

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

AT,	tipo de arribo o llegada
C,	longitud de ciclo (s)
c,	capacidad (veh/h)
CBD,	Central Business District
cL,	capacidad del grupo de carriles por carril (veh/h)
d,	demora por control (s/veh)
d1,	demora uniforme o demora media percentil (s/veh)
d2,	demora incremental (s/veh)
d3,	demora por cola inicial (s/veh)
dA,	demora para el acceso A (s/veh)
DelayCoord,	demora uniforme con coordinación (s/veh)
DelayUncoord,	demora uniforme asumiendo llegadas aleatorias (s/veh)
dI,	demora para la intersección (s/veh)
dp,	demora uniforme por vehículo para el escenario percentil p
ds,	demora saturada (s/veh)
du,	demora no saturada (s/veh)
e,	extensión del tiempo de verde efectivo (s)
ET,	factor de equivalencia en vehículos livianos
fa,	factor de ajuste por tipo de área
fB%,	factor de cola percentil
fbb,	factor de ajuste por bloqueo de buses que paran cerca de la
fg,	factor de ajuste por pendiente del acceso
FHP,	factor de hora pico
fHV,	factor de ajuste por vehículos pesados
FIFO,	First-In-First-Out
fLpb,	factor de ajuste por peatones y bicicletas para giros a la
fLT,	factor de ajuste por giros a la izquierda
fLU,	factor de ajuste por utilización de carriles
fp,	factor de ajuste por estacionamientos adyacentes al grupo de
fPA,	factor de ajuste suplementario por grupos vehiculares que llegan durante el verde
fRpb,	factor de ajuste por peatones y bicicletas para giros a la derecha
fRT,	factor de ajuste por giros a la derecha
fW,	factor de ajuste por ancho de carriles

G, tiempo de verde (s)
 g, tiempo de verde efectivo (s)
 g/C, proporción de verde efectivo
 h, headway de saturación (s)
 HCM, Highway Capacity Manual
 HCS, Highway Capacity Software
 headwayprom, headway promedio (s)
 I, factor de ajuste por ingresos a la intersección corriente arriba
 ICU, Intersection Capacity Utilization
 k, factor de demora incremental
 kB, factor de ajuste del segundo término relacionado con llegadas
 L, tiempo perdido total (s) o espaciamiento de vehículos (pies o m)
 l1, tiempo perdido total de arranque (s)
 l2, tiempo perdido de despeje (s)
 L4, punto de registro de partidas
 LAD, punto de registro de arribos
 LADL4, longitud del segmento de análisis en el acceso (m)
 LIFO, Last-In-First-Out
 N, número de vehículos en la cola (veh) o número de carriles del grupo de carriles
 NLG, número de carriles del grupo de carriles
 NS, nivel de servicio
 P, proporción de vehículos que llegan durante la fase verde
 p1, primer parámetro para el factor de cola percentil
 p2, segundo parámetro para el factor de cola percentil
 p3, tercer parámetro para el factor de cola percentil
 PF, factor de ajuste de demora uniforme por coordinación
 PF2, factor de ajuste de colas por efectos de coordinación
 Q%, cola percentil (veh)
 q, tasa de llegadas o "v" (veh/h)
 Q, máxima extensión de la cola (veh o pies)
 Q', máxima cola luego de dos ciclos calculada por Synchro cuando $v/c > 1$ (pies)
 Q1, primer término de los vehículos en cola (veh)
 Q2, segundo término de los vehículos en cola (veh)
 Qb, cola inicial (veh)

- QbL, cola inicial al inicio del periodo de análisis (veh)
- Qg, máxima extensión de cola al inicio de verde (veh)
- Qo, cola excedente o remanete (veh)
- R, tiempo de rojo (s)
- r, tiempo de rojo efectivo (s)
- R^2 , coeficiente de correlación
- Rp, relación de pelotón
- s, tasa de flujo de saturación o tasa de salidas (veh/h)
- sL, tasa de flujo de saturación para el grupo de carriles por carril
- so, tasa de flujo de saturación ideal (veh/h)
- T, duración del periodo de análisis (h)
- t, duración de la demanda insatisfecha (h)
- T4, instante de cruce de la línea de parada del cuarto vehículo de la
- Tc, tiempo de despeje de cola inicial (h)
- ti, tiempo perdido para el i-ésimo vehículo de la cola (s)
- tL, tiempo perdido (s)
- Tn, instante de cruce de la línea de parada del n-ésimo vehículo de la
- TRB, Transportation Research Board
- u, parámetro de demora
- V, volumen horario (veh/h)
- v, tasa de flujo de llegada o "q" (veh/h)
- v/c, relación volumen-capacidad o grado de saturación
- v95, volumen ajustado al percentil-95 de la cola (veh/h)
- vA, flujo ajustado para el acceso A (veh/h)
- vc, número de vehículos por ciclo (veh)
- VFL, velocidad de flujo libre (veh/h)
- vi, tasa de flujo de demanda actual o proyectada para el grupo de carriles i (veh/h)
- vl, tasa de flujo del grupo de carriles incluyendo la cola inicial presente (veh/h)
- vL, tasa de flujo para el grupo de carriles por carril (v/h)
- vP, tasa de flujo durante los 15 minutos pico (veh/h)
- vp, volumen ajustado para el percentil p (veh/h)
- X, grado de saturación o relación v/c

- X_c , relación v/c crítica o grado de saturación crítico para la intersección
- X_L , relación volumen-capacidad v_L/c_L
- Y , intervalo de cambio y de despeje (s)

CAPITULO I INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION

Conducir, además de caminar, hablar y comer, es la habilidad más ampliamente ejecutada en el mundo de hoy y posiblemente la más desafiante. Esto afirmaba Richard Rothery, uno de los pioneros dentro de la investigación en cuestiones de transporte, ya en el año 1968.

