servicio cualquiera, ya sea, por ejemplo, un estacionamiento, una intersección con semáforo o no, un “cuello de botella”, un enlace de entrada a una autopista, un carril especial de vuelta, etc. La prestación del servicio para cada llegada toma cierto tiempo y puede ofrecerlo una más estaciones.

Los vehículos llegan al sistema a una tasa de llegadas  $\lambda$ . Entran a la estación de servicio si está desocupada, donde son atendidos a una tasa media de servicio  $\mu$ , equivalente a la tasa de salidas. Si la estación de servicio es ocupada se forman en la cola a esperar ser atendidos.

Frecuentemente, tanto la tasa de llegadas como la tasa de servicio varían, causando que también varíe la cola. Se define la cola como el número de vehículos que esperan ser servidos, sin incluir aquellos que están siendo atendidos.

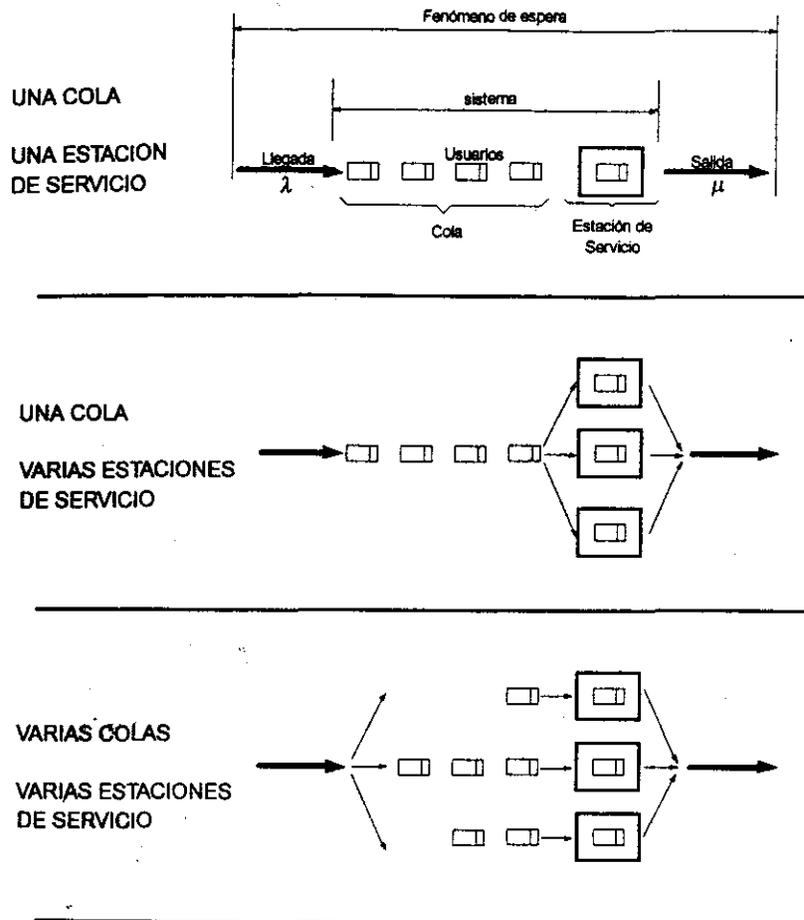


Figura N° 3.2 Elementos de un Sistema de Filas

Para considerar de una manera apropiada un sistema de filas de espera es necesario tener en cuenta la naturaleza de su comportamiento, puesto que tanto las llegadas como los servicios varían con el tiempo. En este sentido, el comportamiento de la cola y los modelos necesarios para describirla, o caracterizarla, dependen de la representación explícita de los siguientes elementos que conforman el proceso:

*1. Las llegadas (demanda) o características de entrada*

Las llegadas pueden ser expresadas en términos de tasas de flujo (vehículos/hora) o intervalos de tiempo (segundos/vehículo). Su distribución puede ser de tipo determinístico o probabilístico.

*2. Los servicios (capacidad) o características de salida*

También pueden ser expresados como tasas de flujo o intervalos, y su distribución también puede ser de tipo determinístico o probabilístico.

### *3. El procedimiento de servicio o disciplina de la cola*

En la mayoría de los sistemas viales el procedimiento de servicios consiste en que el primero que llega es el primero que sale.

El régimen que define las características de un fenómeno de espera se denota por tres valores alfanuméricos representados de la siguiente manera:

Donde:

= identifica el tipo de llegadas

= identifica el tipo de servicios o salidas

= identifica el número de estaciones de servicio

Por ejemplo, un fenómeno de espera con un régimen  $D/D/1$  supone llegadas y salidas de tipo determinístico o a intervalos uniformes con una estación de servicio.

Por otra parte, un régimen  $M/M/1$  supone llegadas y salidas de tipo probabilístico o distribuidas exponencialmente con una estación de servicio.

### **3.2.2 ANÁLISIS DETERMINÍSTICO DEL CONGESTIONAMIENTO**

Tal como se mencionó, el análisis determinístico consiste en el cálculo preciso del valor de una variable en función de ciertos valores específicos que toman otras variables. Esto es, solamente ocurrirá un valor de la función objetivo para un conjunto dado de valores de las variables de entrada.

En situaciones de congestionamiento, donde los patrones de llegada y servicios son altos, los enfoques a nivel macroscópico son los que más se aproximan a este fenómeno, describiendo la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios.

#### **3.2.2.1 Análisis de Intersecciones con Semáforo con Régimen D/D/1**

La intersección con semáforo es uno de los ejemplos más típicos de un fenómeno de espera, puesto que por la presencia de la luz roja siempre existirá la formación de colas de vehículos. Con el propósito de entender de una manera

clara y sencilla, el siguiente ejemplo describe, gráfica y analíticamente, los diversos elementos que caracterizan este fenómeno, bajo condiciones saturadas del tránsito, esto es, en cada ciclo las llegadas son menores que la capacidad del acceso. En este caso los vehículos que se encuentran en la cola no esperan más de un ciclo para ser servidos por el semáforo o estación de servicio.

La capacidad de un acceso a una intersección con semáforo se expresa en término definitivo de saturación. Cuando el semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos a través de la línea de ALTO, se incrementa rápidamente a una tasa equivalente al flujo de saturación, la cual se mantiene constante hasta que la cola se disipa o hasta que termina el verde. El flujo de saturación es la tasa máxima de salidas que puede ser obtenida cuando existen colas.

La tasa de salidas  $\mu$  presenta tres estados:

, cuando el semáforo muestra la indicación roja.

, cuando el semáforo muestra la indicación verde y aún existe

, cuando sin existir cola el semáforo continúa en verde, esto es, los vehículos salen de la intersección a la misma tasa a la que llegan.

Llegadas = Demanda

Servicio máximo

Con la información anterior se pueden calcular los siguientes indicadores de efectividad:

**Tiempo para que se disipe la cola después del verde efectivo ( ):**

—

Si se expresa la tasa de llegadas como proporción de la tasa de salidas  $\mu$  se obtiene:

**Factor de utilización o intensidad del tránsito:**

$$- \quad (3.5)$$

En este caso,

Reemplazando en la ecuación (3.4):

$$\frac{\quad}{\quad} \quad (3.6)$$

También puede verse que:

**De donde el rojo efectivo es**

Por lo tanto:

—

**Proporción del ciclo con cola ( )**

—————

$$\frac{\quad}{\quad} \quad (3.8)$$

**Proporción de vehículos detenidos ( )**

—————

—————

—————

—————

$$(3.9)$$

**Longitud máxima de la cola ( )**

Obsérvese que la longitud de la cola (Q) en cualquier instante es igual a la demanda menos el servicio:

**La longitud máxima de la cola** ocurre al final del rojo, donde el servicio aún es cero, y es igual a:

$$(3.10)$$

**Longitud promedio de la cola mientras exista** ( ):

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (3.11)$$

**Longitud promedio de la cola por ciclo** ( ):

$$\frac{\text{---} \quad \text{---}}{\text{---}} \quad \frac{\text{---}}{\text{---}}$$

**Demora máxima que experimenta un vehículo** ( )

**Demora total para todo el tránsito por ciclo** ( ):

La demora total para todo el tránsito por ciclo es igual al área del triángulo sombreado:

$$\text{---} \quad \text{---}$$

Reemplazando el valor de  $t_0$  dado por la ecuación (3.6), se tiene:

$$\frac{\text{---}}{\text{---}}$$

**Demora promedio del tránsito por ciclo** ( ):

Se obtiene dividiendo la demora total entre el número de vehículos:

$$\frac{\text{---}}{\text{---}}$$

## **4. APLICACIÓN PRÁCTICA**

### **4.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El estudio “Análisis del Congestionamiento en Intersecciones Semaforizadas”, comprende su ubicación en la ciudad de Tarija-Bolivia. Son 23 las intersecciones seleccionadas como muestra, de un total de 79 intersecciones semaforizadas con las que cuenta actualmente la ciudad de Tarija.

La selección de puntos, se llevó a cabo con el criterio de muestreo uniforme, lo que quiere decir que se tomaron puntos que se consideren representativos para cada sector o zona de la ciudad.

Se tuvo en cuenta los alrededores de la ciudad, el casco viejo o área urbana céntrica, y puntos considerados conflictivos. La ubicación exacta se la representa gráficamente en el plano de Anexos

### **4.2 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio son las diferentes intersecciones seleccionadas, las características geométricas, como el ancho de los accesos, se detallan en los diferentes croquis que corresponden a cada una de ellas.

La ubicación de los semáforos también se encuentra en los detalles de croquis, las paradas de transporte público y la especificación de existencia o no de estacionamiento, las diferentes líneas de autobuses públicos que atraviesan cada uno de los accesos en cada intersección si es que existiera este servicio público en el punto estudiado.

Se tendría que resaltar que son un total de 23 intersecciones las estudiadas y 61 los accesos, que se encuentran dentro de ellas. Las intersecciones las podemos dividir por el número de accesos, se cuenta con:

- Cinco intersecciones de cuatro accesos
- Ocho intersecciones de tres accesos
- Diez intersecciones de dos accesos

Las zonas de estudio seleccionadas se las puede dividir según corresponda su ubicación

- Av. Circunvalación (alrededores de la ciudad)

- Av. Panamericana (alrededores de la ciudad)
- Casco viejo ( zona central de la ciudad)
- Puntos intermedios

### **4.3 ANÁLISIS DEL FLUJO VEHICULAR**

Se debe realizar un análisis del comportamiento del flujo vehicular que pasa por cada una de las intersecciones seleccionadas para tomar en cuenta los días y las horas que se pueden considerar de mayor demanda, días en los cuales pueda existir algún tipo de obstrucción que pueda dificultar o altere el normal funcionamiento o tránsito vehicular. Además de eso, la zona en la que se encuentran para caracterizarla en comercial o no comercial, alrededor de la zona central o no, y la distribución de los diferentes puntos que acogen aglomeraciones de personas, porque esto implicaría mayor demanda vehicular en esos puntos.

#### **4.3.1 Determinación de Días Conflictivos para el Tránsito Vehicular en Cada Intersección**

Para el aforo del flujo vehicular se hizo la consideración de realizar los aforos durante los días considerados de mayor demanda vehicular; pero, se toma una muestra de tres días a la semana durante un periodo de un mes. Para eso se trató de considerar los llamados días de mayor conflicto vehicular.

Los días conflictivos considerados por razones que se detallan a continuación son los siguientes:

- *Intersecciones de la Av. Circunvalación:*

Se toma en cuenta los días lunes, miércoles y sábado, por considerarse que esta arteria vial constituye una calle de flujo principal, ya que sirve para intercomunicar la zona norte y la zona sur de la ciudad, además de eso se constituye en una receptora del flujo que genera la zona central de la ciudad.

- *Intersecciones de la Av. Panamericana*

Se pueden considerar tres días a la semana, pero la semana debe estar comprendida entre los días lunes a viernes, por tratarse de una zona central-intermedia y además de ello es una vía receptora y alimentadora de la zona central.

- *Intersecciones del casco viejo (zona central)*

Las intersecciones del casco viejo de la ciudad ( las que se encuentran en alrededores de la plaza principal), también contemplan tres días de la semana que están comprendidos entre los días lunes a viernes, debido al funcionamiento de las diferentes instituciones que prestan sus servicios a la colectividad.

- *Demás intersecciones intermedias*

Las intersecciones sobrantes que generalmente se encuentran en puntos considerados intermedios a aquellos que no son afectados por el funcionamiento en la zona central ni en las calles principales, se tomo el criterio de que su máxima demanda se produce en los días de lunes a viernes durante la respectiva semana por ser alimentadoras del sistema vehicular de la zona central.

#### **4.3.2 Determinación de Horas Pico de Congestionamiento**

Es necesario conocer las horas en las que la intersección funciona a su máxima demanda; por ello, se tomó un acceso para cada intersección y en él se realizo el respectivo diagrama de distribución horaria-volumétrica vehicular.

La medición contempla la cantidad de vehículos que atraviesan el acceso en una hora, durante un periodo de 12 horas que se contemplan desde las siete de la mañana hasta las siete de la noche.

Se hizo la caracterización de que se tomara una hora de máxima demanda en la mañana, otra al medio día y la restante en la tarde, teniendo como conclusión que los accesos de la intersección se aforan durante una hora en la mañana, al medio día, y otra en la tarde correspondientes a las horas de máxima demanda.

Debido a la cantidad de intersecciones, cantidad de accesos por analizar y el poco tiempo con el que se dispone como forma de abreviar el proceso, se tomó la

consideración de que los aforos se los realizará durante un periodo de quince minutos, los cuales deben estar incluidos dentro de las horas pico (máxima demanda).

#### **4.4 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD VEHICULAR DE LAS INTERSECCIONES SELECCIONADAS**

La capacidad vehicular con la que cuenta cada uno de los accesos de las intersecciones, depende de los siguientes parámetros:

- % de vehículos pesados que atraviesan el acceso
- % de vehículos que giran a la izquierda
- % de vehículos que giran a la derecha
- Ancho del acceso
- Existencia de paradas de transporte público antes y después de las intersecciones

Obstrucción por el estacionamiento permitido en cada uno de los accesos

##### **4.4.1 Determinación de los Diferentes Parámetros que son Necesarios para el Cálculo de la Capacidad en Vías Urbanas.**

Los parámetros necesarios para llevar a cabo el estudio se detallan a continuación.

###### **4.4.1.1 Ancho de Carril de la Calle**

La medición de los diferentes accesos se lo realiza con ayuda de una cinta métrica tomando en cuenta que dicha medición debe realizarse en la línea de pare antes del paso de cebra.

###### **4.4.1.2 Determinación del Porcentaje de Vehículos Pesados.**

La determinación de los vehículos pesados y el porcentaje que constituyen del flujo vehicular que atraviesa el acceso, se lo realizó tomando en cuenta la siguiente gráfica.

Son vehículos pesados todos aquellos y similares que se muestran en la gráfica.

NOMBRE	SÍMBOLO
OMNIBUS de 2 EJES	
OMNIBUS de 3 EJES	
OMNIBUS de 4 EJES	
CAMIÓN de 2 Ejes	
CAMIÓN de 3 Ejes	
CAMIÓN de 4 Ejes	
REMOLCADOR O TRACTO-CAMIÓN de 2 Ejes	
REMOLCADOR O TRACTO-CAMIÓN de 3 Ejes	

Figura N° 4.1 Selección de vehículos pesados

#### 4.4.1.3 Determinación del Porcentaje de Vehículos que Giran a la Izquierda y/o a la Derecha

El conteo de los vehículos tanto que hacen el giro hacia la izquierda y/o la derecha se realiza por simple observación, sin perder la característica de si el vehículo es pesado o no.

Se debe de tomar en cuenta que no todas las intersecciones cuentan con la posibilidad de ofrecer ambos giros, ya que sólo cuentan con dos accesos en algunos casos no se cuenta con el paso de frente lo que quiere decir que el 100% de flujo vehicular realiza la maniobra de giro, esto ocurre en las intersecciones de cuatro accesos.

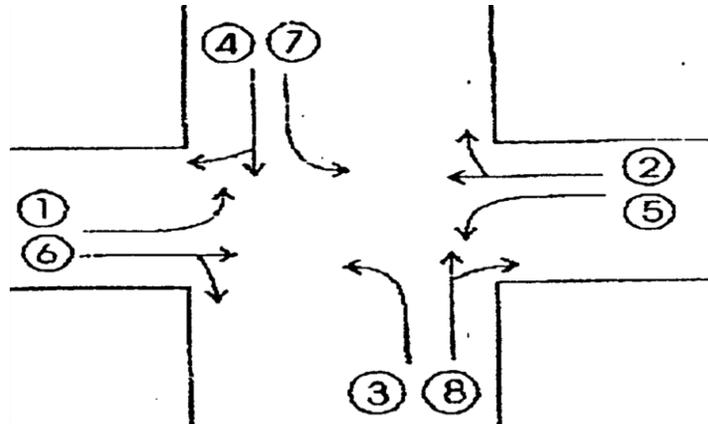


Figura N° 4.2 Esquema de giros en intersecciones

#### 4.4.2 Determinación de los Tiempos de Fase y de Ciclo de los Semáforos que Componen las Intersecciones Semaforizadas

Se debe resaltar que el ciclo de los semáforos que funcionan actualmente en cada una de las intersecciones sigue la siguiente secuencia ROJO-VERDE-AMARILLO. Los tiempos que corresponden a cada uno de los semáforos en cada uno de los accesos se detallan en los diferentes croquis correspondientes.

#### 4.4.3 Determinación de la Capacidad Vehicular de las Intersecciones Semaforizadas

Para la determinación de la capacidad vehicular en los diferentes accesos de las intersecciones se utilizaron las siguientes fórmulas:

La capacidad ideal es aquella capacidad básica que puede tener una vía urbana que depende básicamente del ancho del acceso, de la presencia de estacionamiento lateral y de la posición de la vía respecto al entorno urbano; es decir, si está en una zona central, zona intermedia, o zona extrema de la ciudad.

Para determinar el valor de la capacidad ideal, se han establecido 2 ábacos, una para calles en un solo sentido y otra para calles de doble sentido.

La capacidad práctica es aquella que resulta de restarle un 10% a la capacidad ideal, en teoría, este resultado se obtiene de las investigaciones dadas en un conjunto de intersecciones y la variabilidad da como resultado una disminución del 10%.

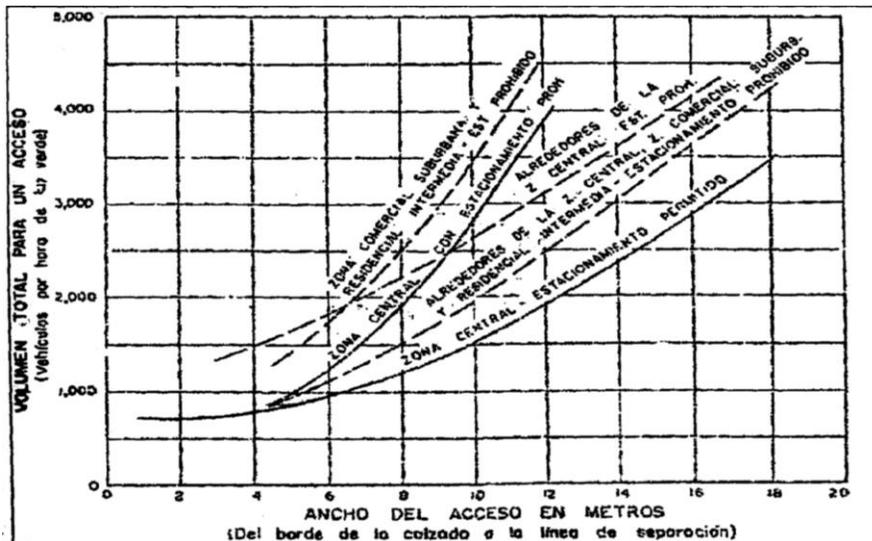


Figura N° 4.3 Ábaco Para Determinar la Capacidad Ideal en Accesos de un Solo Sentido

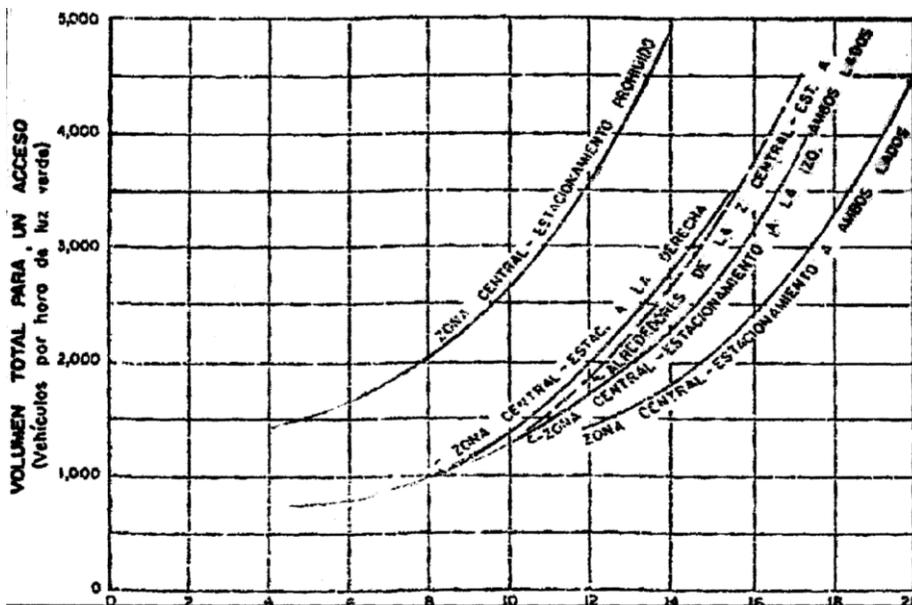


Figura N° 4.4 Ábaco para Determinar la Capacidad Ideal en Accesos de Dos Sentidos

## **Factores de Reducción**

En la práctica existen diferentes factores que de una u otra manera influyen en la capacidad y por ello normalmente la reducen como ser los giros, la cantidad de vehículos pesados, las paradas antes y después de la intersección y los estacionamientos. Para ello tenemos los siguientes indicadores, para la determinación del % de reducción:

### **1° CASO**

Calles con circulación en ambos sentidos, sin carriles suplementarios, ni indicaciones especiales de semáforos para los movimientos de giro, para este caso, se sigue el siguiente procedimiento:

- a) La capacidad práctica son un 10% más bajo que los valores dados por el auto.
- b) Sustraer un 1% por cada 1% que los omnibuses y camiones pasen del 10% del # total de vehículos.
- c) Sustraer un 0,5 % por cada 1% que el tráfico que gira a la derecha pase del 10 % del volumen total.
- d) Sustraer un 1 % para cada 1 % en que el tráfico que gira a la izquierda pase del 10 % del volumen total.