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

En la actualidad, dos de las herramientas de análisis de intersecciones semaforizadas más empleadas en el medio local son el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM) y el software Synchro. Sin embargo, es común que durante su aplicación no se considere el hecho de que tanto el HCM como Synchro han sido desarrollados bajo el respaldo de una gran cantidad de investigaciones llevadas a cabo principalmente en los Estados Unidos de América; y que por lo tanto los resultados obtenidos requieren un análisis para observar las variables que hacen que se diferencie en nuestro medio.

La presente investigación emplea las herramientas del HCM 2000 y Synchro 8 para el análisis de cuatro intersecciones semaforizada típicas dentro de la ciudad de Tarija, así mismo compara los resultados obtenidos y los verifica con mediciones directas de los parámetros en campo.

1.2 JUSTIFICACION

Las intersecciones semaforizadas constituyen uno de los componentes más complejos de un sistema vial. Para analizarlas hay que tener en cuenta una amplia variedad de variables, tales como, intensidad y distribución de los movimientos vehiculares, la composición del tránsito, las características geométricas de la vía y los detalles de la aplicación de los semáforos.

La necesidad de predecir el comportamiento del tráfico urbano de una zona determinada para su analisis, ante la implementación de semáforos o el cambio los ciclos de estos, es de gran importancia, ahorrando costos y llegando a implementar un funcionamiento óptimo. Todo es ahora posible, mediante el uso de simuladores, que puedan darnos pautas para la mejor toma de decisiones cuando se realizan proyectos ingenieriles de estas características. Es por dichas razones que la aplicación de simuladores para verificar, estudiar y evaluar el impacto que tendrá una obra vial en el comportamiento del tráfico urbano es importante, puesto que da al proyectista una herramienta vital y una visión del impacto del proyecto, antes que éste sea implementado.

1.3 DISEÑO TEORICO

1.3.1 SITUACION PROBLEMICA

Las metodologías para el análisis operacional de intersecciones semaforizadas, HCM 2000 y Synchro 8, son muy utilizadas y aceptadas en los Estados Unidos de América. Sus parámetros y ecuaciones han sido validados para analizar el funcionamiento de intersecciones aisladas con problemas relativamente moderados de congestión. Estos procedimientos son rápidos y confiables para predecir si una intersección operará por debajo o encima de su capacidad. Sin embargo, los procedimientos son generalmente limitados en su habilidad para evaluar sistemas complejos.

En Bolivia, comúnmente, los consultores e instituciones aplican estas metodologías considerando los valores por omisión que recomienda el HCM, y no toman en cuenta las limitaciones mencionadas líneas arriba, ni recolectan toda la información de campo referida a la circulación. De esta forma, los resultados obtenidos podrían no ser adecuados, no solo por la menor precisión obtenida al usar los valores por omisión, sino también por las características particulares observadas en las intersecciones peruanas como por ejemplo: altos porcentajes de vehículos pesados, estilo de manejo agresivo de los conductores, múltiples paradas de vehículos de transporte público y principalmente los tipos de conflicto que se producen dentro de las intersecciones.

1.3.2 PROBLEMA

¿El software de simulación es representativo en nuestro medio?

1.3.3 OBJETIVOS

1.3.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el tráfico vehicular y la semaforización de las intersecciones de estudio, que fluctúa en las horas pico mediante el software Synchro de simulación, con la finalidad de establecer la aplicabilidad de la herramienta de para fundar una solución basadas en modificaciones factibles.

1.3.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer el criterio para la determinación de la hora pico en cada una de las intersecciones estudiadas
- Estimar el grado de aplicabilidad del software de simulación Synchro en el comportamiento del tráfico en las intersecciones de estudio.
- Proveer un punto referencial mediante el presente trabaja para futuras

investigaciones de los valores que afectan la exactitud del software de simulación y su aplicabilidad en el comportamiento local.

- Evaluar si la aplicabilidad de las metodologías del HCM 2000 y Synchro depende de las diferentes demandas de tráfico (relación volumen/capacidad o relación v/c).
- Incentivar el desarrollo de investigaciones futuras que permitan establecer criterios generales para el empleo de las metodologías del HCM y Synchro en el análisis de intersecciones semaforizadas locales.
- Simular y las variables de mejora para las intersecciones de estudio.

1.3.4 HIPOTESIS

El software Synchro se aplica como una herramienta válida para la simulación en las intersecciones de estudio en horas pico.

1.3.5 VARIABLES

- **Independiente**

El flujo del tráfico en las intersecciones estudiadas.

- **Dependiente**

El comportamiento del tráfico en las intersecciones de estudio.

1.4 DISEÑO METODOLÓGICO

1.4.1 POBLACION

Flujo de tráfico vehicular interrumpido que ingresa a las intersecciones estudiadas.

1.4.2 MUESTRA

Flujo de tráfico en horas pico en las intersecciones de estudio.

1.4.3 METODOS

La presente investigación está compuesta por seis etapas. La primera de ellas se encuentra conformada por todo el proceso de selección de la intersección de estudio, la misma que debía cumplir una serie de requisitos relacionados con las características geométricas, las características del flujo vehicular y las características del semáforo presentes; todo ello detallado en el capítulo III.

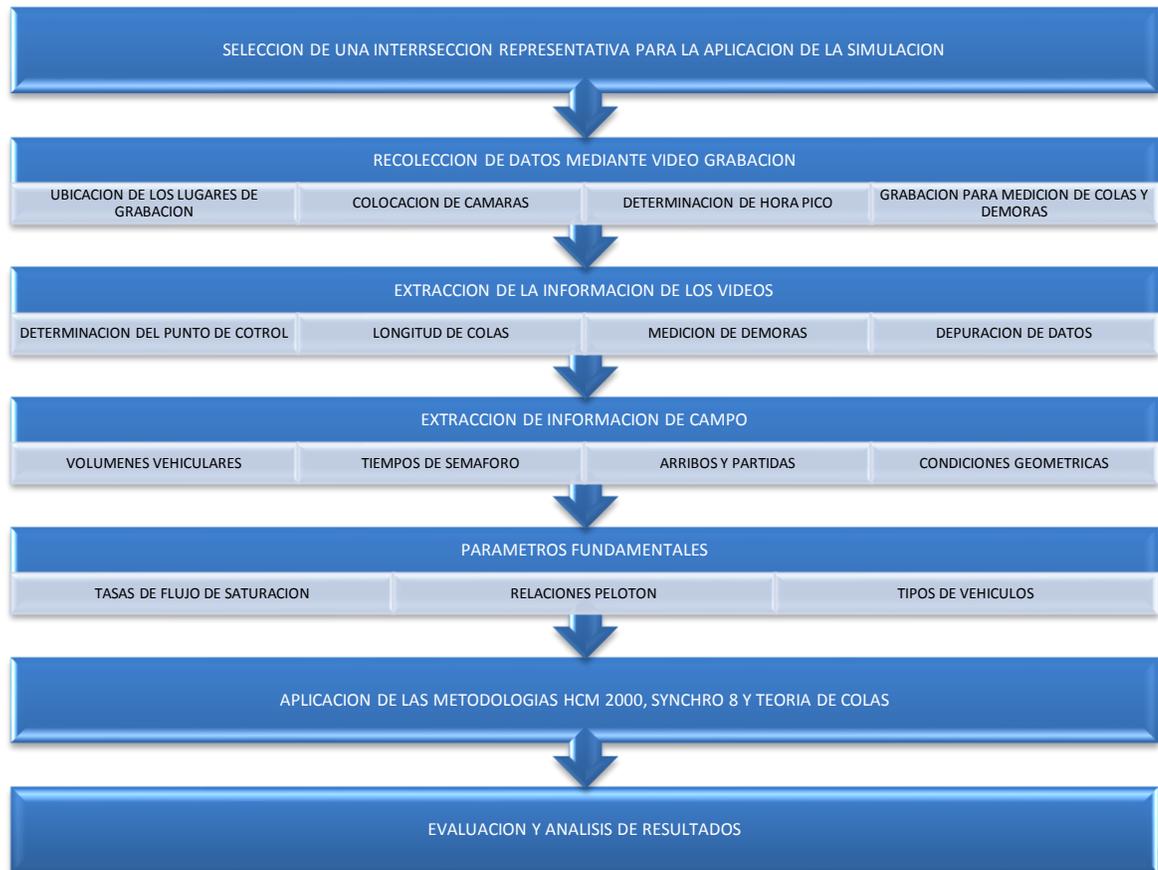
La segunda etapa corresponde al registro de datos de campo, para lo cual se empleará videograbación. El procedimiento estará básicamente determinado por la selección y obtención de los equipos y personal de grabación, así como también por la selección del lugar propicio para la ubicación de los mismos.

El proceso de extracción de la información de campo a partir de los videos constituye la tercera etapa de este estudio. Cabe mencionar que toda la extracción de datos y demás información relevante, como por ejemplo: volúmenes vehiculares y peatonales, tiempos del semáforo, arribos y partidas, entre otros; se realizara de manera manual.

Adicionalmente a la extracción de datos, también serán estimados algunos de los parámetros fundamentales, tales como las tasas de flujo de saturación o las relaciones de pelotón, por ello la cuarta etapa la conforman la estimación de este tipo de parámetros.

La quinta etapa comprende la aplicación de las metodologías de análisis para intersecciones semaforizadas HCM 2000 y Synchro 8.

Por último, la sexta etapa se encuentra conformada por la evaluación y análisis de los resultados obtenidos, para lo cual se emplearan tablas y diagramas comparativos en cada caso de estudio, así como también diagramas de dispersión y curvas de tendencia; con lo cual se podrá verificar el comportamiento de diversos parámetros como por ejemplo: tasas de flujo de saturación, grados de saturación, demoras, niveles de servicio y colas.



1.4.4 MEDIOS

- PC Intel Core i7 y RAM de 12 GB.
- Sistema Operativo Windows 8.
- Software de simulacio Synchro 8
- Planillas de aforo de vehículos.
- Cronometro.
- Wincha.