En ningún caso debe superar el 20% de reducción por movimiento de giro a la izquierda y la derecha.

- e) Por parada de omnibuses antes de la intersección restar el 10% y por parada después de la intersección restar el 5 % en zonas centrales 10% en zonas intermedias.
- f) Por estacionamiento permitido restar 1,8 m del ancho de acceso y luego hacer las condiciones ya indicadas.

### **2° CASO**

Calles con circulación en ambos sentidos con carril suplementario para este caso la metodología que se sigue es la siguiente.

- a) Se utiliza como capacidad práctica el valor del ábaco

- b) Añadir 5 % por carril suplementario a la derecha, 10 % por carril suplementario a la izquierda y 15% cuando existan carriles suplementarios a ambos lados del acceso.
- c) Reducir por camiones y omnibuses 1% por cada 1% que pasen de 10% del volumen total de vehículos.

### **3º CASO**

Calles con circulación en 1 sentido

La metodología es la siguiente.

- a) Se considera como capacidad practica 10% menor al valor obtenido en el ábaco.
- b) Se reduce por omnibuses y camiones 1% por cada 1% que excede del 10% del volumen total.
- c) Sustraer el 0,5 % por cada 1% del tráfico que gira a la derecha que pase del 10 % del tráfico total.
- d) Sustraer el 1% por cada 1% del tráfico que gira a la izquierda y pasa del 10% del volumen total.
- e) Por paradas de omnibuses antes de la intersección restar 10% si está después de la intersección 5% en zonas centrales y 10% en zonas intermedias.
- f) Por estacionamiento permitido restar 1,8 m del ancho de acceso y luego hacer las correcciones ya indicadas.
- g) Agregar el 5% por carril suplementario para giros derecha y para giros izquierda y 10% si existen carriles suplementarios en los accesos.

Para todos los casos si la intersección es semaforizada, realizar una reducción de la capacidad en función a la hora verde.

#### 4.5 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS BÁSICOS PARA CUANTIFICAR EL CONGESTIONAMIENTO

Para determinar todos los parámetros que son necesarios para cuantificar el congestionamiento, lo que se hizo fue utilizar el Análisis Determinístico con régimen D/D/1, donde se aplicaron las diferentes fórmulas.

Datos de entrada

Flujo de Saturación (S)	Tasa media de llegadas ( $\lambda$ )	Flujo de Saturación (S)	Tasa media de llegadas ( $\lambda$ )	Longitud de ciclo ( C )	Verde efectivo (g)
[ veh/h ]	[ veh/h ]	[ veh/seg ]	[ veh/seg ]	[ seg ]	[ seg ]

##### Factor de utilización o intensidad del tránsito

$$\rho = \frac{\lambda}{s}$$

##### Longitud del ciclo

$$C = r + g$$

##### Rojo efectivo

$$r = C - g$$

##### Tiempo para que se disipe la cola después del verde efectivo

$$t_o = \frac{\rho * r}{1 - \rho}$$

##### Proporción del ciclo con cola

$$P_q = \frac{\text{tiempo en cola}}{\text{longitud del ciclo}}$$

$$P_q = \frac{r + t_o}{C}$$

##### Proporción de vehículos detenidos

$$P_s = \frac{\text{vehiculos detenidos}}{\text{vehiculos totales por ciclo}}$$

$$P_s = \frac{t_o}{\rho * C}$$

##### Longitud máxima de la cola

$$Q_m = \lambda * r$$

### Longitud promedio de la cola por ciclo

$$\bar{Q} = \frac{r + t_o}{C} * \left( \frac{\lambda * r}{2} \right)$$

### Demora máxima que experimenta un vehículo

$$d_m = r$$

### Demora total para todo el tránsito por ciclo (D)

$$D = \frac{\lambda * r^2}{2(1 - \rho)}$$

### Demora promedio del tránsito por ciclo (d)

$$d = \frac{r^2}{2C(1 - \rho)}$$

## 4.6 NIVEL DE SERVICIO CON QUE CUENTAN CADA UNA DE LAS INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

La determinación del nivel de servicio con que cuenta cada uno de los accesos de la intersección está basada en los tiempos de demora para lo cual se tiene la siguiente tabla.

Tabla N° 4.1 Tabla de Niveles de Servicio

NIVEL DE SERVICIO	CARACTERISTICA DE OPERACIÓN DEL ACCESO	TIEMPO DE DEMORA (seg/veh)
<b>A</b>	La mayoría de los vehículos llegan durante la fase verde y no se detienen del todo	<b>d &lt; 5</b>
<b>B</b>	Algunos vehículos comienzan a detenerse	<b>5,1 &lt; d &lt; 15</b>
<b>C</b>	La progresión del tránsito es regular y algunos ciclos empiezan a malograrse	<b>15,1 &lt; d &lt; 25</b>
<b>D</b>	Las demoras pueden deberse a la mala progresión del tránsito o llegadas en fase roja, longitud de ciclo amplias, relación v/c altas	<b>25,1 &lt; d &lt; 40</b>
<b>E</b>	Límite aceptable de demoras. Las demoras son causadas por progresiones pobres, ciclos muy largos y relaciones de v/c altas	<b>40,1 &lt; d &lt; 60</b>
<b>F</b>	Los flujos de llegada exceden la capacidad de la intersección, lo que ocasiona congestión y operación saturada	<b>d &gt; 60</b>

#### 4.7 ANÁLISIS DE VARIABLES RELACIONADAS CON EL CONGESTIONAMIENTO VEHICULAR PARA INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

En la red vial de las zonas urbanas, las intersecciones semaforizadas tienen un papel importante en la regulación del tránsito, pues de su adecuado funcionamiento dependen la seguridad, movilidad y eficiencia de la circulación. En el presente trabajo se realiza el análisis del congestionamiento en las intersecciones semaforizadas. Para ello se ejecutaron todos los trabajos de campo necesarios. Estos permitieron determinar, aplicando procedimientos analíticos modernos, la capacidad en cada uno de los accesos de las intersecciones y los niveles de servicio correspondientes. Luego, a partir de los resultados obtenidos, se realizaron los análisis adecuados.

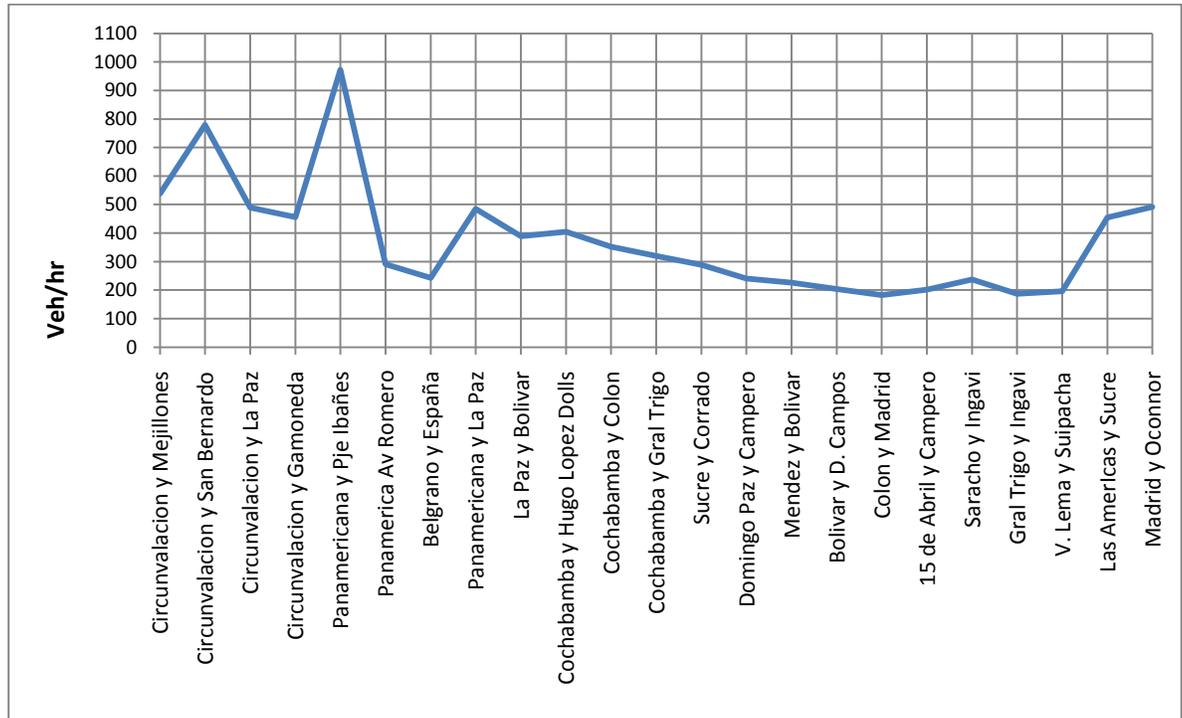
Los análisis corresponden a los parámetros más relevantes en un congestionamiento vehicular y por tanto, se toma como referencia los accesos más desfavorables, ya que son estos los que ocasionan el mayor congestionamiento, si se quisiera encontrar o tomar acciones para resolver problemas que se ocasionan por el congestionamiento se debe comenzar por analizar los accesos más conflictivos.

**Tabla N° 4.2** Resumen del Análisis de Congestionamiento

	INTERSECCIONES SELECCIONADAS	Capacidad ( veh /h)	Volumen ( veh /h)	Flujo de Saturación ( veh /h)	Longitud de Cola (veh)	Tiempo de Demora (seg)	TIEMPOS SEMAFORO			Tiempo para disipar la Cola (seg)	Nivel de Servicio	Acceso Crítico
							ROJO (seg)	AMA (seg)	VERD (seg)			
	<b>CALLE Y O AVENIDA</b>											
1	Circunvalación y Mejillones	538	602	1076	4	61,44	16	2	18	22,842	F	A
2	Circunvalación y San Bernardo	779	922	1558	6	125,55	18	2	20	29,011	F	A
3	Circunvalación y La Paz	489	690	1027	5	141,56	20	2	20	45,11	F	A
4	Circunvalación y Gamonedá	456	614	912	4	104,34	18	2	20	41,185	F	B
5	Panamericana y Pje Ibáñez	972	1294	1620	8	356,63	18	2	30	79,241	F	B
6	Panamericana Av. Romero	291	466	970	4	97,838	26	2	12	25,936	F	B
7	Belgrano y España	243	382	584	3	67,47	18	3	15	39,613	F	A
8	Panamericana y La Paz	485	605	1093	4	75,19	18	2	16	24,765	F	B
9	La Paz y Bolívar	389	547	909	4	110,05	22	2	18	36,321	F	A
10	Cochabamba y Hugo López Dolls	405	470	810	3	50,47	16	2	18	24,924	E	A
11	Cochabamba y Colón	352	396	741	3	57,14	20	2	20	25,237	E	B
12	Cochabamba y Gral. Trigo	320	452	672	3	92,95	20	2	20	45,268	F	B
13	Sucre y Corrado	288	409	577	3	77,82	18	2	20	48,554	F	B
14	Domingo Paz y Campero	240	360	480	3	80,4	18	2	20	60,297	F	C
15	Méndez y Bolívar	226	378	567	3	90,4	22	2	16	47,83	F	B
16	Bolívar y D. Campos	204	334	510	3	77,28	22	2	16	45,458	F	A
17	Colón y Madrid	182	307	455	3	75,53	22	2	16	49,839	D	A
18	15 de Abril y Campero	201	362	504	3	102,56	22	2	16	61,05	F	B
19	Saracho y Ingavi	237	349	475	2	72,83	18	2	20	55,198	F	A
20	Gral. Trigo y Ingavi	187	316	468	3	77,84	22	2	16	49,895	F	A
21	V. Lema y Suipacha	196	218	492	2	31,37	22	2	16	19,13	D	A
22	Las Américas y Sucre	455	587	1139	4	96,82	22	2	16	25,502	F	A
23	Madrid y O'Connor	492	676	900	4	136,27	17	2	23	57,377	F	A

### 4.7.1 Análisis de Capacidad Vehicular

La capacidad vehicular se ve afectada por el flujo de saturación, y por los tiempos asignados tanto a la fase verde como a la longitud de ciclo del semáforo que opera en el acceso.



**Figura N° 4.5** Gráfica de Capacidad Vehicular

Entre las intersecciones que ofrecen la mayor capacidad de servicio se encuentran:

- Circunvalación y San Bernardo
- Panamericana y Pje Ibañez
- Panamericana y Av. La Paz
- Madrid y O'Connor

Todas estas intersecciones se encuentran en un área intermedia; lo que quiere decir, que no están dentro del “Casco viejo” de la ciudad de Tarija.

Las intersecciones con una baja capacidad de servicio son:

- Colón - Madrid
- Bolívar -Daniel Campos
- Virginio Lema – Suipacha
- Méndez – Bolívar

- Domingo Paz – Campero
- Belgrano-España

#### 4.7.2 Análisis del Flujo de Saturación

El flujo de saturación, es el nivel máximo de servicio al que puede llegar el acceso de una intersección semaforizada, representa la cantidad de vehículos que pueden atravesar el acceso por hora de luz verde.

El flujo de saturación se ve restringido por el ancho del acceso, factores geométricos y de funcionamiento de la vía.

Es necesario alcanzar un valor que sea mayor al del volumen de demanda para garantizar un adecuado funcionamiento del acceso; pero, esta no es la variable única de la que depende el funcionamiento en términos de servicio, también se debe de buscar un adecuado tiempo de fase verde y un reducido tiempo de rojo para garantizar que los vehículos que llegan sólo se detengan durante un ciclo de semáforo.

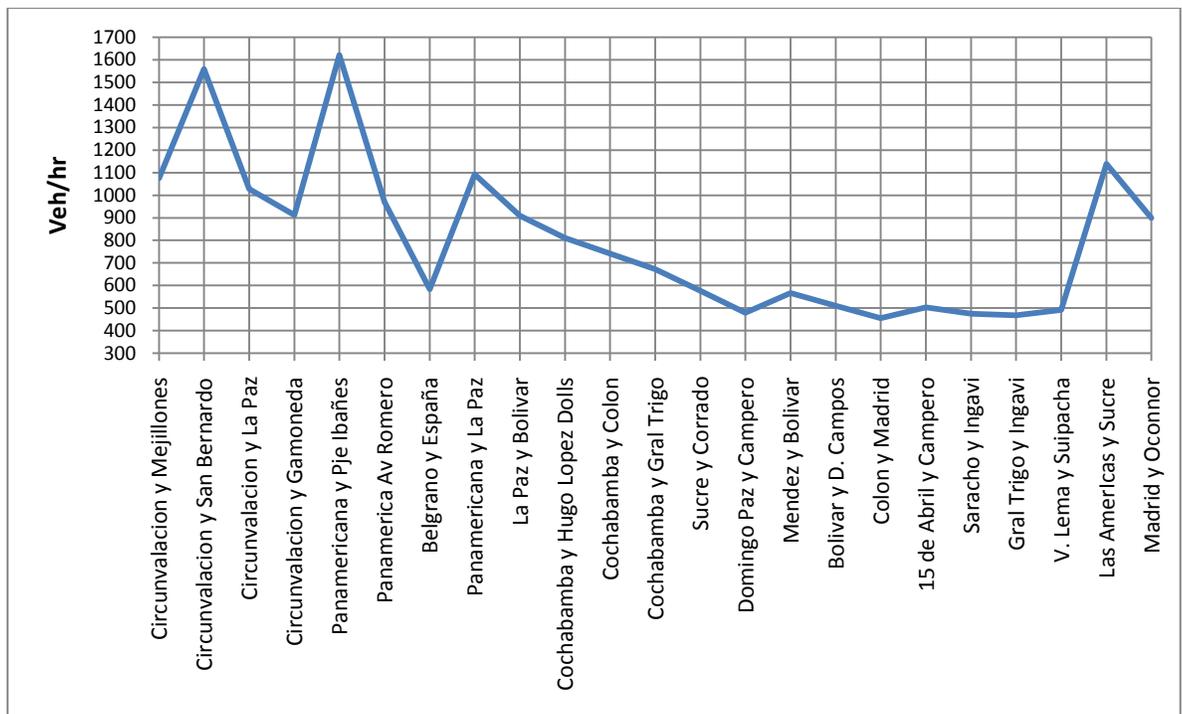


Figura N° 4.6 Gráfica de Flujo de Saturación

Los mayores flujos de saturación de las intersecciones estudiadas se encuentran entre las siguientes:

- Circunvalación-San Bernardo
- Panamericana-Pje Ibáñez
- Panamericana Av. La Paz
- Méndez y Bolívar
- Las Américas-Sucre

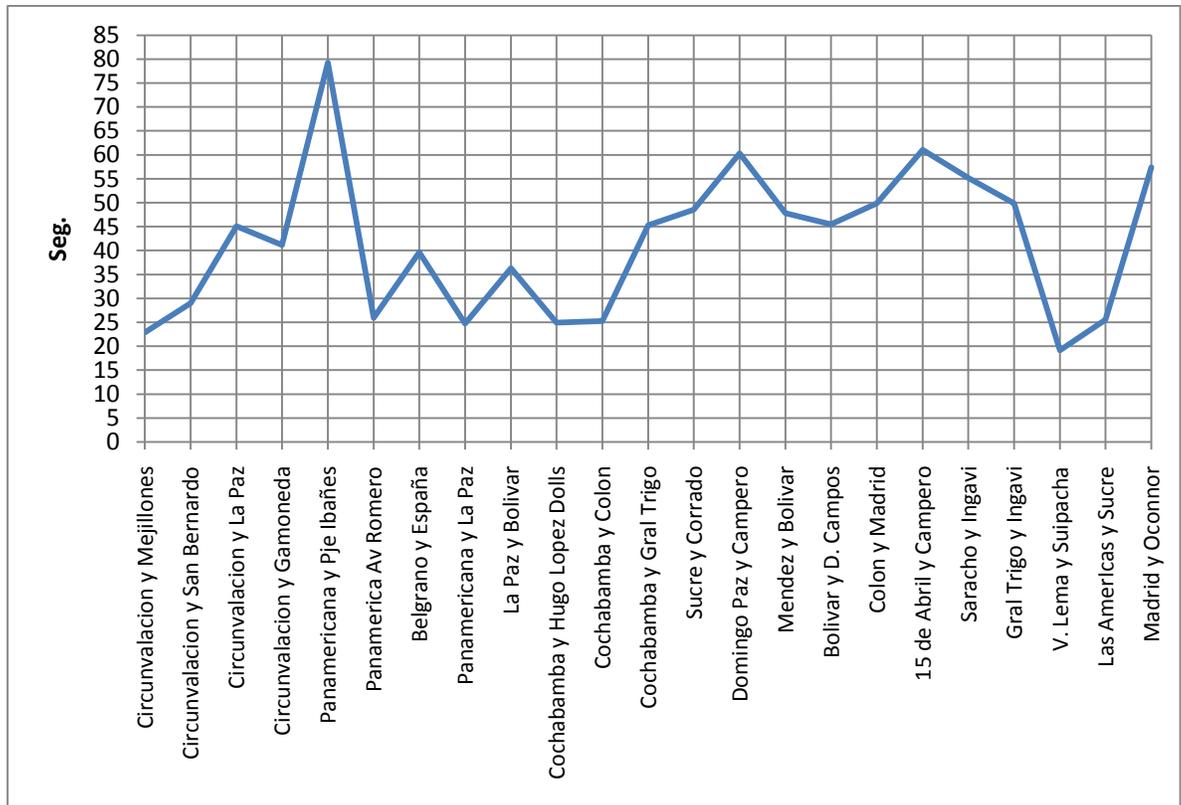
Las intersecciones con el menor flujo de saturación son:

- Domingo Paz – Campero
- Colón – Madrid
- Saracho – Ingavi
- Gral. Trigo – Ingavi

Este dato es de consideración ya que estas intersecciones están trabajando con un valor muy bajo de flujo de saturación y si la demanda se incrementara, también puede incrementarse el congestionamiento, debe de plantearse alguna alternativa que ayude a estas intersecciones a mejorar sus valores de flujo de saturación, estas alternativas pueden ser de características físicas o de funcionamiento en los accesos. Se puede decir que podemos partir por estas intersecciones para considerarlas como críticas ya que tienen la mayor posibilidad de provocar un congestionamiento.