1.5 ALCANCE DE LA INVESTIGACION

La investigación se limita al análisis de cuatro intersecciones simples semaforizadas dentro de la zona ciudad de Tarija, clasificadas por el número de accesos, con semáforos cuyos controladores son de tiempo fijo.

Las intersecciones de estudio representan las diferentes variables encontradas en nuestro medio, como ser, numero de accesos, presencia o no de transporte público y diferentes tasas de saturación.

El estudio no se aplica al comportamiento de barrios aledaños ni cruces con avenidas principales, limitándose al área central de la ciudad.

En la investigación se emplean la versión 2000 del HCM y la versión 8 de Synchro, por lo tanto los resultados y conclusiones no pueden ser extrapolados a versiones anteriores o posteriores a las mencionadas.

El estudio no pretende generalizar los resultados obtenidos, sino que intenta brindar algunos criterios iniciales que deberán ser verificados y complementados con futuras investigaciones.

CAPITULO II REVISION TEORICA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En general, en nuestro medio no se dispone de literatura cuyo enfoque se encuentre relacionado con los objetivos del presente trabajo. Afortunadamente, algunas investigaciones realizadas en el exterior pueden dar un ápice de solución al problema planteado y ofrecen una guía para el presente trabajo.

Petraglia (1999) determina las medidas de eficiencia en intersecciones semaforizadas aisladas empleando el HCM y Synchro, entre otras herramientas. Así mismo, compara los resultados con valores medidos en campo. Petraglia divide su análisis en dos fases; en la primera de ellas compara diferentes softwares con la metodología del HCM mediante la solución de los tres problemas de ejemplo del capítulo 9 del HCM de 1994; y en la segunda compara los resultados obtenidos en cinco intersecciones semaforizadas con los parámetros reales medidos en campo. Así mismo, Petraglia emplea tasas de flujo de saturación por defecto (1900 veh/h/carril) y tasas de flujo de saturación medidas en campo; concluyendo que ninguno de los software estudiados reproduce acertadamente las demoras de parada, que las relaciones v/c muestran similitudes pero no son consistentes, que solo Synchro calcula valores de colas cercanos a los reales, y que el empleo de valores de flujo de saturación medidos directamente en campo mejora significativamente los resultados brindados por los softwares.

Bajo una concepción similar; Freeman, Ho y McChesney (1999) realizaron una evaluación de diversas técnicas de análisis para redes semaforizadas. En su trabajo, comparan diversas técnicas de análisis, entre ellas el HCS (*Highway Capacity Software*) y Synchro; pero además contrastan los resultados obtenidos para demoras de parada, niveles de servicio y colas; con los valores reales medidos en campo. El estudio concluye que los métodos de Synchro, HCS y SimTraffic calculan valores de demoras de parada que brindan el mismo nivel de servicio, pero encuentra

diferencias en las demoras de hasta 20% con respecto de las demoras medidas. El estudio también indica que Synchro predice colas ligeramente menores a las observadas y que por lo general SimTraffic es más acertado en ambientes urbanos catalogándolo como el mejor identificando problemas de tráfico.

Por otro lado, Washburn y Larson (2002) comparan las metodologías de los programas TRANSYT-7F, Synchro 4 y HCS, dando especial atención a la demora por control. En este estudio se analiza una red con diez intersecciones semaforizadas, concluyendo que aun con datos de entrada idénticos pueden esperarse diferencias importantes entre los resultados brindados por los softwares utilizados; a no ser que la intersección sea prefijada, presente llegadas aleatorias en todos sus accesos y además todos sus movimientos sean protegidos. Por último, también indican que el método de demora percentil de Synchro puede modelar con mayor detalle los efectos de actuación y coordinación de semáforos.

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO VEHICULAR

Según Ross, McShane y Prassas (en Radelat, 2003, p. 133), los parámetros que caracterizan el flujo vehicular pueden clasificarse en dos categorías. La primera corresponde a los *parámetros macroscópicos*, que expresan las características de las corrientes vehiculares en conjunto; y la segunda a los *parámetros microscópicos*, que caracterizan la interacción de vehículos individuales dentro de la corriente.

2.2.1 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS

Volumen: es el número de vehículos que pasan por un punto durante un periodo determinado. Generalmente se expresa en vehículos por hora (veh/h), aunque esto no implica que sea medido específicamente durante una hora (Fernández, 2008, p. 24).

Tasa de flujo: representa el número de vehículos que pasan por un punto durante un intervalo menor de 1 hora (normalmente de 15 minutos), pero expresado como una

tasa horaria equivalente (veh/h) (TRB, 2000, cap. 7).

A la relación entre el volumen horario total y la tasa de flujo pico dentro de la hora se denomina *factor de hora pico*, calculado con la Ecuación 1 (TRB, 2000, cap. 7).

$$FHP = \frac{\text{Volumen horario}}{\text{Tasa de flujo pico (dentro de la hora)}} \quad (\text{Ec.1})$$

Velocidad: es la relación entre el espacio recorrido y el tiempo recorrido (Radelat, 2003, p. 136). Normalmente se expresa en kilómetros por hora (Km/h).

Densidad: es el número de vehículos por unidad de longitud de la vía (Radelat, 2003, p. 136) y se expresa en vehículos por kilómetro (veh/Km).