#### **4.7.3 Análisis del Tiempo para Disipar la Cola**

Es el tiempo necesario para que se disipe la cola que se genera a través de la demanda vehicular. Si la intersección funciona de manera óptima, este tiempo debe ser menor o igual al tiempo de fase verde, porque se supone que el tiempo de verde cumple la función de tiempo necesario para que se disipe la cola.



**Figura N° 4.7** Grafica de Tiempo para disipar la cola

Si una intersección demanda tiempos largos para disipar la cola, es porque tiene una demanda vehicular grande, Las intersecciones que demandan los tiempos más largos para disipar las colas que se producen en sus accesos son las siguientes:

- Panamericana y Pje Ibañez
- Domingo Paz y Campero
- 15 de Abril y Campero
- Madrid y O'Connor

Entonces es necesario que en estas intersecciones se haga la consideración de alargar los tiempos de fase verde y de ciclo. Además, de aumentar el flujo de saturación, para así obtener tiempos en los cuales las colas se disipen durante las fases verdes y además de eso, tener en cuenta que los vehículos que ingresan a la intersección no esperen más un ciclo para atravesar la intersección.

#### 4.7.4 Análisis de Longitud de Cola

La longitud de cola de vehículos, se produce a causa de los tiempos de rojo, y de la demanda de vehículos que ingresan a la intersección, se supone que no debería producirse longitudes de cola mayor a la relación existente entre la intensidad de llegadas y el tiempo de rojo del semáforo, si por algún motivo ocurriese lo mencionado entonces se debe indicar que se está trabajando en una intersección con características de sobresaturación. Y además de esto, se tiene el caso en el que los vehículos que ingresan a la intersección van a permanecer ahí por un tiempo mayor al de un ciclo para ser atendidos.

Intersecciones con mayor longitud de cola

- Circunvalación – San Bernardo
- Panamericana - Pje Ibañez
- Panamericana y La Paz
- La Paz y Bolívar
- Las Américas y Sucre
- Madrid y O'Connor

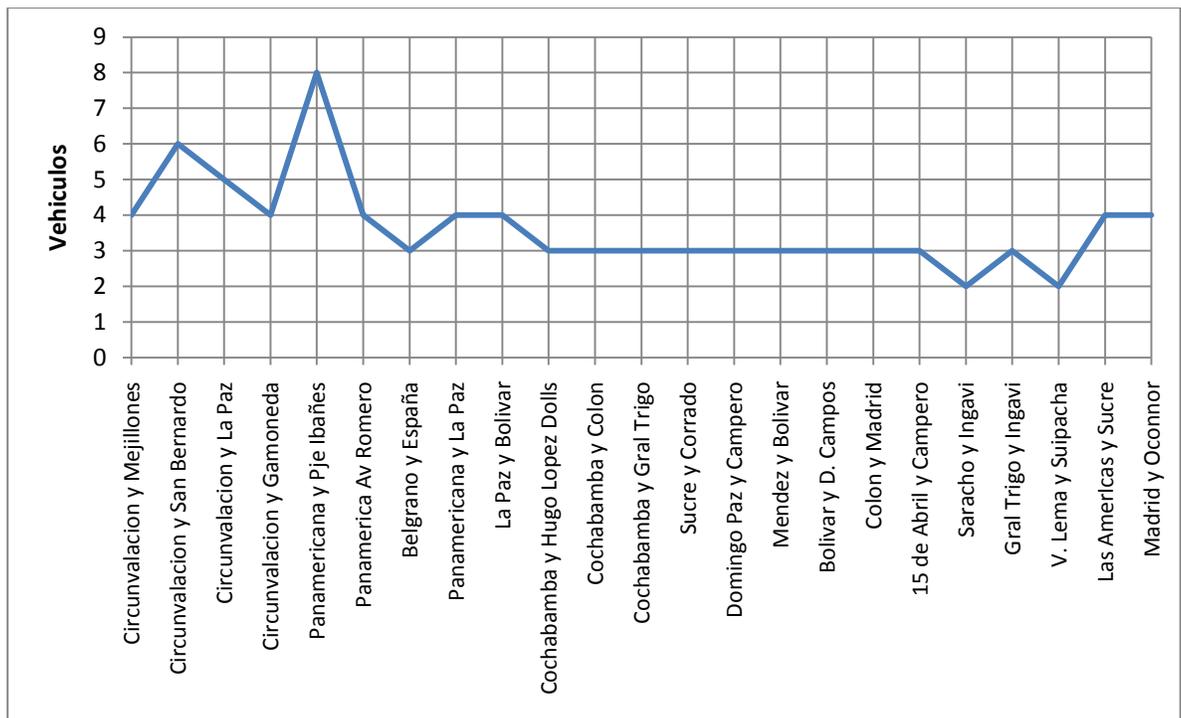


Figura N° 4.8 Gráfica Análisis de Longitud de Cola

Todas estas intersecciones pueden producir colas, las cuales están por encima de los 3 vehículos, todas las colas producidas generan congestionamientos y también provocan tiempos de demora, la medida adecuada, es controlar estas colas con una adecuada coordinación de semáforos.

#### **4.7.5 Análisis de Tiempos de Demoras**

Los tiempos de demoras son los tiempos que el tránsito vehicular experimenta a causa de la detención por parte de los tiempos de semáforo y por la tasa de llegadas de vehículos a la intersección. Este tiempo de demora nos da a entender el nivel de servicio con que cuenta la intersección. En el análisis de las intersecciones estudiadas, se calcula que en su mayoría las intersecciones funcionan a nivel F, lo que quiere decir que los flujos de llegada exceden la capacidad de la intersección, lo que ocasiona congestionamiento y operación saturada.

Pero, hay algunas intersecciones que aún no han llegado a ese nivel como ser:

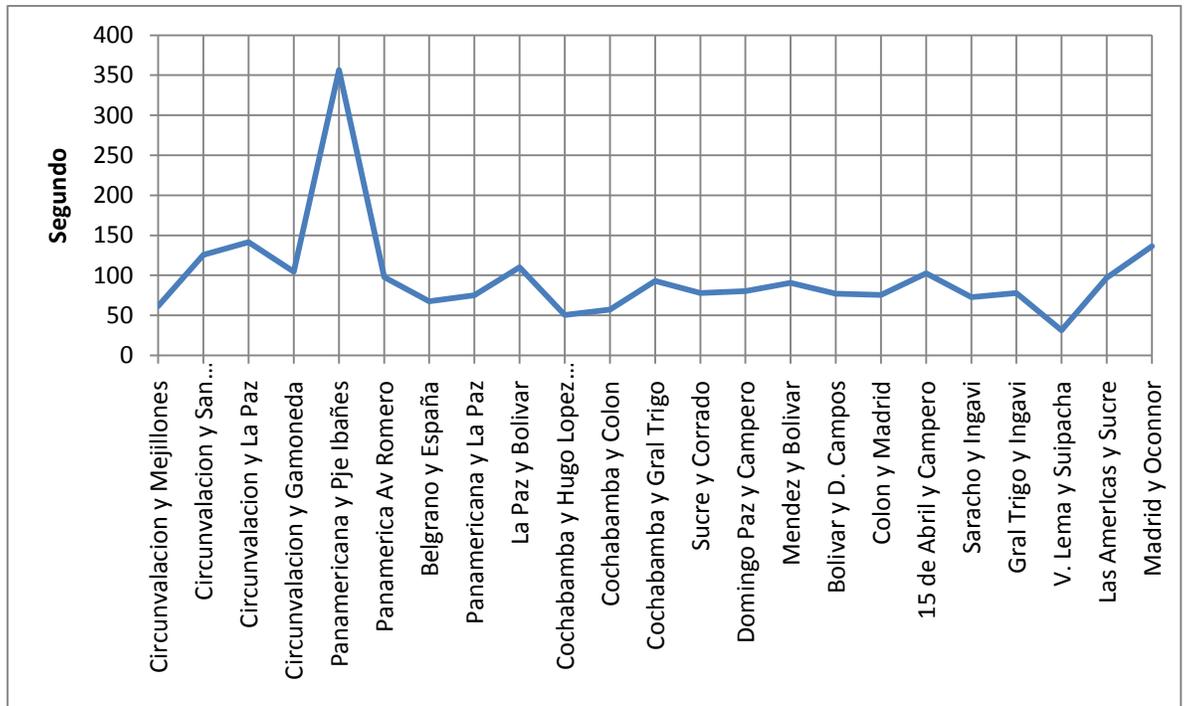
- Cochabamba – Hugo López Dolls .....Nivel E
- Cochabamba – Colón .....Nivel E
- Colón – Madrid .....Nivel D
- Virgilio Lema – Suipacha .....Nivel D

El nivel de servicio E, representa un límite aceptable de demoras, donde se supone que estas demoras son causadas por longitudes de ciclo amplias, y relaciones volumen capacidad altas.

El nivel de servicio D da a entender que las demoras pueden ser ocasionadas por progresiones pobres y llegadas en tiempo de fase verde.

Entre las intersecciones con un considerable tiempo de demoras se tiene a:

- Circunvalación – La Paz
- Panamericana - Pje Ibáñez
- Madrid y O'Connor



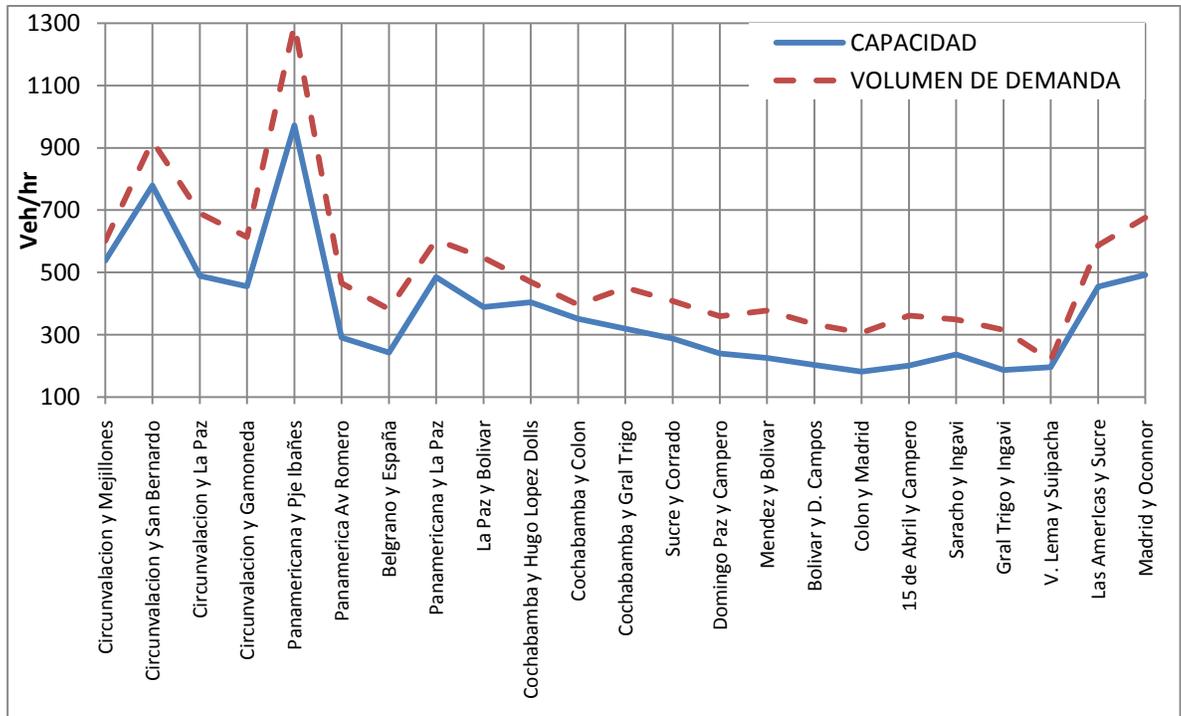
**Figura N° 4.9** Gráfica Análisis de Tiempo de Demora

Todas las intersecciones que presentan un nivel de servicio que tiende a la sobresaturación, se debe a los elevados tiempos de demora, que se presentan a causa de una demanda considerable con respecto a su capacidad, lo que genera que aumenten los tiempos de demora, además, de eso debe de existir un tiempo de fase verde adecuado para el tipo de flujo que se presenta en circulación.

#### **4.7.6 Análisis de Capacidad vs. Volumen de Demanda**

El volumen de demanda, es uno de los principales factores que alteran el funcionamiento de las intersecciones; pero, si estos volúmenes sobrepasan la capacidad del acceso, entonces se encuentra largas colas y tiempos de demora exagerados.

Como parámetro se puede decir, que sólo la intersección V. Lema y Suipacha funciona a su máxima capacidad, el volumen está al mismo nivel de la capacidad, lo que quiere decir también que en cualquier momento se puede producir una sobresaturación.



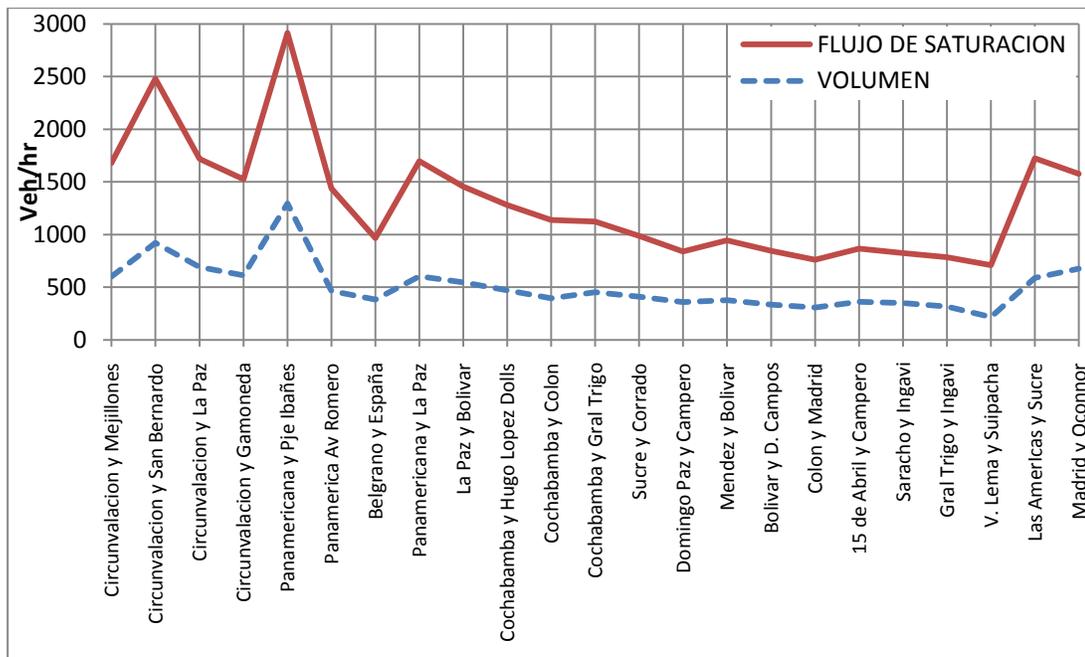
**Figura N° 4.10** Gráfica análisis de Capacidad vs Volumen de Demanda

Todas las intersecciones restantes tienen un volumen mayor a su capacidad, en este aspecto se entiende que todas las intersecciones funcionan sobrecargadas y generan colas, lo que también provoca tiempos de demora, entre mayor es el volumen con relación a su capacidad tenemos un mayor grado de congestión, la intersección más crítica en esta relación es Panamericana y Pje. Ibañez.

#### 4.7.7 Análisis de Flujo de Saturación vs. Volumen de Demanda

El flujo de saturación es la máxima oferta que se puede producir si es que no se presentara el tiempo de rojo para detener a los vehículos, solo se da este flujo cuando el semáforo se pone en verde. El flujo de saturación depende del ancho de acceso, maniobras de giro, y características de tránsito que presenta la intersección.

Si existiera algún caso en el que el flujo de saturación fuera menor al volumen esta intersección estaría funcionando, de una manera inadecuada ya que el semáforo sólo estaría perjudicando la distribución del tráfico en cada uno de los accesos de la intersección.

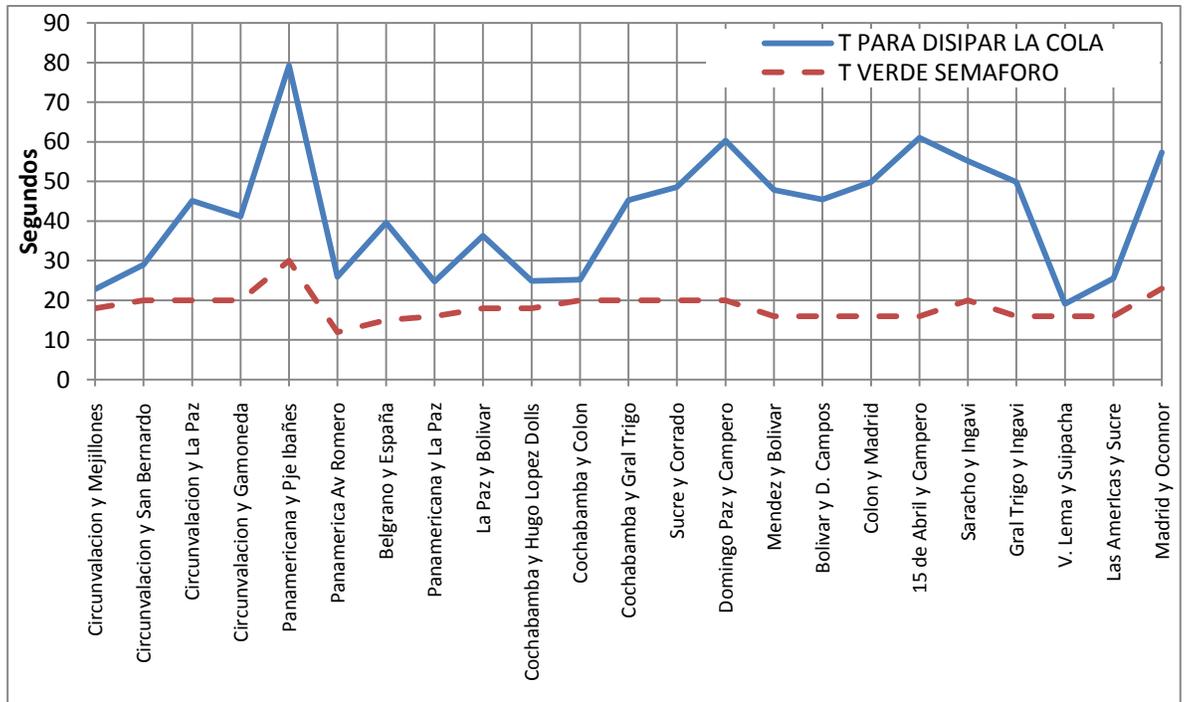


**Figura N° 4.11** Gráfica análisis de Flujo de Saturación

#### 4.7.8 Análisis Tiempo para Disipar la Cola vs. Tiempo de Verde de Semáforo

El tiempo de fase de verde tiene por objetivo disipar la cola que se genera a causa de la detención de vehículos por el tiempo de rojo y por la tasa de llegadas al acceso; pero, para todas las intersecciones analizadas este tiempo de fase verde no es suficiente, como se observa en el grafico correspondiente, entonces se ve por conveniente tomar alguna medida que ayuda a igualar o disminuir el tiempo para disipar la cola con respecto al tiempo de fase del verde de semáforo.

Entre las medidas que se pueden utilizar son el aumento del ciclo y tiempo de fase verde o disminución de la tasa de llegas al acceso.



**Figura N° 4.12** Gráfica análisis de Tiempo para disipar la Cola

Las intersecciones que se ven afectadas de sobremanera con la diferencia de estos tiempos son los siguientes.

- Circunvalación-La Paz
- Panamericana-Pje Ibañez
- Belgrano-España
- La Paz-Bolívar
- Domingo Paz – Campero
- Bolívar-Daniel Campos
- Méndez - Bolívar
- Sucre – Corrado
- Colón – Madrid
- 15 de Abril – Campero
- Ingavi – Saracho
- Ingavi – Gral. Trigo
- Madrid – O’Connor

En todas estas intersecciones, es necesario realizar un cambio de tiempo en las fases y ciclos de los semáforos para disminuir el tiempo necesario, para disipar las colas y disminuir el grado de congestión en la intersección.

#### 4.7.9 Variación de Tiempos

La variación de tiempos, como de demora, de fase verde y tiempo para disipar la cola de vehículos, nos muestra la diferencia que existe entre todos estos parámetros que son fundamentales al momento de analizar el congestionamiento.

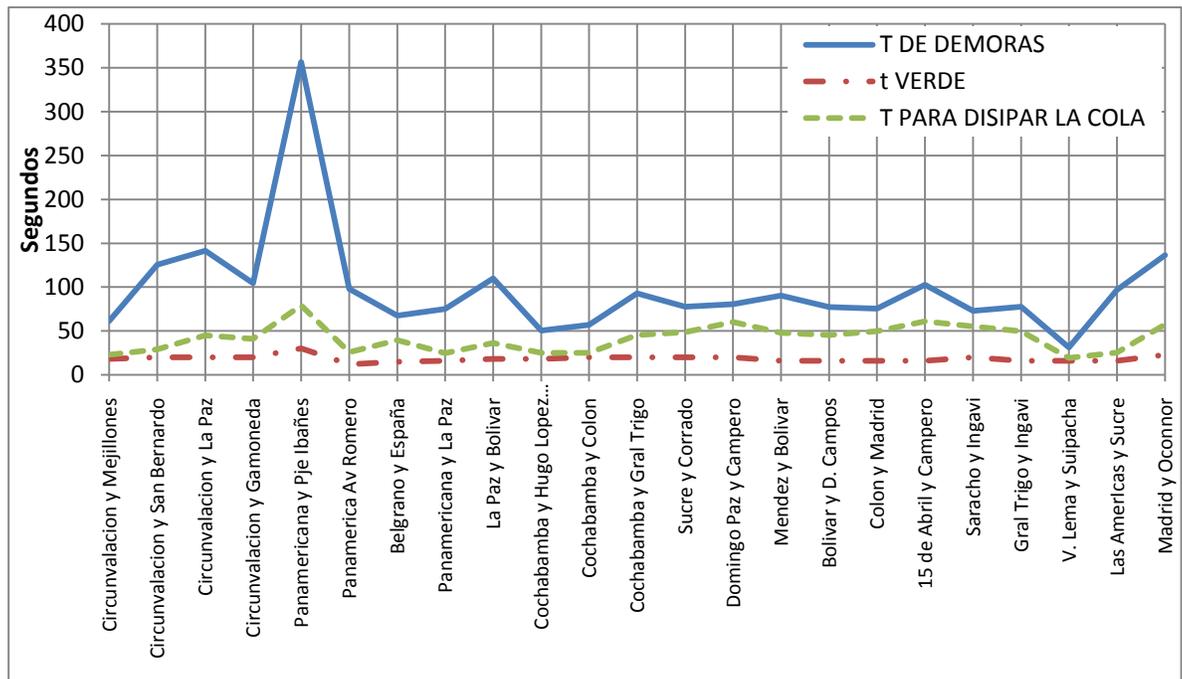


Figura N° 4.13 Grafica análisis de Variación de Tiempos

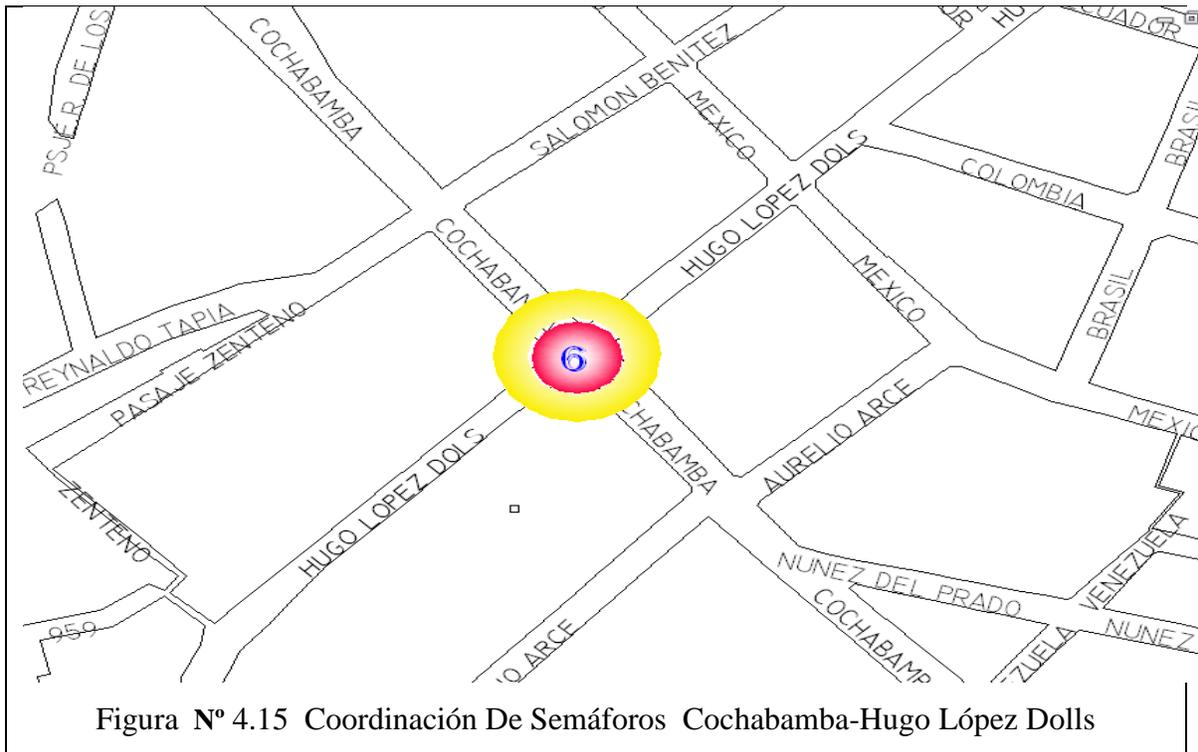
En aquellas intersecciones donde los tiempos de demora crecen con relación a otras, también se observa que crece la diferencia con los tiempos de fase verde y el tiempo necesario para disipar la cola de vehículos.

Para este caso de variación entre los tres tiempos encontramos que los accesos más críticos son los siguientes.

- Circunvalación – San Bernardo
- Circunvalación – La Paz
- Panamericana – Pje Ibañez
- La Paz – Bolívar
- Cochabamba – Gral. Trigo
- Méndez – Bolívar
- 15 de Abril – Campero
- Madrid – O'Connor



#### 4.8.2 Intersección Cochabamba-Hugo López Dolls



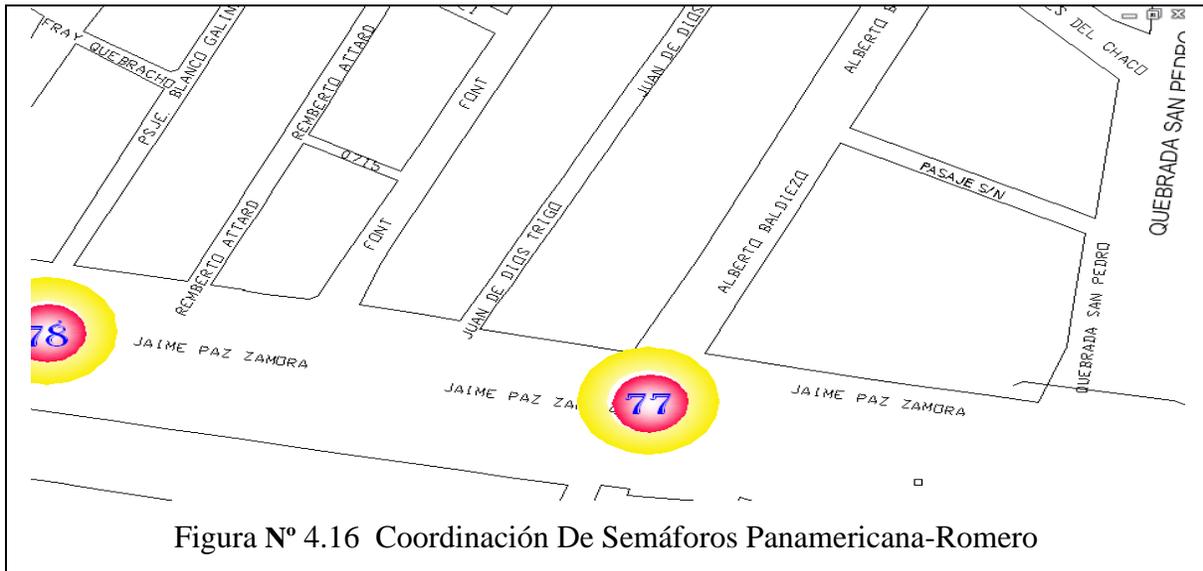
La intersección Cochamba – Hugo López Dolls es una intersección de cuatro accesos que se ubica en un área comercial intermedia de la ciudad de Tarija, como es el Barrio de La Loma.

El tiempo de verde para atravesar el acceso es de 18 segundos en dirección del flujo principal y de 14 en dirección del flujo secundario (Calle Hugo López Dolls)

No existe congestionamiento debido a la coordinación de semáforos porque se trata de una intersección semaforizada aislada, sin otras a su alrededor.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS				
	A	B	C	D	
ROJO	16	16	20		
VERDE	18	18	14		
AMARILLO	2	2	2		
CICLO	36	36	36		

### 4.8.3 Intersección Panamericana-Romero



La intersección Panamericana – Romero se encuentra en una zona alejada del centro de la ciudad pero se la puede considerar como intermedia, esta intersección permite el paso de vehículos hacia la zona de la Terminal de Buses, zona de alto tráfico, pero también desvía el tráfico pesado hacia la Av. Circunvalación, por intermedio de la Av. Romero.

El tiempo necesario para atravesar la intersección es de 12 segundos en dirección del flujo principal y de 24 segundos en dirección del flujo secundario (Av. Romero)

Debido a que se trata de una intersección aislada no se presume congestionamiento debido a la coordinación con otras intersecciones aledañas, pero se observa que el flujo principal presenta menor tiempo que el flujo secundario, aspecto que va en contra de cualquier criterio de diseño. La intersección mencionada está funcionando de manera inadecuada, provocando un estancamiento del flujo en el sentido de la vía principal, el congestionamiento se produce por la inadecuada distribución de tiempos entre los accesos de la intersección.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	26	26	14	
VERDE	12	12	24	
AMARILLO	2	2	2	
CICLO	40	40	40	



#### 4.8.4 Intersección Belgrano-España

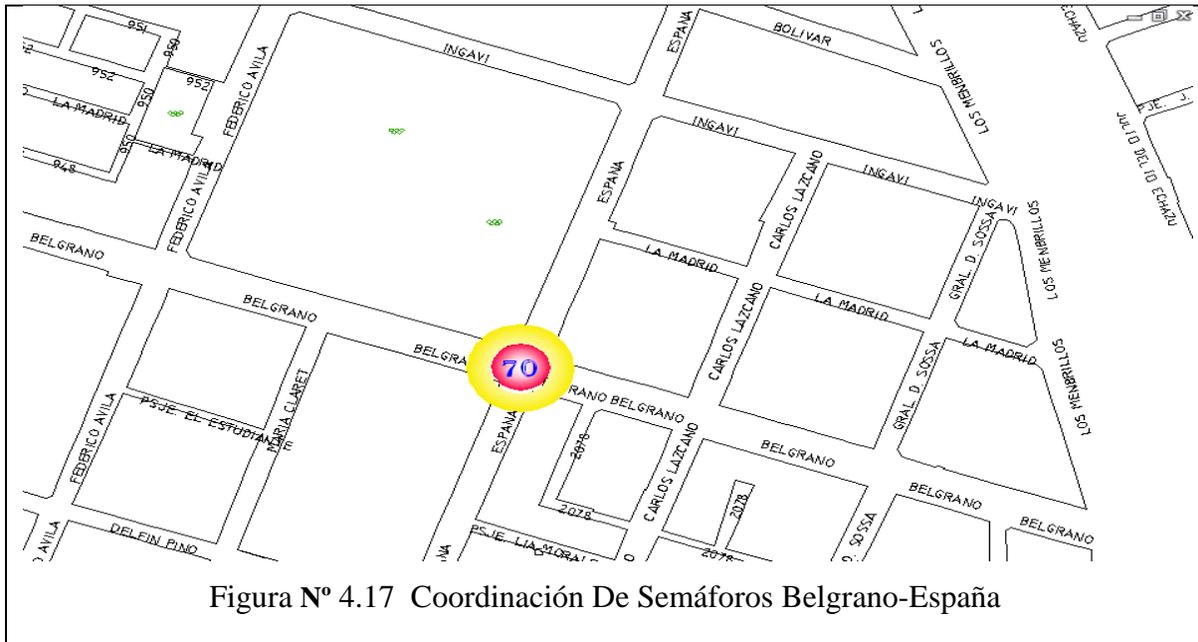


Figura N° 4.17 Coordinación De Semáforos Belgrano-España

La intersección Belgrano – España se encuentra en una zona intermedia, comunica los Barrios Virgen de Fátima con el Barrio de Juan XXIII y alrededores, también se caracteriza por encontrarse en una zona escolar ya que en sus inmediaciones se encuentra la Unidad Educativa José Manuel Belgrano.

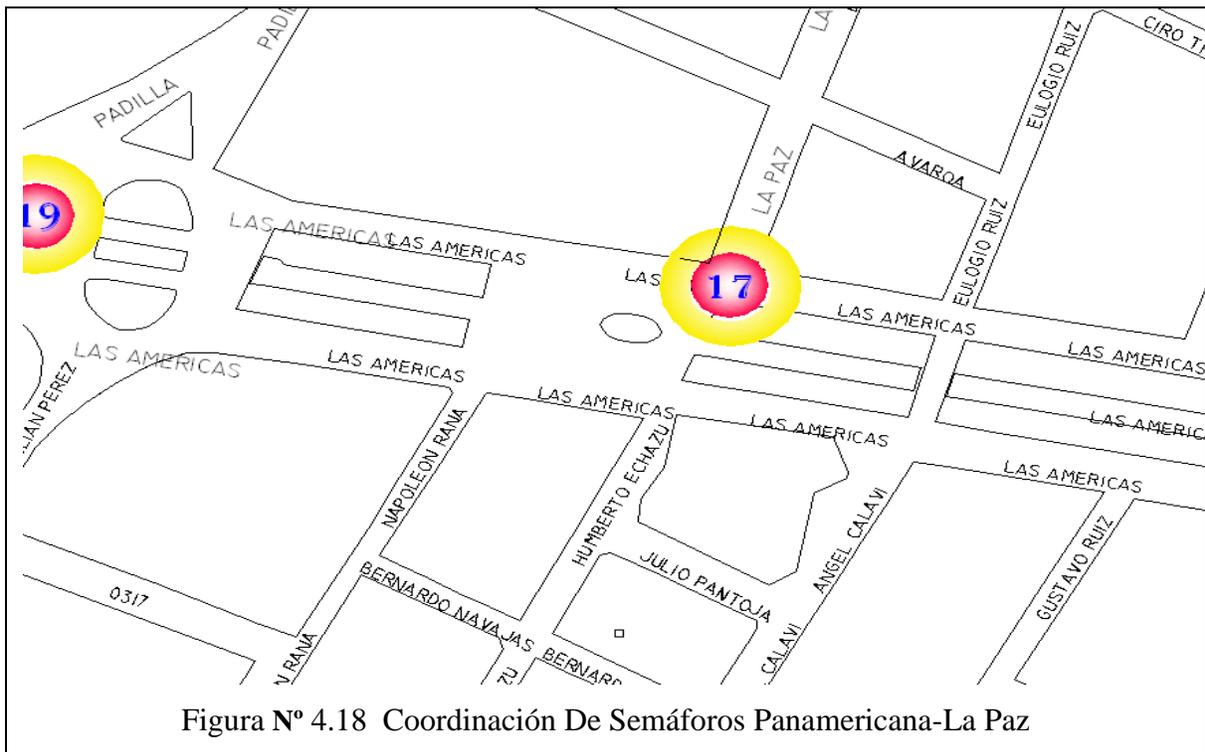
El tiempo necesario para atravesar la intersección es de 15 segundos tanto en sentido del flujo principal como del secundario.

No se presenta congestión por coordinación de semáforos porque es una intersección aislada pero cabe hacer notar que los tiempos del semáforo son iguales tanto para el flujo principal como para el secundario, se debe de tomar en cuenta que los volúmenes vehiculares son mayores en el flujo principal (Av. Belgrano), no existe optimización de tiempos para dar mayor fluidez a los accesos más conflictivos (Av. Belgrano).

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	18	18	18	18
VERDE	15	15	15	15
AMARILLO	3	3	3	3
CICLO	36	36	36	36



#### 4.8.5 Intersección Panamericana-La Paz



La intersección Panamericana - La Paz se encuentra en una zona intermedia de alto tráfico, por encontrarse en inmediaciones de la Terminal de Buses de la ciudad, se trata de una intersección aislada.

El tiempo necesario para atravesar la intersección es de 16 segundos en ambos sentidos primario y secundario.

No existe una optimización de los tiempos para facilitar el flujo a través del acceso principal de la Avenida Panamericana, lo que puede provocar que se genere un congestionamiento por la mala coordinación de tiempos del semáforo.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	18	18	18	
VERDE	16	16	16	
AMARILLO	2	2	2	
CICLO	36	36	36	



#### 4.8.6 Intersección Bolívar-La Paz

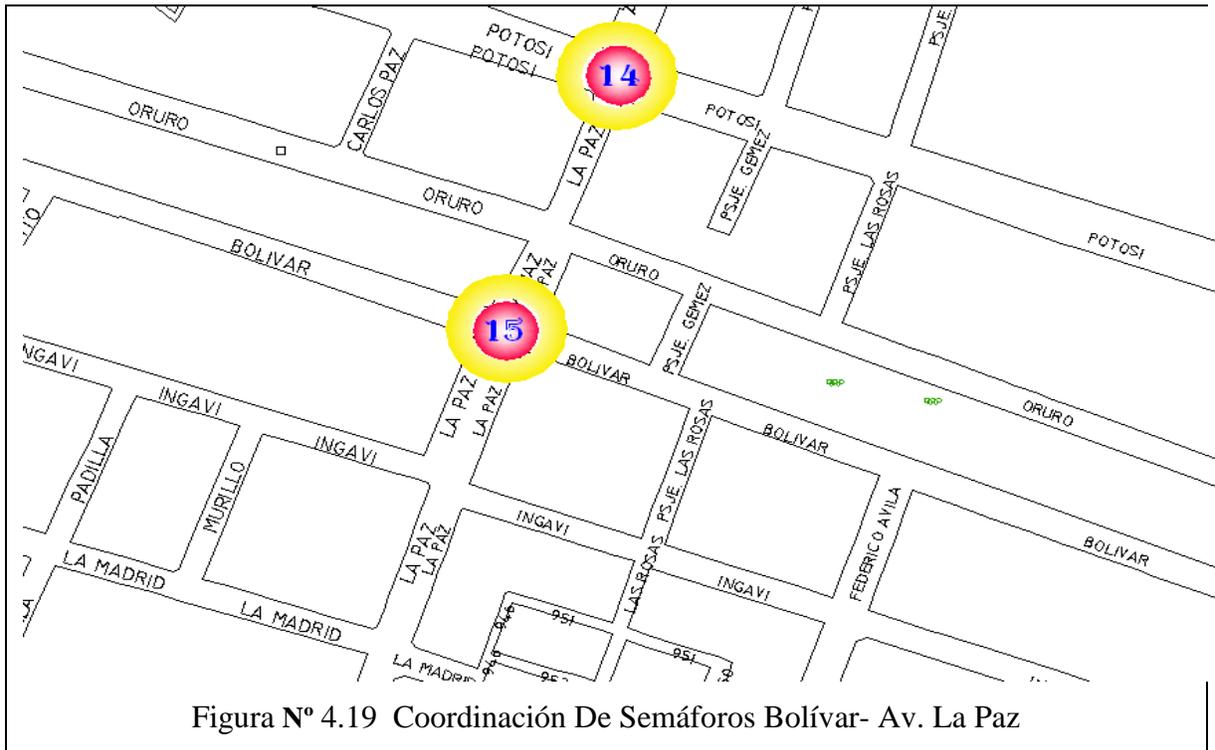


Figura N° 4.19 Coordinación De Semáforos Bolívar- Av. La Paz

La intersección Bolívar – Av. La Paz es una intersección que se encuentra en una zona intermedia se caracteriza por su alto flujo de transporte público.