2.2.2 PARÁMETROS MICROSCÓPICOS

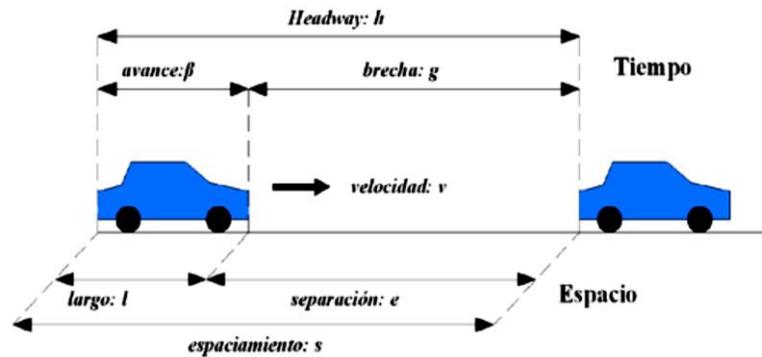
Estos parámetros se pueden clasificar en dos grupos (Radelat, 2003, pp. 133-134), los *temporales* (headway, brecha y paso) y los *espaciales* (espaciamiento, separación y longitud).

Headway: es el intervalo de tiempo transcurrido entre el paso de puntos homólogos de vehículos consecutivos (v.g. entre ejes delanteros). Por lo general se mide en segundos (Fernández, 2008, p. 25).

Espaciamiento: es la distancia, en metros, entre dos vehículos consecutivos, que se mide desde puntos homólogos (Radelat, 2003; Fernández, 2008).

Estos y otros parámetros microscópicos son representados en la Figura 1.

Fig 1 Parámetros microscópicos



Fuente: (Fernández, 2008, p. 27)

2.3 MODELACIÓN DEL TRÁFICO

La modelación del tráfico permite conocer las características actuales y predecir las características futuras del flujo vehicular a través de relaciones entre los parámetros que lo caracterizan. Existen varios niveles de modelación y su empleo dependerá básicamente del grado de detalle que se requiera (Cabrera, 2007). Entre los principales niveles podemos mencionar: modelación macroscópica, modelación microscópica y modelación mesoscópica.

Cabe mencionar que los conceptos y relaciones empleados por el HCM y Synchro provienen de un enfoque macroscópico del tráfico; por tal motivo los niveles de modelación microscópica y mesoscópica no son objeto de este estudio.

Los modelos macroscópicos analizan el tráfico como un todo sin considerar las características de los vehículos individualmente (Yand, 2007). Estos modelos relacionan los parámetros macroscópicos de volumen, densidad y velocidad; a través de la denominada *ecuación fundamental del tráfico* (Ecuación 2).

$$\text{volumen} = (\text{densidad}) \cdot (\text{velocidad}) \quad (\text{Ec.2})$$

2.4 FLUJO DISCONTINUO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

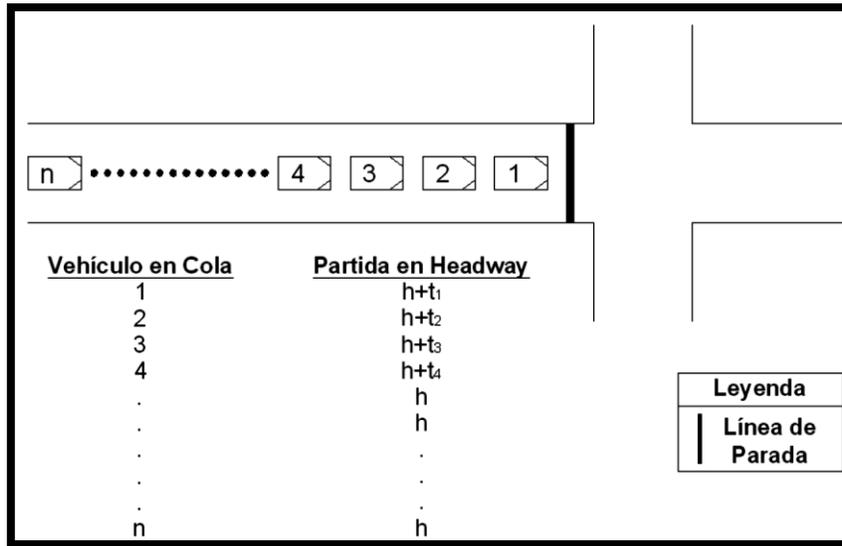
En áreas urbanas la circulación de vehículos es interrumpida debido a los cruces entre calles y/o avenidas, lo que genera un flujo discontinuo. El principal dispositivo de regulación de tránsito en estas áreas es el semáforo, que se encarga de distribuir los diversos movimientos conflictivos durante intervalos de tiempo periódicos, ya sea restringiéndolos o permitiéndolos. Por lo tanto, en su análisis no basta considerar solo las características geométricas y la composición del tráfico, sino que además se debe incorporar el efecto de la distribución temporal.

La unidad física de análisis de estas intersecciones es el grupo de carriles, que consiste de uno o más carriles en un acceso de una intersección. Para cada grupo de carriles se presentan tres indicaciones del semáforo, que son: verde, amarillo y rojo. Además, la indicación de rojo puede incluir un periodo corto durante el cual todas las indicaciones son rojas (por seguridad para el despeje de la intersección), a lo que se denomina intervalo todo-rojo (TRB, 2000, cap. 10).