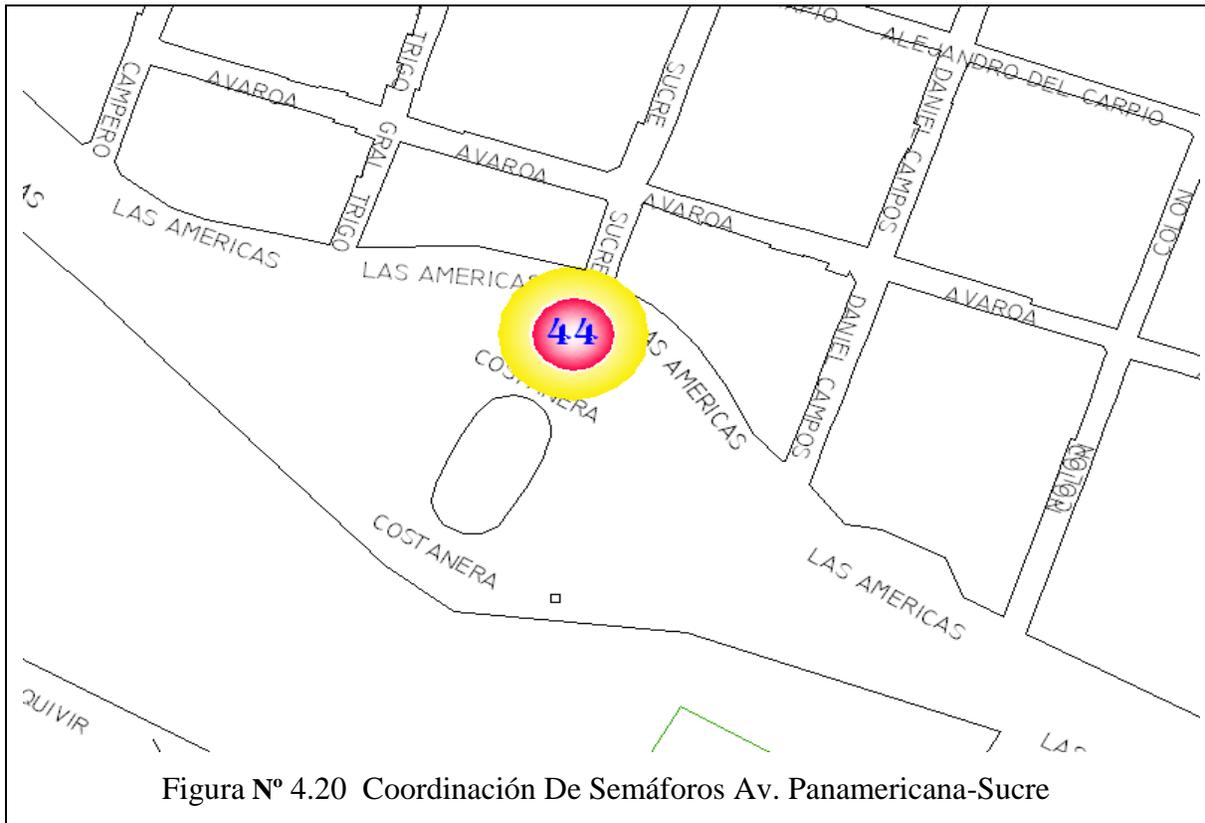
El tiempo de verde para atravesar la intersección en dirección del flujo principal es de 18 segundos y de 20 segundos en dirección del flujo secundario (calle Bolívar)

El congestionamiento en la calle principal se produce por la mala distribución de los tiempos del semáforo, no hay coordinación con intersecciones semaforizadas aledañas.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	22	20	22	
VERDE	18	20	18	
AMARILLO	2	2	2	
CICLO	42	42	42	



#### 4.8.7 Intersección Av. Panamericana -Sucre



La intersección Av. Panamericana – Sucre se encuentra en los alrededores de la zona central, es una intersección aislada por lo que no se la puede vincular con el funcionamiento de otras intersecciones semaforizadas.

El tiempo necesario para atravesar la intersección es de 20 segundos en sentido del flujo principal y de 16 segundos en el sentido del flujo secundario (Av. Panamericana)

El congestionamiento que se produce en esta intersección no está vinculado a la coordinación de semáforos ni al de los tiempos del propio semáforo. Sino a otros parámetros como la excesiva demanda de flujo vehicular y la reducida capacidad de servicio en los accesos

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS				
	A	B	C	D	
ROJO	22	22	18		
VERDE	16	16	20		
AMARILLO	2	2	2		
CICLO	40	40	40		



#### 4.8.9 Intersección Circunvalación-San Bernardo



Figura N° 4.22 Coordinación De Semáforos Circunvalación-San Bernardo

La intersección Circunvalación – San Bernardo se ubica en los alrededores de la ciudad, y se trata de una intersección aislada, se la utiliza para llegar al Barrio San Bernardo.

El tiempo con el que se dispone para atravesar la intersección es de 20 segundos para el flujo principal y 16 segundos para el flujo secundario (San Bernardo)

Existe coordinación de tiempos de semáforo.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS				
	A	B	C	D	
ROJO	18	18	22		
VERDE	20	20	16		
AMARILLO	2	2	2		
CICLO	40	40	40		

#### 4.8.10 Intersección Circunvalación-La Paz



Figura N° 4.23 Coordinación De Semáforos Circunvalación-Av. La Paz

La intersección Circunvalación – La Paz se ubica en los alrededores de la ciudad, por ella atraviesan un gran número de vehículos pesados, se trata de una intersección aislada, por lo que no existen otras intersecciones cercanas que estén semaforizadas.

El tiempo con el que se dispone para atravesar la intersección es de 20 segundos para el flujo principal y de 18 segundos para el flujo secundario (La Paz), los tiempos están coordinados con referencia a los flujos.

La coordinación tanto de los tiempos como de los semáforos no es la causa del congestionamiento en esta intersección.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	20	20	22	22
VERDE	20	20	18	18
AMARILLO	2	2	2	2
CICLO	42	42	42	42





#### 4.8.12 Intersección Cochabamba-Gral. Trigo

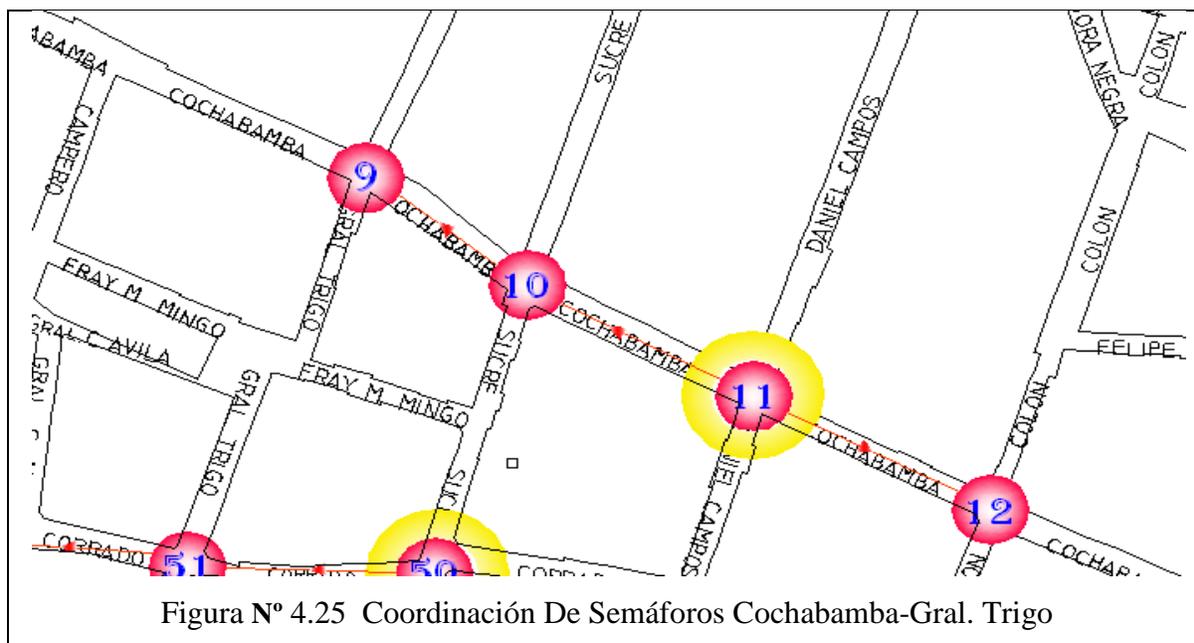


Figura N° 4.25 Coordinación De Semáforos Cochabamba-Gral. Trigo

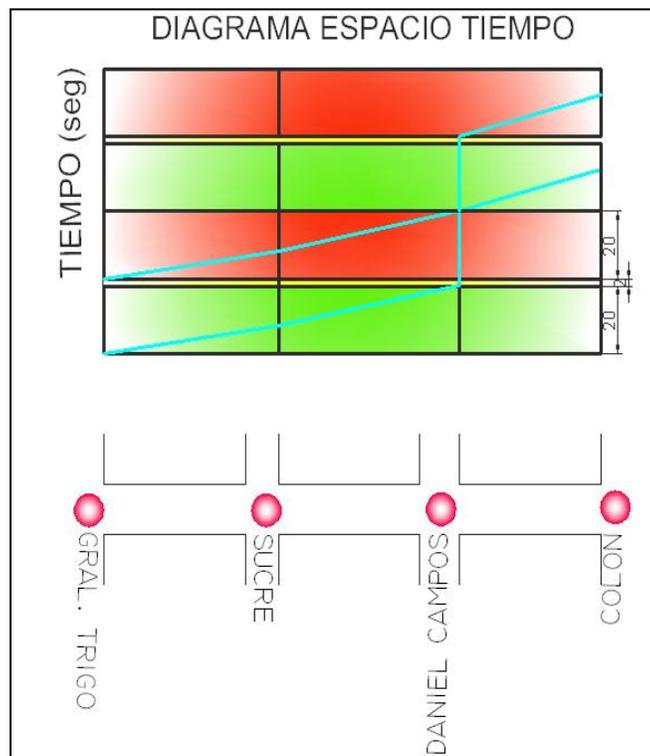
La intersección Cochabamba – Gral. Trigo es una intersección que funciona conjuntamente con otras 3 haciendo un total de 4 intersecciones semaforizadas interconectadas, reciben la señal de la intersección ubicada en la calle Cochabamba y Daniel Campos, todas las intersecciones que están intercomunicadas a esta, emiten la misma señal al mismo tiempo, lo que quiere decir que si una de las intersecciones se pone en rojo todas las demás también lo hacen en el mismo instante. Como el tiempo de los semáforos ha sido supuestamente diseñado para una velocidad de circulación de 20 Km/h la franja celeste muestra el desfase que debería existir entre los tiempos de las diferentes intersecciones.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	20	20	22	
VERDE	20	20	18	
AMARILLO	2	2	2	
CICLO	42	42	42	

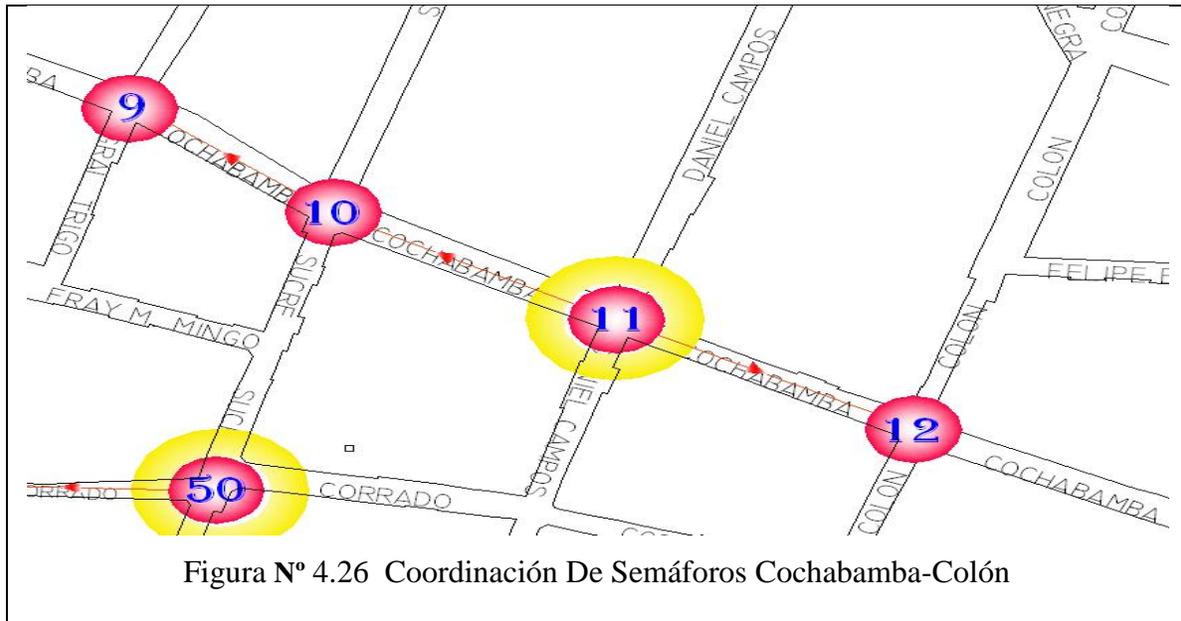


Los tiempos de los semáforos están en proporción a los volúmenes pero no existe coordinación entre semáforos, como se puede observar en el diagrama de espacio-tiempo si llegamos a atravesar la intersección Gral. Trigo y luego la Sucre ya no se puede atravesar la Daniel Campos que sería la intersección donde se produce mayor congestión debido a la mala coordinación entre semáforos, esto sucede en el sentido del flujo principal desde la Gral. Trigo hasta la Colón, si la dirección fuera a la inversa entonces también el punto conflictivo llegaría a ser la Calle Sucre, pero en sentido contrario.

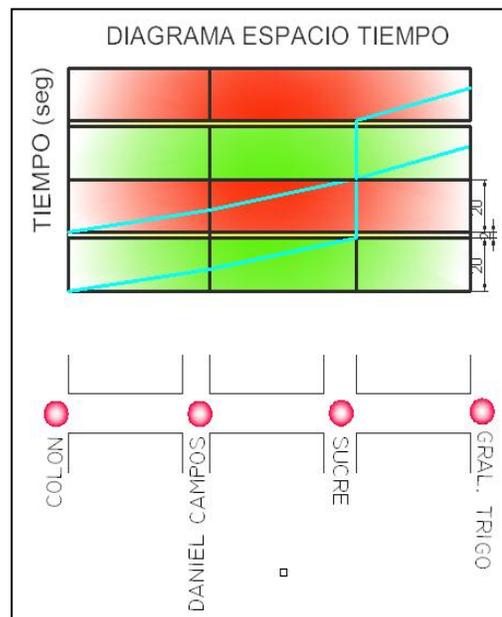
El flujo secundario no se ve afectado con tanta gravedad ya que no existen intersecciones semaforizadas adyacentes, se podría mencionar que si el flujo principal es afectado por la mala coordinación de los semáforos entre si esto también podría afectar al flujo secundario.



#### 4.8.13 Intersección Cochabamba-Colon



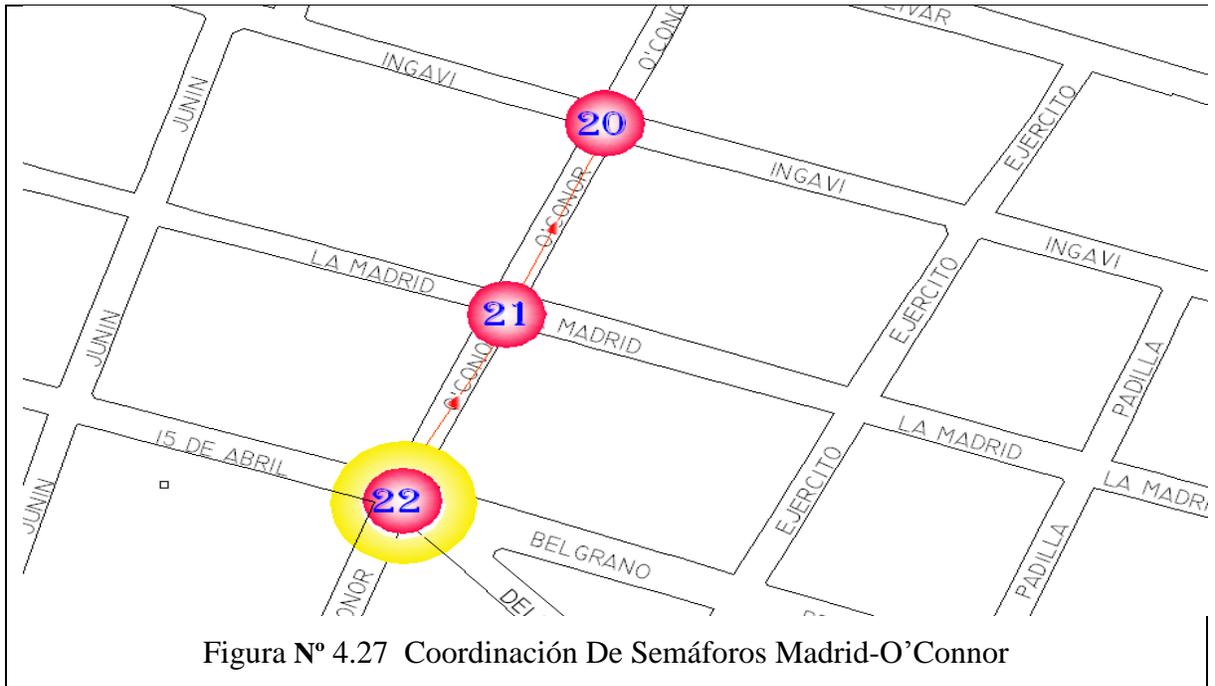
TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	20	20	22	
VERDE	20	20	18	
AMARILLO	2	2	2	
CICLO	42	42	42	

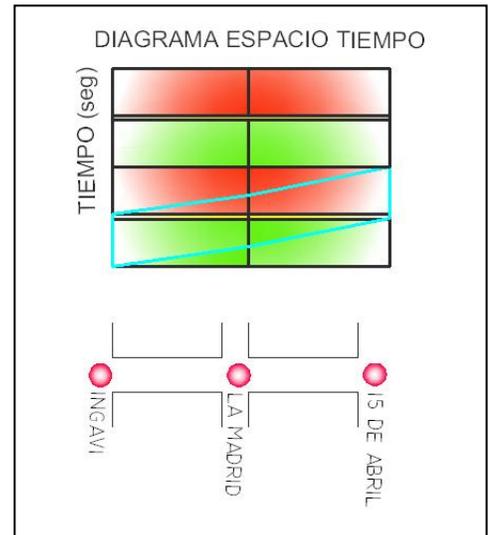
La intersección Cochabamba-Colón funciona del mismo modo que Cochabamba-Gral. Trigo teniendo las mismas deficiencias en cuanto a coordinación de semáforos lo que provoca que el flujo no pueda ser de circulación constante sin detenciones innecesarias.

El tiempo con el que se dispone para atravesar la intersección es de 20 segundos en el flujo principal y de 18 segundos en el flujo secundario (Colón)

#### 4.8.14 Intersección Madrid-O'Connor

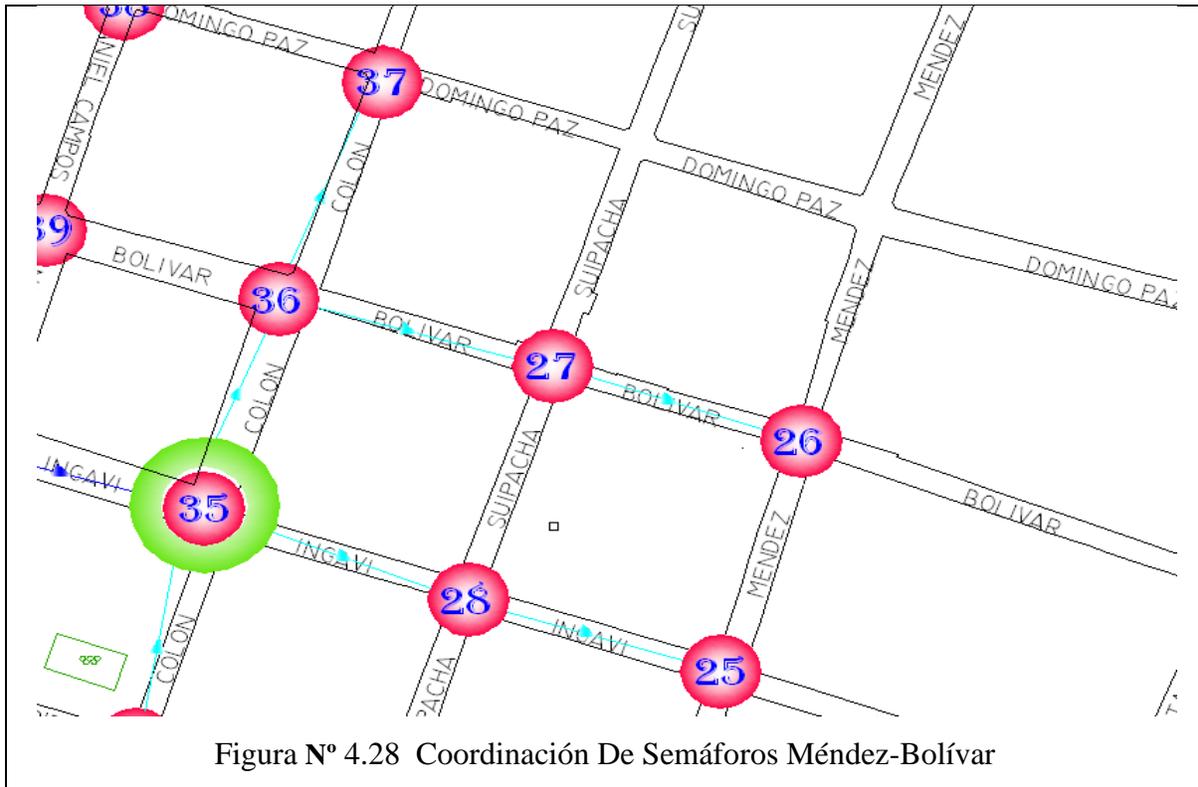


TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	17	27		
VERDE	23	13		
AMARILLO	2	2		
CICLO	42	42		

Para el flujo principal que comprende la calle O'Connor se observa falta de coordinación entre semáforos ya que todos funcionan de acuerdo a un semáforo que manda la señal a los demás este se ubica en la calle 15 de Abril y O'Connor, para los vehículos que atraviesan la Calle Ingavi e intentan llegar a la 15 de abril no podrán conseguirlo debido a la falta de coordinación de semáforos en el sistema. La intersección crítica por atravesar es La Madrid y O'Connor porque en este lugar se produciría la primera detención. Este fenómeno se lo observa en el flujo principal mientras que el secundario no se ve afectado por la falta de intersecciones semaforizadas aledañas.