2.4.1 Headways de entrada

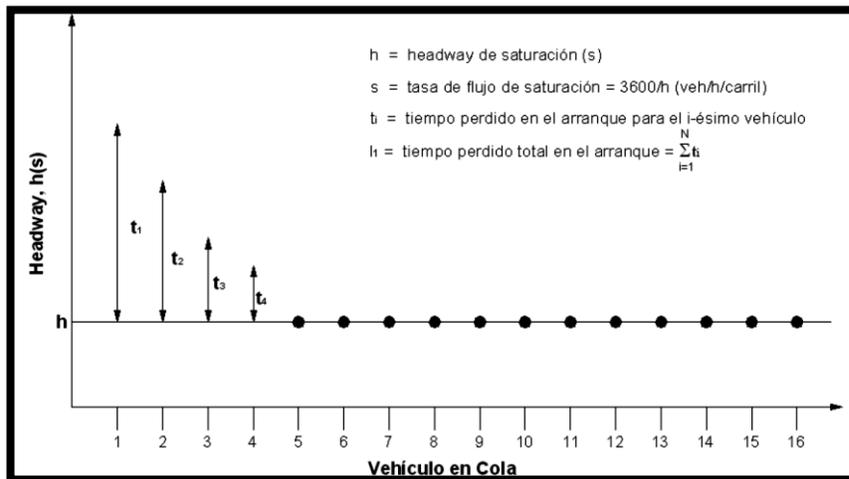
En una intersección semaforizadas se generan colas durante el periodo rojo; una vez que la indicación cambia a verde la cola inicia su movimiento y los vehículos cruzan la línea de parada ingresando a la intersección. El primer *headway de entrada* comprende el tiempo transcurrido entre el inicio del verde y el paso de los ejes frontales del primer vehículo (incluye el tiempo de reacción-arranque del conductor), el segundo headway comprende el tiempo entre el paso del eje frontal del primer vehículo y el eje frontal del segundo (será menor debido a que la reacción-arranque ocurre en simultaneo con el primer headway). Los demás vehículos siguen un procedimiento similar hasta que el efecto de reacción-arranque se disipa y el headway se hace constante, lo que ocurre generalmente luego del cuarto vehículo, en las Figuras 2 y 3 se representa este fenómeno.

Figura 2. Headways en una intersección semaforizada



Fuente: (TRB, 2000, p. 7-7)

Figura 3. Conceptos de headway de saturación, tasa de flujo de saturación y tiempo perdido



Fuente: (TRB, 2000, p. 7-8)

2.4.2 Tasa de flujo de saturación y tiempo perdido

Al headway mínimo que se genera a partir del cuarto vehículo se le suele llamar *headway de saturación* (h) y al volumen correspondiente se le denomina *tasa de flujo de saturación* (Radelat, 2000, p. 145). La *tasa de flujo de saturación* representa el número de vehículos por hora y por carril que pueden pasar por una intersección semaforizada si la indicación de verde estuviera disponible todo el tiempo, los vehículos no se detuvieran y no existieran headways demasiado largos (TRB, 2000, cap. 7). Por definición, se calcula mediante la Ecuación 3.

$$S = 3600/h \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

s : Tasa de flujo de saturación

h : Headway de saturación (s).

Tal como se muestra en las Figuras 2 y 3, cada vez que un flujo se detiene debe arrancar nuevamente, haciendo que los primeros vehículos experimenten headways mayores al headway de saturación; éstos incluyen incrementos de tiempo (t_i) denominados *tiempos perdidos de arranque*. El *tiempo perdido total de arranque* es la suma de los incrementos y se calcula con la Ecuación 4 (TRB, 2000, cap. 7).

$$l_1 = \sum_{i=1}^x t_i \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde,

l_1 : tiempo perdido total de arranque (s).

t_i : tiempo perdido para el i -ésimo vehículo de la cola

N : último vehículo de la cola.

Por seguridad, cuando se detiene una corriente vehicular, se requiere un periodo de tiempo para despejar la intersección antes de que otra corriente vehicular entre en

conflicto. A este intervalo, en el cual ningún vehículo usa la intersección, se le denomina *tiempo perdido de despeje* y se representa por l_2 (TRB, 2000, cap. 7). En consecuencia, el *tiempo perdido* (tL) para un determinado grupo de carriles en una intersección semaforizada será la suma de los tiempos perdidos de arranque y despeje (l_1+l_2).

2.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

Por simplificación, todo el tiempo perdido se aplica al inicio del movimiento del grupo de carriles. La Figura 4 y las Ecuaciones 5, 6 y 7 muestran las relaciones entre las principales variables para cada movimiento. Adicionalmente, en la Tabla 1 se presentan las definiciones de las principales variables empleadas en análisis de intersecciones semaforizadas (TRB, 2000, cap. 10).