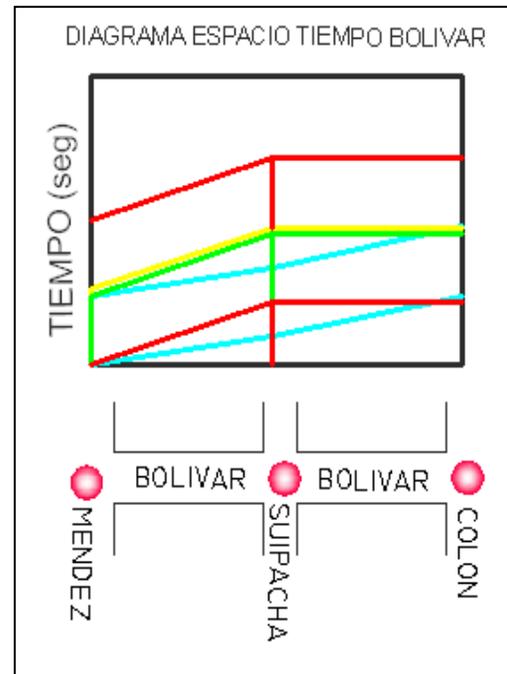
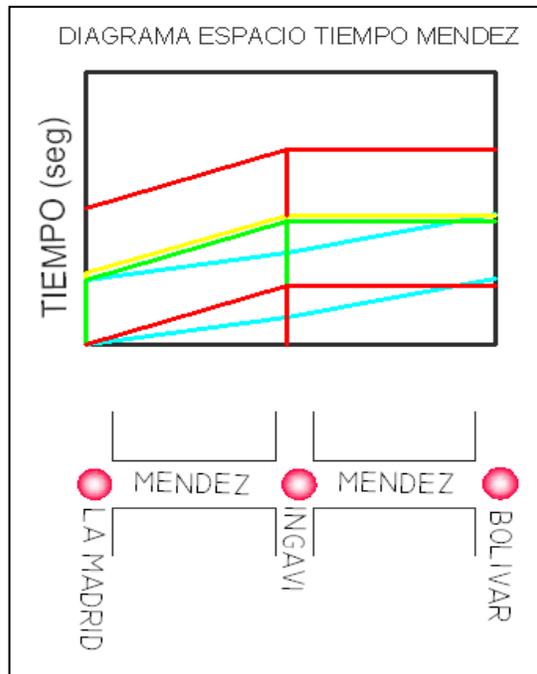
#### 4.8.15 Intersección Méndez - Bolívar



Los tiempos de los semáforos no están conforme deberían estar en proporción a los volúmenes por lo que ya se puede encontrar una de las causas para evitar el libre tránsito de los vehículos por esta intersección. El flujo principal tiene que presentar el mayor tiempo de verde para satisfacer la demanda de volumen existente en este caso el mayor tiempo se lo otorga al flujo secundario.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	18	22		
VERDE	20	16		
AMARILLO	2	2		
CICLO	40	40		





El flujo principal es atravesado por la calle Bolívar, se observa que la coordinación de los semáforos es mejor distribuida que en los casos anteriores pero sigue existiendo un desfase en los tiempos, lo que puede ocasionar, de vez en cuando, detenciones innecesarias.

Para el flujo principal el punto crítico, o posible crítico, se encuentra en la Suipacha y Bolívar y para el flujo secundario se lo distingue en la Méndez - Ingavi.

La intersección Méndez - Bolívar solo afectaría al flujo secundario en el desarrollo de su circulación.

En esta intersección se utiliza el sistema alternado Rojo-Rojo-Verde-Rojo-Rojo, la aplicación de este sistema es muy acertada, puesto que, evita la formación de largas colas vehiculares.

**4.8.16 Intersección Virgino Lema-Suipacha**

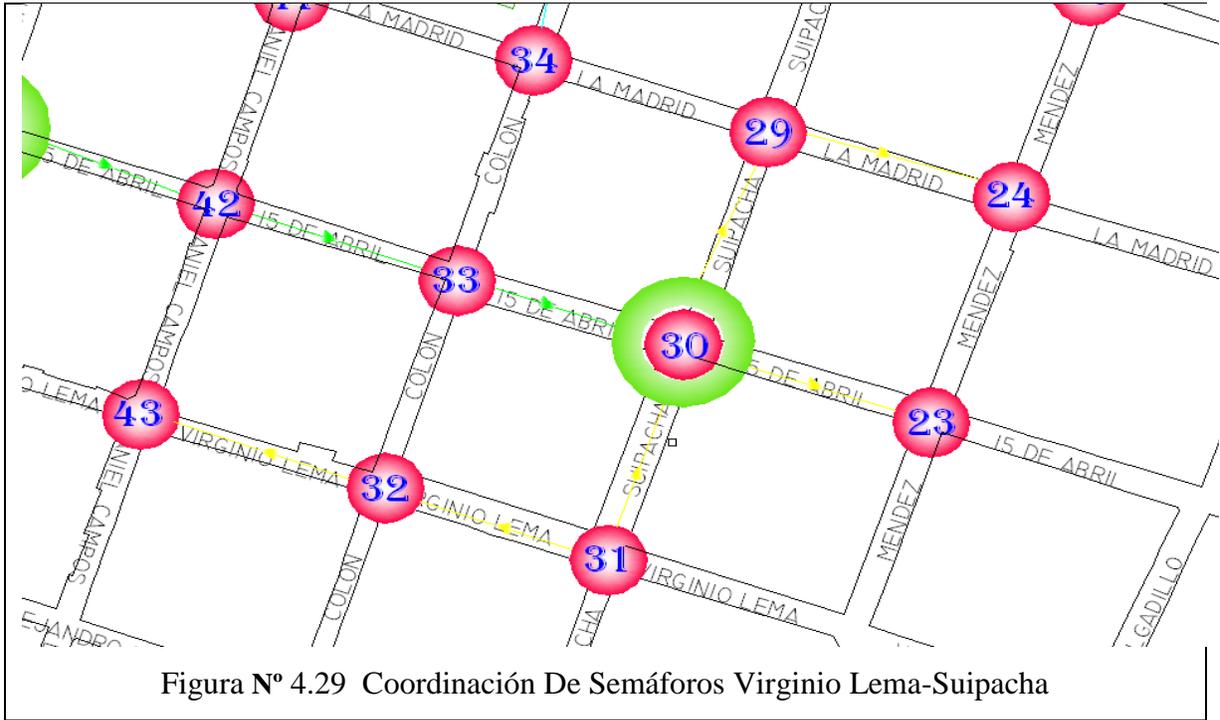
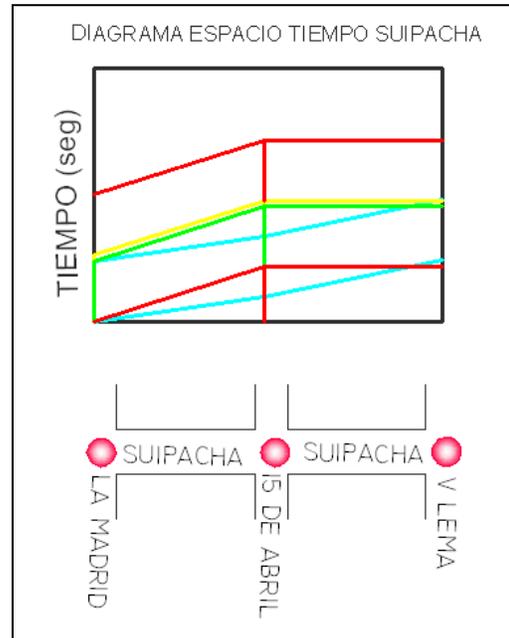
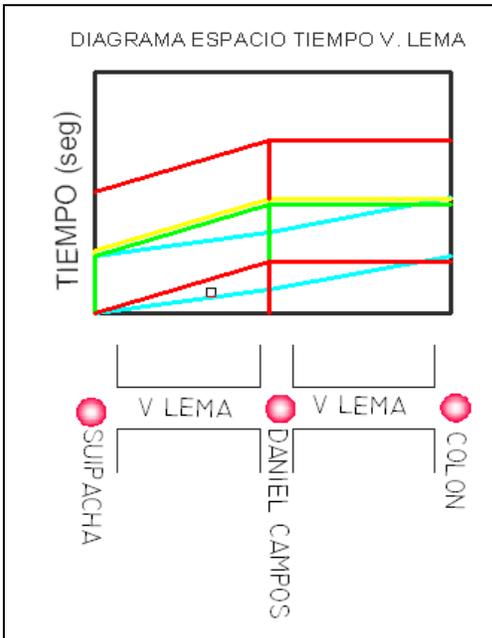


Figura N° 4.29 Coordinación De Semáforos Virgino Lema-Suipacha



TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	22	18		
VERDE	16	20		
AMARILLO	2	2		
CICLO	40	40		

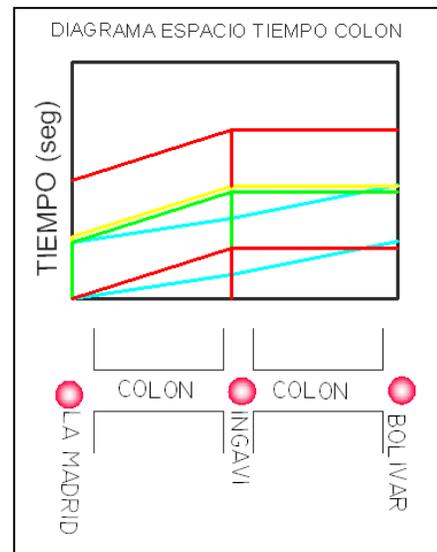
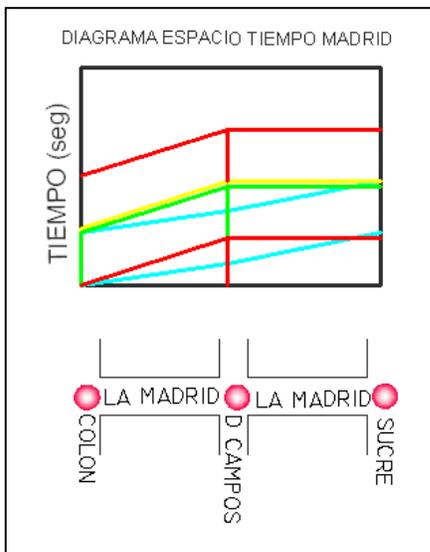
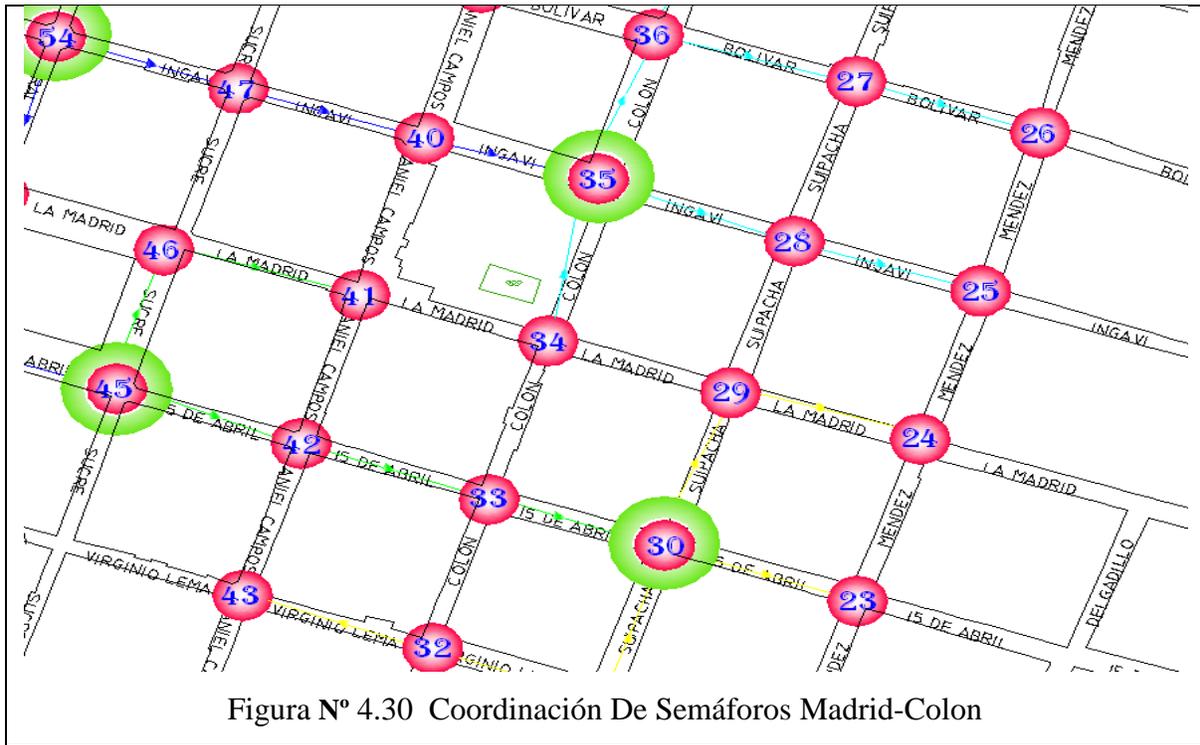


Los tiempos de los semáforos están conforme la demanda de los volúmenes, el flujo principal está representada sobre la calle Suipacha, la coordinación de los semáforos se da en la secuencia de Rojo-Rojo-Verde-Rojo lo que facilita una mejor distribución del tráfico.

La calle Suipacha presenta como intersección crítica a la Suipacha-15 de Abril, mientras que la calle Virginio Lema presenta como intersección crítica a la intersección Virginio Lema y Daniel Campos.

El funcionamiento de los semáforos está sometido a las diferentes órdenes que reciben de las cajas repetidoras con las que cuentan algunas de las intersecciones semaforizadas.

### 4.8.17 Intersección Madrid-Colon



TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	22	18		
VERDE	16	20		
AMARILLO	2	2		
CICLO	40	40		



La distribución de los tiempos esta en correlación con los volúmenes que atraviesan cada uno de los accesos

El flujo principal se concentra en la calle La Madrid y el secundario pasa por la calle Colon, la coordinación de los semáforos trabaja bajo la secuencia de Rojo-Rojo-Verde-Rojo es por esto que las posibles intersecciones más afectadas y en las cuales pueden darse los mayores problemas de congestión son las siguientes: La Madrid y Daniel Campos y la Colon Ingavi, ambas después de atravesar la intersección estudiada en dirección de sus respectivos flujos.

La coordinación de los semáforos no es la indicada o la que debería de ser pero de alguna forma puede sobrellevar y distribuir de manera adecuada el flujo vehicular que circula por esta intersección.

**4.8.18 Intersección Bolívar-Daniel Campos**

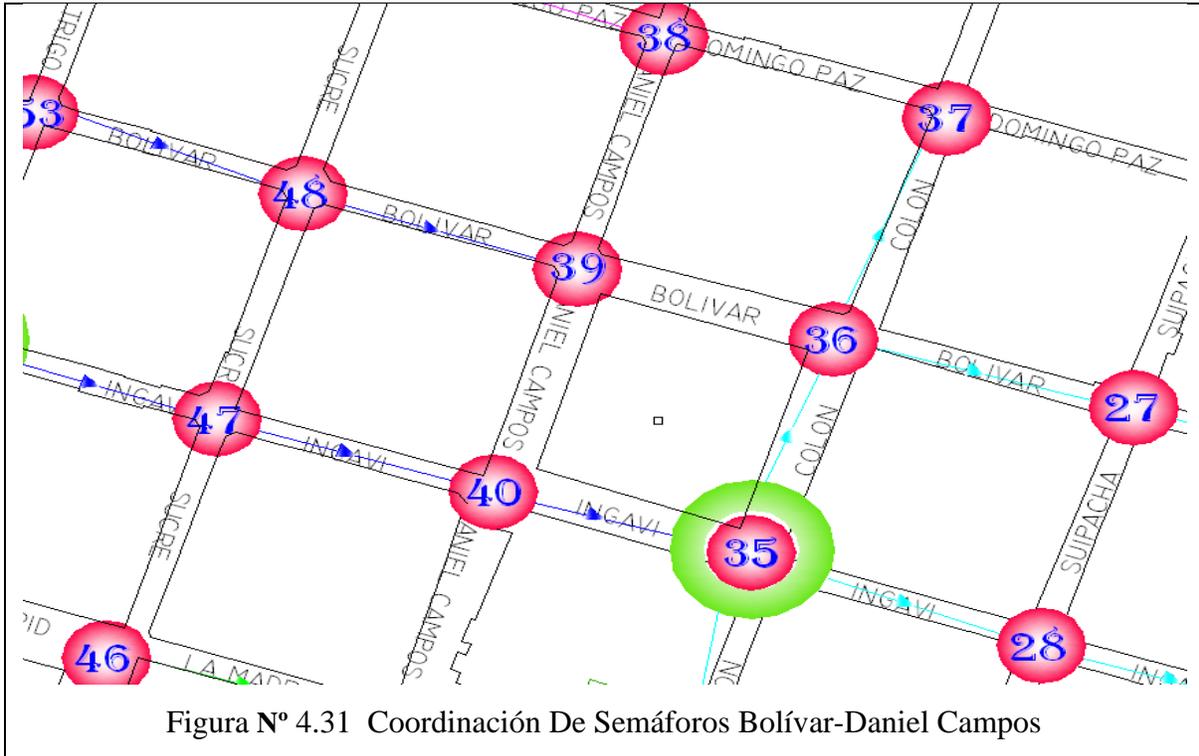
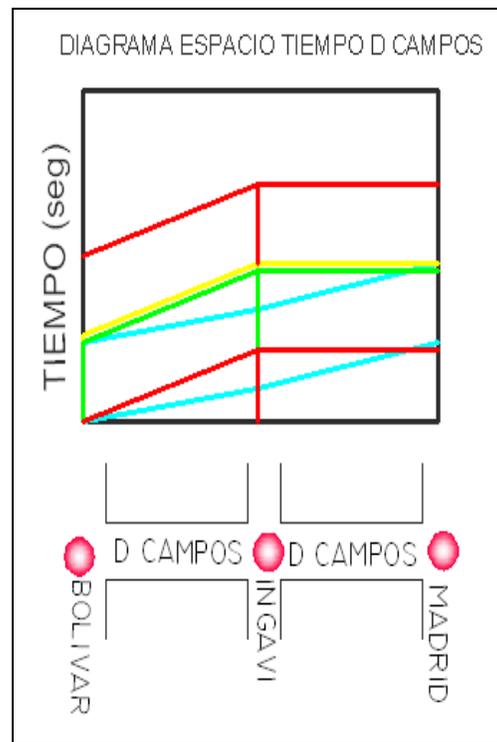
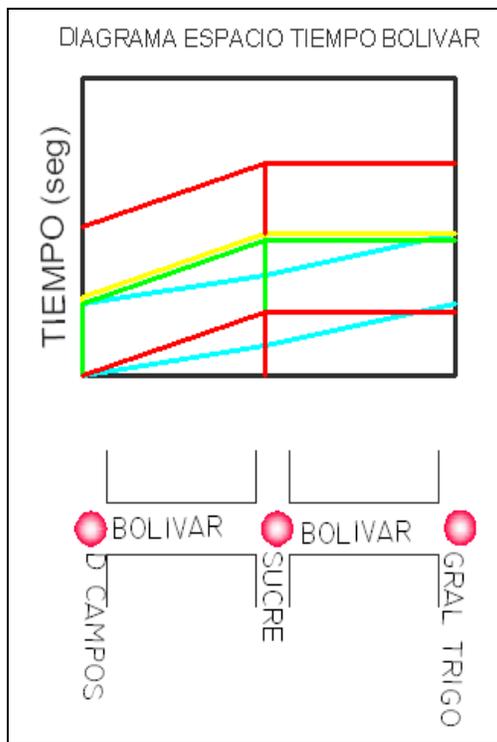


Figura N° 4.31 Coordinación De Semáforos Bolívar-Daniel Campos



La distribución de los tiempos esta en correlación con los volúmenes que atraviesan cada uno de los accesos

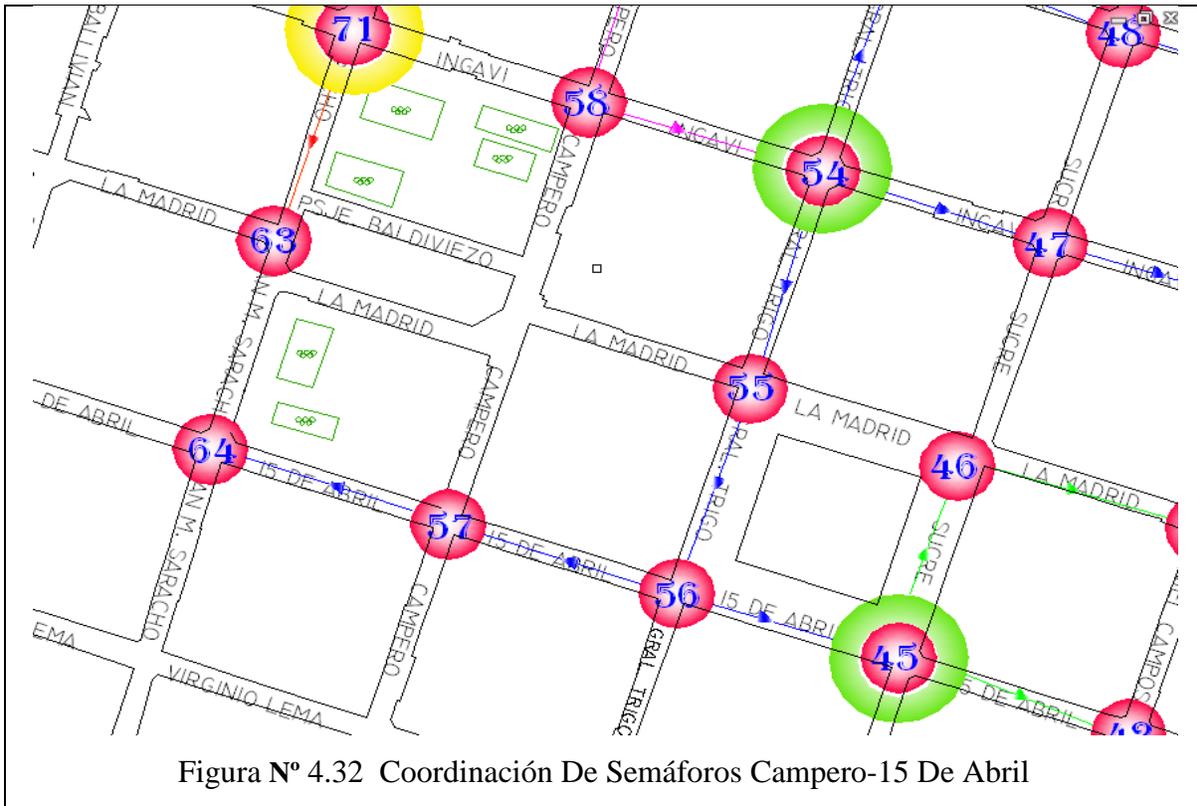
El flujo principal se concentra en la calle Bolívar y el secundario pasa por la calle Daniel Campos, la coordinación de los semáforos trabaja bajo la secuencia de Rojo-Rojo-Verde-Rojo es por esto que las posibles intersecciones más afectadas y en las cuales pueden darse los mayores problemas de congestionamiento son las siguientes: La Sucre-Bolívar y la Ingavi y Daniel Campos ambas después de atravesar la intersección estudiada en dirección de sus respectivos flujos.

La coordinación de los semáforos no es la indicada o la que debería de ser pero de alguna forma puede sobrellevar y distribuir de manera adecuada el flujo vehicular que circula por esta intersección.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	22	18		
VERDE	16	20		
AMARILLO	2	2		
CICLO	40	40		



#### 4.8.19 Intersección Campero-15 De Abril



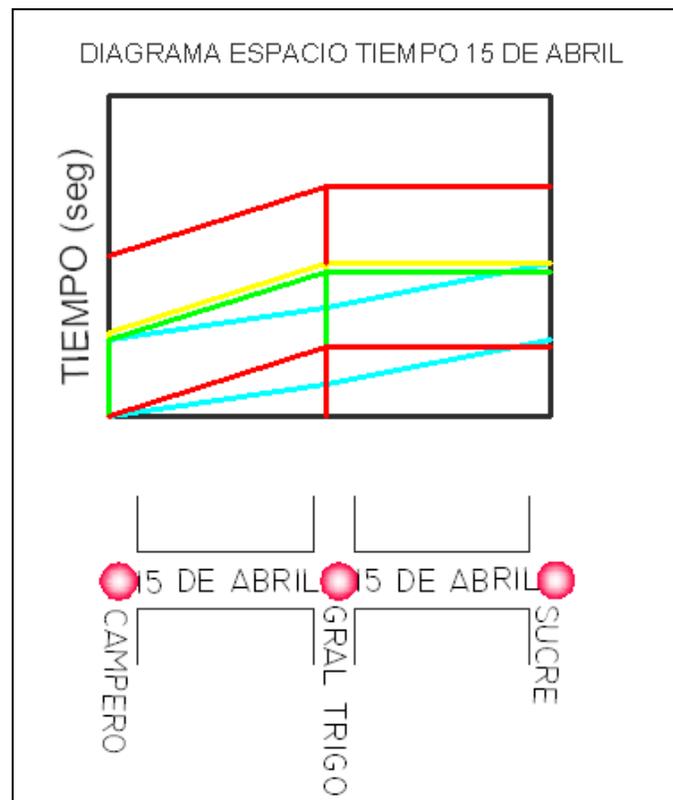
Los tiempos de los semáforos no están conforme deberían estar en proporción a los volúmenes por lo que ya se puede encontrar una de las causas para evitar el libre tránsito de los vehículos por esta intersección. El flujo principal tiene que presentar el mayor tiempo de verde para satisfacer la demanda de volumen existente en este caso el mayor tiempo se lo otorga al flujo secundario.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS				
	A	B	C	D	
ROJO	18	22			
VERDE	20	16			
AMARILLO	2	2			
CICLO	40	40			

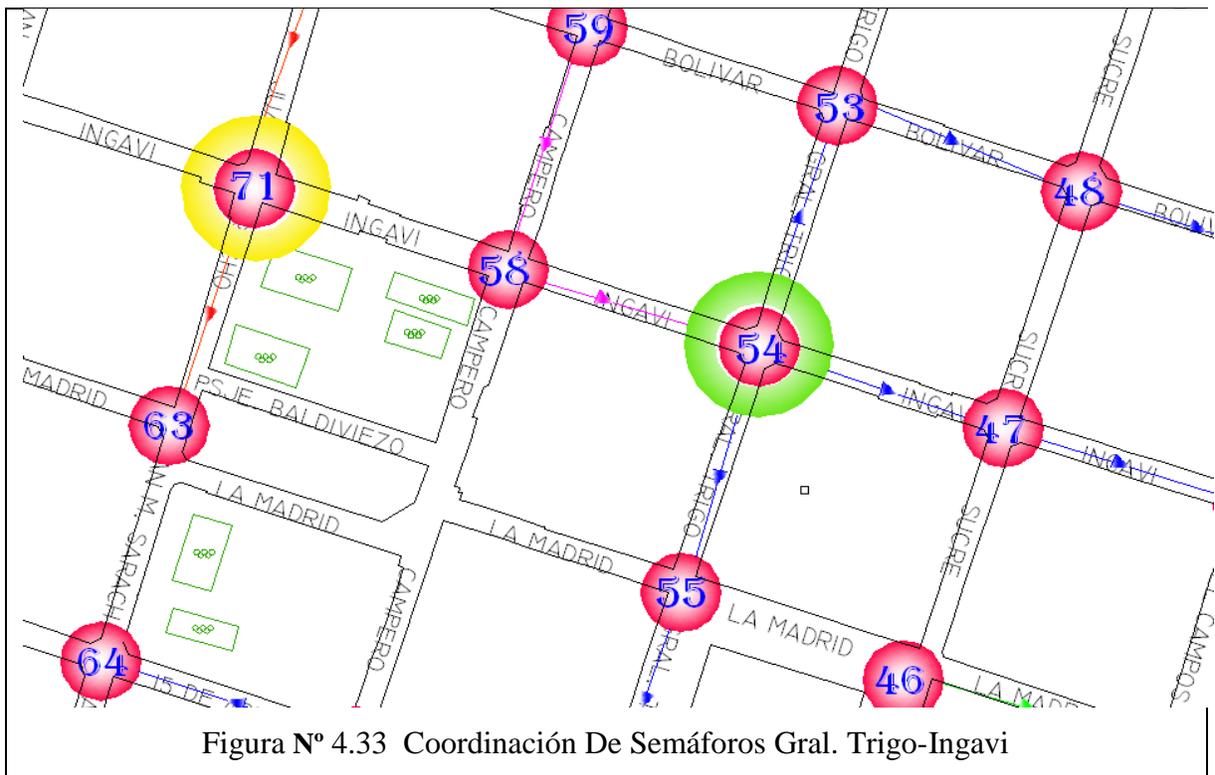
El flujo principal es atravesado por la calle 15 de Abril, se observa que la coordinación de los semáforos es aun mas distribuida que en los casos anteriores pero sigue existiendo un desfase inadecuado en los tiempos lo que puede provocar que ocasionalmente se provoquen detenciones innecesarias.

Para el flujo principal el punto crítico o posible crítico se encuentra en la 15 de Abril-Gral. Trigo. La intersección 15 de Abril-Campero solo afectaría al flujo principal en el normal desarrollo de su circulación.

El sistema alternado Rojo-Rojo-Verde-Rojo-Rojo es el utilizado en el funcionamiento de esta intersección lo que ayuda a amortiguar de sobremanera los posibles efectos que puedan causarse por el congestionamiento.



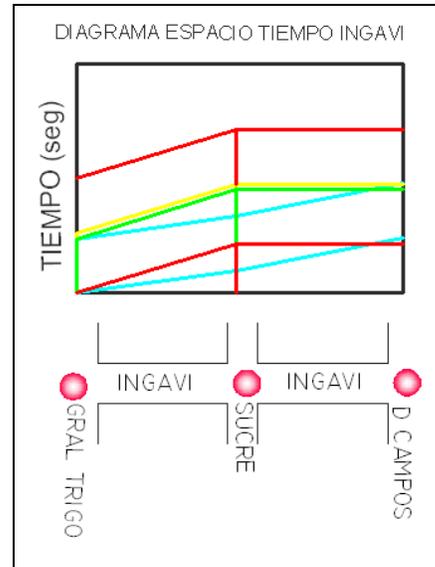
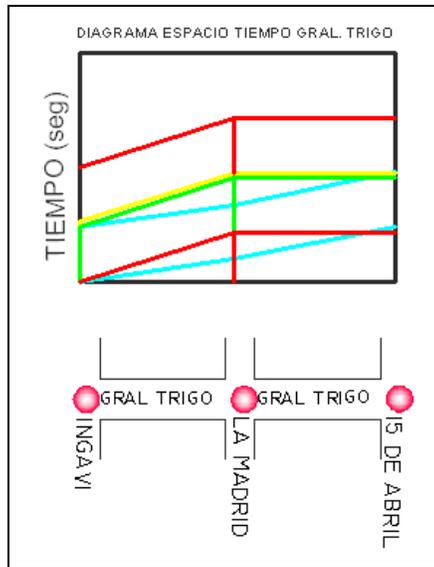
#### 4.8.20 Intersección Gral. Trigo-Ingavi



Los tiempos de los semáforos no están conforme deberían estar en proporción a los volúmenes por lo que ya se puede encontrar una de las causas para evitar el libre tránsito de los vehículos por esta intersección. El flujo principal tiene que presentar el mayor tiempo de verde para satisfacer la demanda de volumen existente en este caso el mayor tiempo se lo otorga al flujo secundario.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	22	18		
VERDE	16	20		
AMARILLO	2	2		
CICLO	40	40		



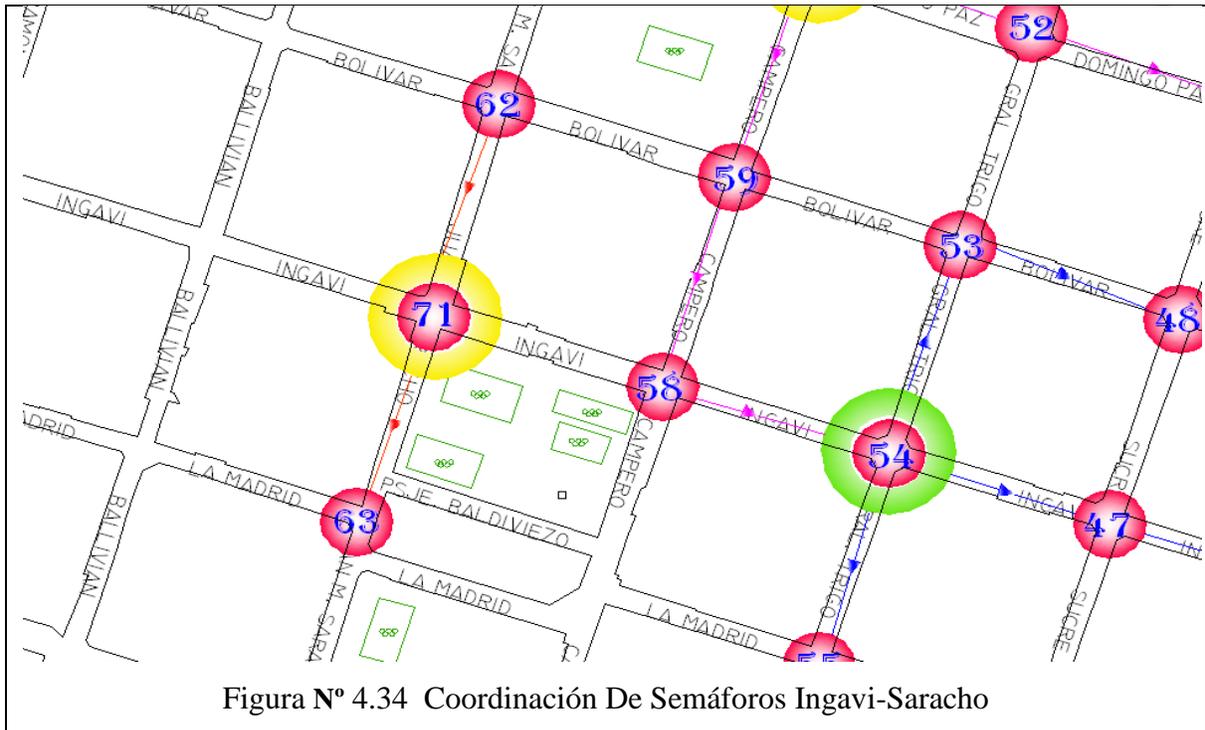


El flujo principal es atravesado por la calle Gral. Trigo, se observa que la coordinación de los semáforos es aun mas distribuida que en los casos anteriores pero sigue existiendo un desfase inadecuado en los tiempos lo que puede provocar que ocasionalmente se provoquen detenciones innecesarias.

Para el flujo principal el punto crítico o posible crítico se encuentra en la Gral. Trigo-La Madrid y para el flujo secundario en La Ingavi-Sucre.

El sistema alternado Rojo-Rojo-Verde-Rojo-Rojo es el utilizado en el funcionamiento de esta intersección lo que ayuda a amortiguar de sobremanera los posibles efectos que puedan causarse por el congestionamiento.

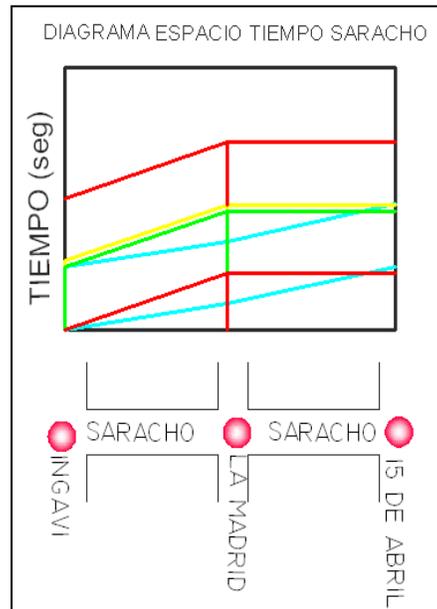
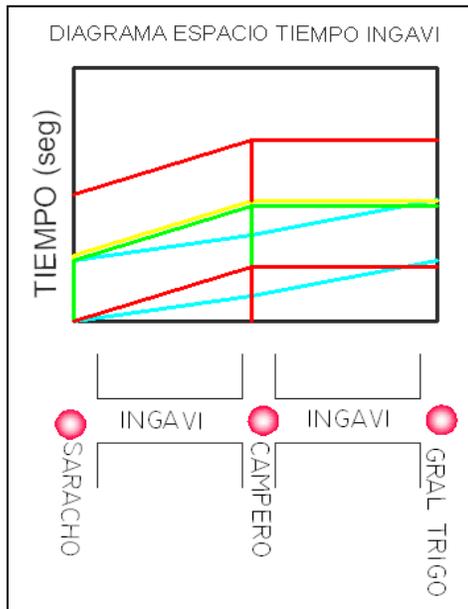
#### 4.8.21 Intersección Ingavi-Saracho



La distribución de los tiempos esta en correlación con los volúmenes que atraviesan cada uno de los accesos. Lo que quiere decir que al flujo principal le corresponde el mayor tiempo de verde de semáforo y al flujo secundario el menor tiempo.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	18	22		
VERDE	20	16		
AMARILLO	2	2		
CICLO	40	40		





El flujo principal es atravesado por la calle Juan Misael Saracho, se observa que la coordinación de los semáforos es aun más distribuida, pero sigue existiendo un desfase inadecuado en los tiempos lo que puede provocar que ocasionalmente se provoquen detenciones innecesarias.

Para el flujo principal el punto crítico o posible crítico se encuentra en la Saracho-La Madrid y para el flujo secundario en La Ingavi-Campero.

El sistema alternado Rojo-Rojo-Verde-Rojo-Rojo es el utilizado en el funcionamiento de esta intersección lo que ayuda a amortiguar de sobremanera los posibles efectos que puedan causarse por el congestionamiento.

#### 4.8.22 Intersección Domingo Paz-Campero

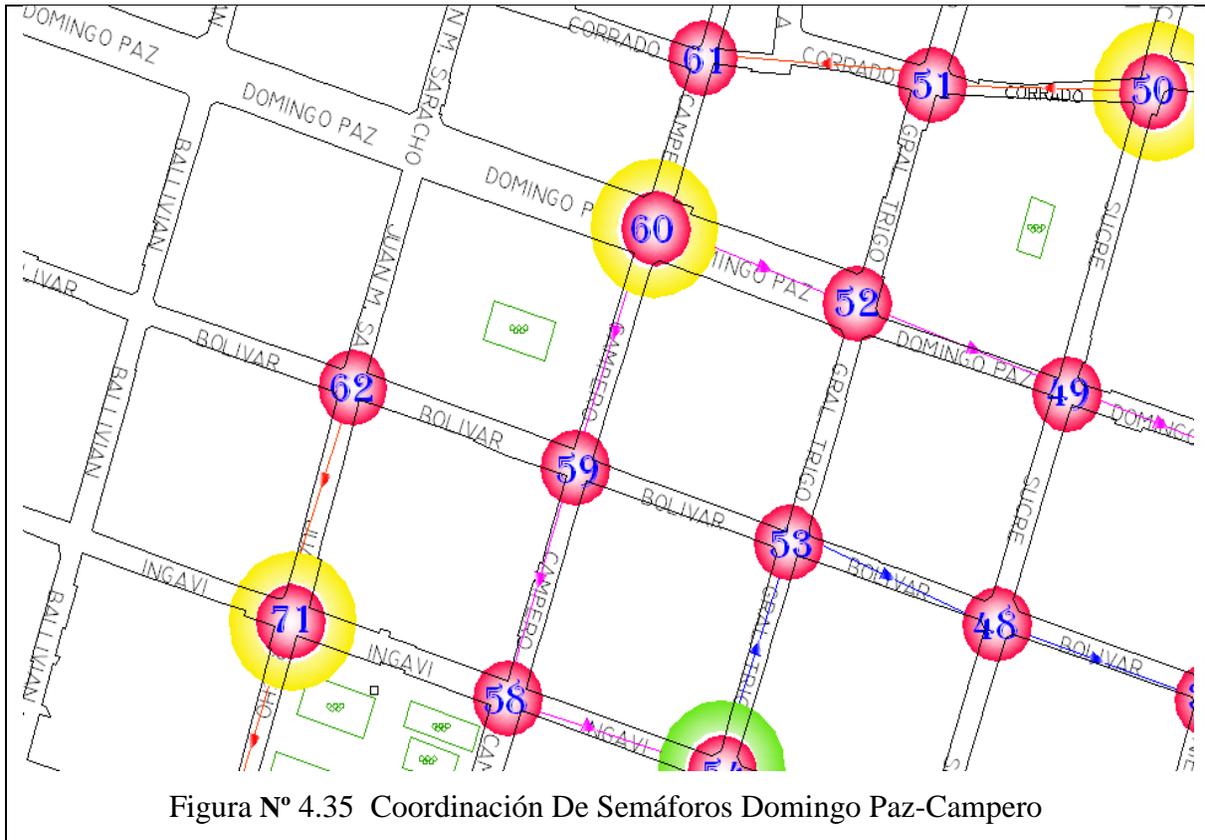


Figura N° 4.35 Coordinación De Semáforos Domingo Paz-Campero

La distribución de los tiempos esta en correlación con los volúmenes que atraviesan cada uno de los accesos. Lo que quiere decir que al flujo principal le corresponde el mayor tiempo de verde de semáforo y al flujo secundario el menor tiempo.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	22	22	18	
VERDE	16	16	20	
AMARILLO	2	2	2	
CICLO	40	40	40	



La intersección Domingo Paz-Campero es una de las pocas intersecciones de tres accesos que funcionan en el centro de la ciudad.