Tabla 1 Variables fundamentales en intersecciones semaforizadas

Nombre	Símbolo	Definición	Unidad
Intervalo de cambio y de despeje	Y_i	Intervalo de amarillo más todo-rojo (TR) que ocurre entre fases del semáforo para favorecer el despeje de la intersección antes de que los movimientos conflictivos sean realizados.	s
Fase		Parte del ciclo semafórico definida para una combinación de movimientos que reciben el derecho de paso simultáneamente durante uno o más intervalos.	
Longitud de ciclo	C_i	Tiempo total para que el semáforo complete un ciclo	s
Tiempo de verde	G_i	Duración de la indicación verde para un movimiento determinado en la intersección	s
Tiempo de rojo	R_i	Periodo en el ciclo semafórico durante el cual la indicación es roja para una determinada fase o	s
Tiempo de verde	g_i	Tiempo durante el cual un determinado movimiento o grupo de movimientos pueden proceder.	s
Tiempo de rojo efectivo	r_i	Tiempo durante el cual un determinado movimiento o grupo de movimientos es restringido, es igual a la longitud del ciclo menos el tiempo de verde efectivo	s
Extensión del tiempo de verde efectivo	e	Monto del intervalo de cambio y despeje, al final de la fase para un grupo de carriles, que es empleado para el movimiento de sus vehículos.	s
Tiempo perdido	t_L	Tiempo durante el cual una intersección no es usada de manera efectiva por ningún movimiento.	s
Tiempo perdido total	L	Tiempo perdido total por ciclo durante el cual la intersección no es usada de manera efectiva por ningún movimiento, que ocurre durante los intervalos de cambio y despeje y al inicio de la mayoría de las fases.	s

Fuente: (TRB, 2000, p. 10-12)

2.5.1 Tipos de semaforización

Los semáforos modernos pueden distribuir el tiempo de varias maneras según el tipo de controlador que empleen, estos pueden ser prefijados, totalmente actuados o semiactuados (TRB, 2000, cap. 10).

- *Los semáforos con control de tiempo fijo (prefijados):* son aquellos en los cuales la secuencia de fases es mostrada en orden repetitivo. Cada fase presenta intervalos fijos que mantienen la longitud del ciclo constante.
- *Los semáforos con control totalmente actuado:* son aquellos en los cuales la distribución de los tiempos en todos los accesos de la intersección es controlada por detectores vehiculares. Cada fase está sujeta a un tiempo de verde mínimo y es accionada en función de la demanda vehicular. La longitud del ciclo es variable de ciclo en ciclo.
- *Los semáforos con control semi-actuado:* son aquellos en los que algunos accesos (típicamente los de la vía secundaria) tienen detectores y otros accesos no (típicamente los de las vías principales).

También es importante considerar la disposición de los movimientos de giros, los cuales afectan la capacidad y operación de la intersección. Se pueden presentar dos tipos de movimientos de giro: los *giros permitidos* son aquellos que entran en conflicto con peatones, bicicletas o circulación opuesta de vehículos, mientras que los *giros protegidos* son aquellos que se realizan sin conflicto (TRB, 2000, cap. 10).

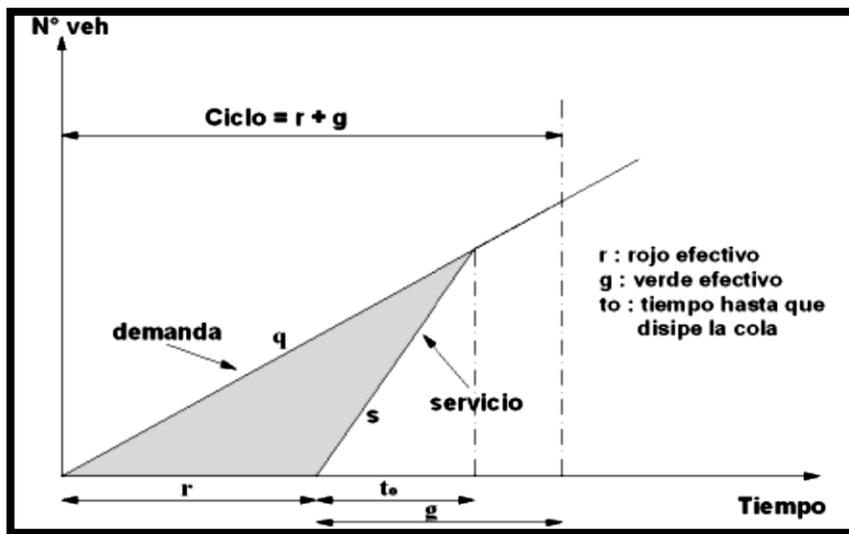
2.6 TEORÍA DE COLAS

La teoría de intersecciones semaforizadas se enfoca en la estimación de demoras y colas, que son las medidas de eficiencia con las que se determina el nivel de servicio de una intersección semaforizada. Esta estimación depende de los procesos de llegada o arribo de vehículos (demanda) y servicio brindado por la

intersección (oferta), por lo que para evaluar los parámetros involucrados se emplean modelos descriptivos que contienen tanto componentes determinísticos o uniformes; como estocásticos (también llamados aleatorios o de sobresaturación) (TRB, 1992, p. 9-1). Adicionalmente, es necesario establecer el mecanismo de atención, que para el caso de intersecciones semaforizadas será considerado FIFO (First-In-First-Out) (Fernández, 2008, p. 122).

El *componente determinístico* de los modelos de intersecciones semaforizadas considera tasas de arribos y servicio uniformes. Esto puede apreciarse en la Figura 5, en la cual se presenta el diagrama de colas (tiempo vs. vehículos) generado por el proceso cíclico que implica un semáforo. Nótese que la tasa de llegadas (q) se mantiene y la tasa de salidas (s) presenta tres valores: cero para el periodo rojo, igual a la tasa de saturación durante el verde e igual a la tasa de llegadas luego de que la cola se disipa.