El flujo es casi distribuido de manera igual a través de la calle Campero Como de la calle Domingo Paz.

El sistema alternado Rojo-Rojo-Verde-Rojo-Rojo es el utilizado en el funcionamiento de esta intersección lo que ayuda a amortiguar de sobremanera los posibles efectos que puedan causarse por el congestionamiento.

El flujo principal es atravesado por la calle Campero, se observa que la coordinación de los semáforos es aun más distribuida, pero sigue existiendo un desfase inadecuado en los tiempos lo que puede provocar que ocasionalmente se provoquen detenciones innecesarias.

Para el flujo principal el punto crítico o posible crítico se encuentra en la Campero-Corrado y para el flujo secundario en Domingo Paz-Gral. Trigo.

#### 4.8.23 Intersección Sucre-Corrado

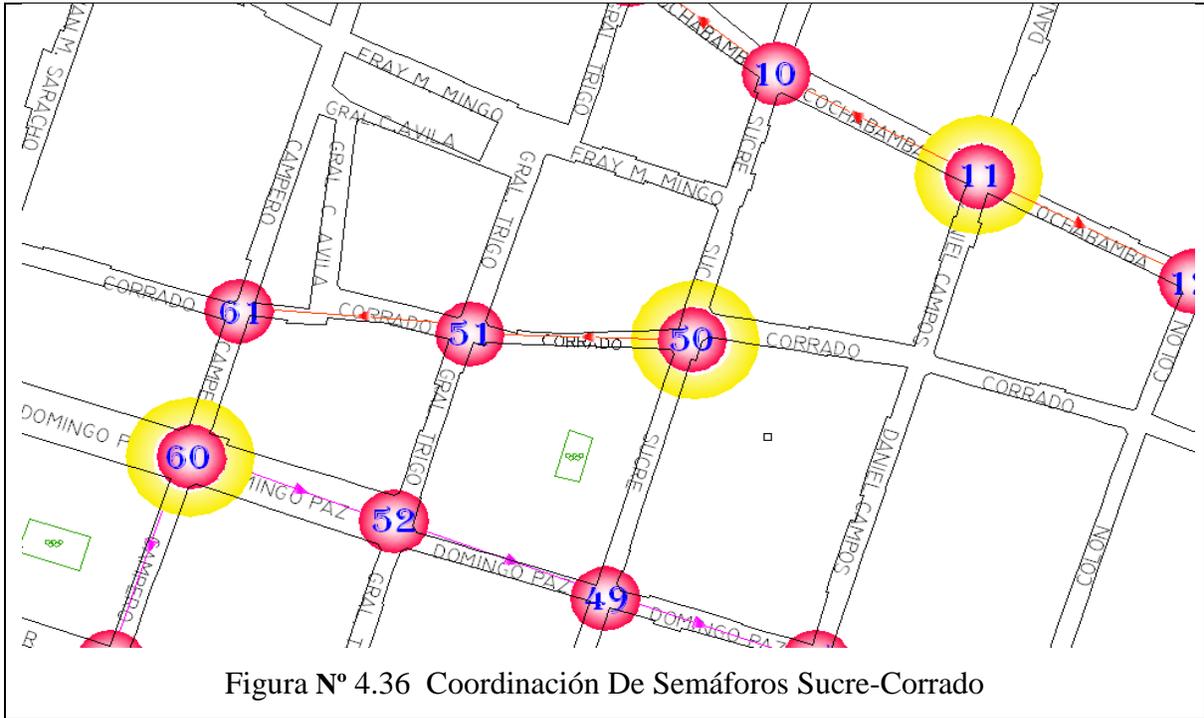
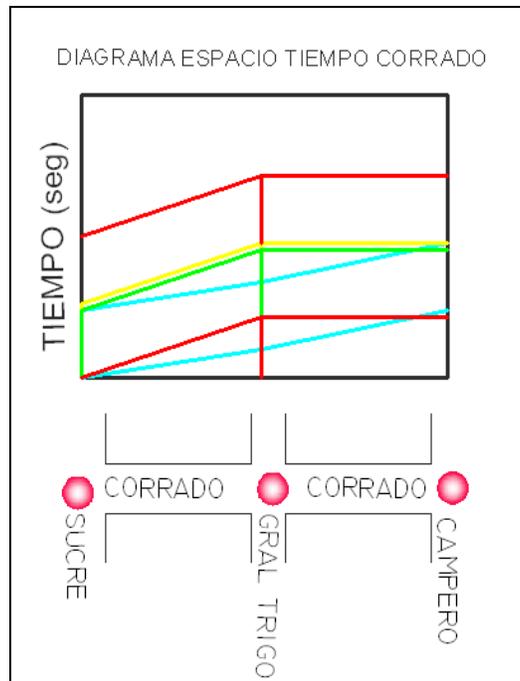


Figura N° 4.36 Coordinación De Semáforos Sucre-Corrado

La distribución de los tiempos esta en correlación con los volúmenes que atraviesan cada uno de los accesos. Lo que quiere decir que al flujo principal le corresponde el mayor tiempo de verde de semáforo y al flujo secundario el menor tiempo.

TIEMPOS DE SEMAFORO	ACCESOS			
	A	B	C	D
ROJO	22	18		
VERDE	16	20		
AMARILLO	2	2		
CICLO	40	40		





El congestionamiento por coordinación de semáforos solo se presenta en el flujo secundario que atraviesa la calle Corrado, donde la intersección crítica se encuentra en la Corrado y Gral. Trigo.

El flujo principal que atraviesa esta intersección se concentra en la calle Sucre.

El sistema alternado Rojo-Rojo-Verde-Rojo-Rojo es el utilizado en el funcionamiento de esta intersección lo que ayuda a amortiguar de sobremanera los posibles efectos que puedan causarse por el congestionamiento.

#### **4.9 ANALISIS DE LA INFLUENCIA DE PARAMETROS DE CAPACIDAD PARA EL PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES AL CONGESTIONAMIENTO EN LOS ACCESOS DE LAS INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS.**

El objetivo de brindar una solución al congestionamiento parte por el principio de satisfacer la demanda vehicular que se presenta en cada uno de los accesos de las intersecciones semaforizadas entonces para esto se recomienda hacer un énfasis de todos aquellos parámetros que intervienen en la disminución de la oferta o capacidad del acceso y por lo tanto la disminuyen

El análisis de la influencia de los parámetros que intervienen en la disminución de la capacidad nos ayuda a plantear posibles soluciones a la mejora del flujo vehicular y la disminución del congestionamiento vehicular.

El proceso de análisis a seguir es el siguiente

#### **4.9.1 Exceso de demanda con relación a la oferta**

Si la demanda es mayor a la oferta es obvio que se produce un congestionamiento en la intersección por el exceso de vehículos y por la baja calidad de servicio que ofrece el acceso. Entonces para realizar una mejora a estas condiciones se debe llevar a cabo el análisis de los parámetros posteriores.

#### **4.9.2 Disminución en la capacidad por giro a la izquierda y giro a la derecha y posible solución**

La disminución en la capacidad de los accesos por el giro a la izquierda o la derecha se debe a la maniobra que realizan los vehículos que ingresan al acceso. Ya que estos vehículos al realizar cualquiera de estos movimientos retardan el flujo.

Si la disminución en la capacidad es notable debido a estos movimientos puede plantearse la alternativa de modificar el flujo vehicular de mayor demanda por arterias menos conflictivas, por ejemplo se da el caso de poder modificar la ruta del transporte público.

#### **4.9.3 Disminución en la capacidad por la presencia de vehículos pesados y posible solución**

Los vehículos pesados también pueden ser determinantes a la hora del planteamiento de soluciones a la mejora de la capacidad en intersecciones semaforizadas, si la cantidad de vehículos que atraviesan el acceso en cada una de las intersecciones es de número considerable entonces se producirá un congestionamiento que se debe al lento avance que caracteriza estos vehículos por su volumen y carga que impide su fácil desplazamiento a través de las diferentes arterias viales.

La solución ante este parámetro sería la de impedir el ingreso de estos vehículos a determinadas horas de mayor demanda por algunas de las arterias que presenten los accesos con congestión debido a la gran cantidad de circulación de vehículos pesados

#### **4.9.4 Disminución en la capacidad por la presencia de paradas de transporte público y posible solución**

Las paradas designadas al transporte público, son una necesidad de todos aquellos usuarios de este medio, pero se debe comprender que un vehículo estacionado por un determinado tiempo provoca una cantidad de cola en el respectivo flujo vehicular lo que genera congestión.

Las paradas del transporte público generan una disminución de la capacidad de nivel de servicio del acceso en determinado porcentaje. Si este porcentaje es elevado entonces se plantea:

- Retirar las paradas de los accesos donde su influencia sea considerable con el congestión.
- Si se diseñan paradas para cualquier acceso en una vía, en lo posible colocarlos después de la intersección porque en esta ubicación su influencia es menor que si se los colocara antes de la intersección.
- No colocar paradas de transporte público en accesos semaforizados sino que más bien se puede utilizar el tiempo de detención por el semáforo, como tiempo de parada.
- Las paradas no deben de ser de capacidad rebasada en comparación a la demanda que presentan.

#### **4.9.5 Disminución en la capacidad por estacionamiento y posible solución**

La disminución en la capacidad por estacionamiento es notable debido a que los vehículos estacionados provocan deficiencias para los vehículos que realizan las maniobras de giro.

Además de eso la capacidad también se ve afectada por que el funcionamiento de la misma se ve reducido en el número de carriles utilizables para cada acceso, si el acceso tiene un reducido número de carriles entonces el estacionamiento provocara mayor reducción de

utilización de carriles en la capacidad de los accesos, lo que culminaría con un congestionamiento forzoso.

Se plantea las siguientes posibles soluciones para este problema.

- Prohibir los estacionamientos en accesos con reducido número de carriles.
- Prohibir los estacionamientos en accesos semaforizados.
- Construir áreas de parqueo para aquellos lugares donde demanden un gran número de vehículos para estacionamiento.
- Crear carriles exclusivos para estacionamiento.
- Prohibir estacionamiento en accesos donde ya estén permitidas las paradas para el transporte público.

#### **4.9.6 Disminución en la capacidad por el tiempo de semáforo y posible solución**

La disminución en la capacidad por el tiempo de semáforo se debe al tiempo de verde o de paso con que cuenta el semáforo que opera en el acceso. Si la relación de tiempo de verde con el tiempo de ciclo es considerable entonces significara que los vehículos que ingresan al acceso se detienen por mayor tiempo que al que disponen para atravesarlo.

Para mejorar este parámetro o para darle un mejor funcionamiento a la intersección se propone las siguientes posibles soluciones:

- El flujo principal en el acceso siempre debe de contener el mayor tiempo de verde para que el congestionamiento no sea provocado por el semáforo.
- Los tiempos de los semáforos deben de estar en proporción a la velocidad y la cantidad de vehículos que atraviesan el acceso.
- Debe de diseñarse semáforos con el mayor tiempo de ciclo y de verde para así no perjudicar el libre flujo de vehículos.
- Es recomendable el uso de semáforos accionados por el tránsito para un mejor desempeño de la intersección semaforizada.
- La coordinación de los semáforos es muy importante para no provocar detenciones innecesarias debido a la mala coordinación de los semáforos.

La influencia que tiene cada uno de los parámetros para cada uno de los accesos de las intersecciones semaforizadas se detalla en los anexos correspondientes a cada intersección. Los resultados son expresados mediante diagramas de barras donde se puede observar y cuantificar el valor y el grado de influencia que tiene cada uno de los parámetros en la disminución de de la capacidad vehicular.

Los valores expresados en los gráficos son los siguientes.

- % De Exceso De Volumen
- % De Disminución En La Capacidad Por Giro A La Izquierda
- % De Disminución En La Capacidad Por Giro A La Derecha
- % De Disminución En La Capacidad Po Vehículos Pesados
- % De Disminución En La Capacidad Por Paradas De Transporte Publico
- % De Disminución En La Capacidad Por Estacionamiento
- % De Disminución En La Capacidad Por Tiempo De Semáforo

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

El presente estudio “Análisis del congestionamiento en intersecciones semaforizadas” proporciona las siguientes conclusiones

- Intersecciones más críticas según su capacidad:
  - Colon - Madrid
  - Bolívar -Daniel Campos
  - Virginio Lema – Suipacha
  - Méndez – Bolívar
  - Domingo Paz – Campero
  - Belgrano-España
  
- Las intersecciones mas criticas según flujo de saturación son:
  - Domingo Paz – Campero
  - Colon – Madrid
  - Saracho – Ingavi
  - Gral. Trigo – Ingavi
  - Bolívar – Daniel Campos
  - 15 de Abril – Campero
  - Virginio Lema - Suipacha
  
- Intersecciones con mayor tiempo para disipar las colas
  - Panamericana y Pje Ibáñez
  - Domingo Paz y Campero
  - 15 de Abril y Campero
  - Madrid y Oconnor
  - Cochabamba – Gral. Trigo
  - Bolívar – Daniel Campos
  - Sucre – Corrado
  - Colon - Madrid

- Intersecciones con mayor longitud de cola
  - Circunvalación – San Bernardo
  - Panamericana - Pje Ibáñez
  - Panamericana y La Paz
  - La Paz y Bolívar
  - Las Américas y Sucre
  - Madrid y Oconnor
  
- Entre las intersecciones con un considerable tiempo de demoras se tiene a:
  - Circunvalación – La Paz
  - Panamericana - Pje Ibáñez
  - Madrid y Oconnor
  - La Paz – Bolívar
  - Cochabamba – Gral. trigo
  - 15 de Abril – Campero
  
- Intersecciones con congestionamiento por mala coordinación de semáforos
  - Cochabamba – Gral. trigo
  - Cochabamba – Colon
  - Madrid – O`Connor
  - Méndez – Bolívar
  - Campero – 15 de Abril
  - Gral. Trigo – Ingavi
  - Virginio Lema – Suipacha
  - Madrid – Colon
  - Bolívar – Daniel Campos
  - Campero – 15 de Abril
  - Ingavi – Saracho
  - Domingo Paz – Campero
  - Sucre – Corrado

- Intersecciones que tiene mala distribución de tiempos de semáforo
  - Panamericana – Romero
  - Belgrano - España
  - Panamericana – La Paz
  - Bolívar – La Paz
  - Méndez – Bolívar
  - Campero – 15 de Abril
  - Gral. Trigo – Ingavi
  
- Parámetros con mayor influencia en la reducción de Capacidad
  - Estacionamiento Permitido
  - Paradas de transporte publico
  - Presencia de tiempos de verde en semáforo reducido con relación al volumen de demanda
  - Reducido ancho de acceso
  
- Las intersecciones más conflictivas o con parámetros de congestionamiento de valores mas considerables se encuentran en el área central de la ciudad de Tarija, donde se observa que las colas exceden los niveles máximos esperados, esto debido al excesivo flujo de demanda vehicular que circula por las calles del casco viejo de la ciudad.
- Para tomar medidas que ayuden a mejorar las condiciones de funcionamiento de las intersecciones es necesario cuantificar las relaciones anteriores.
- Las intersecciones semaforizadas deben de tener una coordinación de semáforos para que ayude al tránsito de vehículos mediante un régimen de flujo libre.
- Las intersecciones analizadas no tienen un diseño de cálculo previo para así asignarles los diferentes tiempos de semáforo, lo que hace suponer que esa sería una de las causas principales para su mal funcionamiento de los semáforos.
- La longitud de cola máxima que debería de presentarse en un acceso de una intersección, está en relación con el tiempo de rojo y la tasa de llegas o de demanda que se presenta en el acceso.

- Es necesario realizar el análisis de todos los accesos y tomar el más crítico para poder considerar todos aquellos factores que son los más desfavorables en el análisis del congestionamiento.
- Las posibles soluciones al congestionamiento en intersecciones semaforizadas tienen relación estricta con el flujo de demanda y la operación en el semáforo.
- Todas las características que identifican a las intersecciones mas criticas tienen en su mayoría relación entre sí por lo tanto es necesario buscar alguna alternativa que pueda mejorar alguno de los parámetros y por intermedio observar cómo cambian los demás parámetros de congestionamiento.
- En una intersección sobresaturada, donde los parámetros de congestionamiento, son exageradamente considerables debe buscarse alguna alternativa de solución que no provoque alteraciones negativas en las intersecciones adyacentes, entonces para esto el análisis también debe comprender las zonas que posiblemente pueden terminar perjudicadas

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Las recomendaciones planteadas para el mejor desempeño del análisis son las siguientes.

- Debe de buscarse comparación de algunos métodos más aproximados para el cálculo de todos aquellos parámetros que nos den a entender el congestionamiento.
- Los aforos deben de realizarse durante las horas de mayor demanda, pero en algunos casos estos periodos no son los reales sino los aproximados por lo que puede existir una discordancia de datos.
- La medición de los flujos vehiculares en lo posible se considera de realizarse de manera simultánea en todos los accesos de una intersección

Es necesario poner en práctica un conjunto de medidas para el control de la congestión vehicular, especialmente para el mejoramiento de la gestión y la productividad de la infraestructura existente. Se trata, por lo tanto, de diseñar políticas y medidas de carácter

multidisciplinario que permitan mantener la congestión bajo control, pues no puede pensarse en eliminarla del todo.

Se plantea algunas de las siguientes medidas para el control de la congestión vehicular

- Una apropiada demarcación y conservación de las calles,
- Generar estrategias de coordinación de semáforos.
- Mejorar hábitos normales de conducción de las personas
- La racionalización del transporte público y de los estacionamientos
- Crear nuevas alternativas de movilización; como ciclo rutas o ideas nuevas de transporte público.
- Realizar una adecuada distribución de paradas de transporte público de acuerdo a demanda de los usuarios, si es necesaria.

Con ello, es necesario construir una visión estratégica de largo plazo del desarrollo de la ciudad, que permita mejorar la movilidad.

Combatir la congestión tiene costos muy altos. Algunos deben ser repuestos o soportados por los organismos públicos que implantan las medidas; otros afectan a la ciudadanía en general otros le competen directamente a los automovilistas.

Todo indica que debe intentarse un conjunto de acciones sobre la oferta de transporte, así como sobre la demanda, de modo de racionalizar el uso de las vías públicas.

La aplicación de regulaciones sobre los estacionamientos y el escalonamiento de horarios parecen llevar ventaja en los sentidos indicados. La mejor estrategia podría ser una aplicación paulatina, en combinación con medidas sobre la oferta en función de los niveles de congestión prevalecientes. Lo que sí parece claro es que la lucha será permanente, a menos que por otras razones baje la demanda de transporte.

## **BIBLIOGRAFIA**

- **RAMBERT FERNANDO ARANDIA BALDERRAMA – TESIS- “Estudio Sobre La Influencia De La Semaforización En La Capacidad Vehicular En Tramos Urbanos De Mayor Circulación”.** Bolivia, Tarija, noviembre 2006
  
- **CAL Y MAYOR REYES ESPINDOLA RAFAEL –Ingeniería De Transito (Fundamentos y Aplicaciones).** México, séptima edición 1994.
  
- **BOX; PAUL C., and Oppenlander, JOSEPH C. Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito, Traducción del “Manual Off Traffic Engineering Studies”,** Cuarta Edición, 1976, Institute of Transportation Engineers, Inc., Co-editores: Coordinación General de Transporte, D: D: F: Asociación de Ingeniería de Transportes., México 1985.
  
- **CARLOS KREAMER, VISTOR SANCHEZ BLANCO, JUAN G. GARDETA OLIVEROS. Caminos y Aeropuertos. Departamento de Ingenieros, ETS: de Ingenieros de Caminos, Conalco y Puertos.** Universidad Politécnica de Madrid
  
- **HCM 2000,** soportado por el Comité Ejecutivo 2000 de la TRB (Transportation Research Board)
  
- **NICHOLAS J. GARBER, LESTER A. HOEL, Ingeniería De Transito Y Carreteras,** 3º ed. Impreso en México.
  
- **Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito. Programa de Asistencia Técnica en Transporte Urbano para las Ciudades Medias Mexicanas. Manual Normativo Tomo XII.** Secretaría de Desarrollo Social.