Figura 5. Funcionamiento del semáforo en condiciones no saturadas

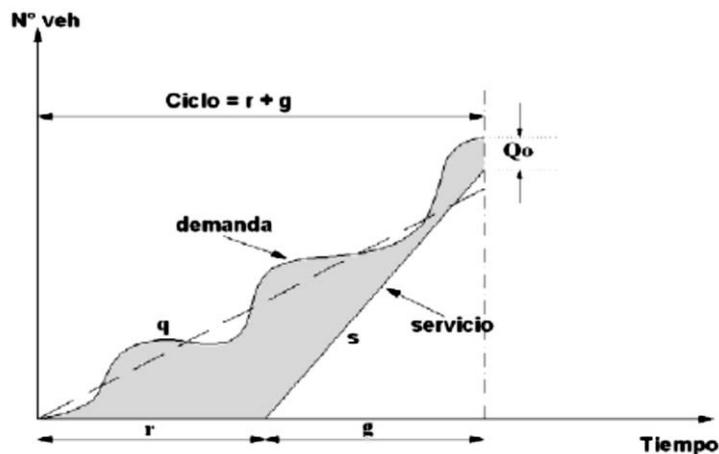


Fuente: (Cabrera, 2007)

En el diagrama, para el triángulo sombreado, la distancia horizontal inscrita representa el tiempo entre la llegada y la salida de un vehículo; y la distancia vertical inscrita será la longitud de la cola en un instante dado, la cual será máxima al final del periodo de rojo efectivo. Adicionalmente, el área del triángulo representará la demora total en un ciclo determinado.

Para el *componente estocástico*, los cálculos y la interpretación de los diagramas se complican debido a la aleatoriedad de las tasas de llegadas, así como también debido a los efectos de sobresaturación. La Figura 6 muestra un diagrama de colas para una intersección con llegadas aleatorias y sobresaturación. Nótese que al final del ciclo permanece una cantidad remanente de vehículos (Q_0) que no ha podido ser servida durante el verde.

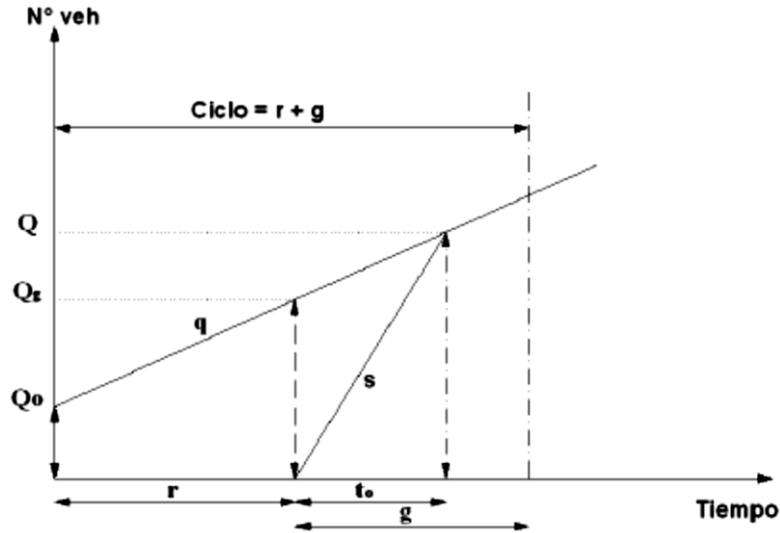
Figura 6. Funcionamiento del semáforo bajo efectos aleatorios y sobresaturación



Fuente: (Fernández, 2008, p. 136)

En general, para intersecciones semaforizadas existen tres magnitudes de cola (ver Figura 7). La primera es la cola excedente (Q_0); la segunda es la longitud máxima de cola (Q_g), que se obtiene al inicio del verde; y la tercera es la máxima extensión de la cola (Q), debido a los vehículos que se adicionan a la cola máxima durante el verde (Fernández, 2008, p. 141).

Figura 7. Magnitudes de colas en intersecciones semaforizadas



Fuente:(Fernández, 2008, p. 141)

La primera fórmula ampliamente usada para estimar la demora en una intersección semaforizada fue desarrollada por Webster en 1958 y modificada en 1961 (ver Ecuación 8). En ella, el primer término representa la demora debido a llegadas uniformes, mientras que el segundo término incorpora los efectos de aleatoriedad asumiendo una distribución de Poisson y tasas de salida constantes. El tercer término es un término de corrección y varía alrededor del 10% de los otros dos términos (TRB, 1992, p. 9-6).

$$d = \frac{c(1-g/c)^2}{2[1-(g/c)X]} + \frac{X^2}{2q(1-X)} - 0.65 \left(\frac{c}{q^2}\right)^{1/3} X^{2+5(g/c)} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde,

- d : demora promedio por ciclo
- C : longitud de ciclo (s).
- g : tiempo de verde efectivo (s).
- X : grado de saturación.
- q : tasa de llegadas (veh/s).

El principal defecto de la fórmula de Webster es que cuando el grado de saturación (X) tiende a 1.0, la demora tiende al infinito.

2.7 CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO

En un inicio, la ingeniería de tráfico buscaba básicamente la determinación de la capacidad de un dispositivo vial. Sin embargo, es común que aun cuando la demanda se encuentre por debajo de la capacidad pero próxima a ella, el régimen de circulación se haga forzado; generando molestias en los usuarios que evidentemente prefieren un flujo libre (Radelat, 2003, pp. 254-257). Es a raíz de este hecho que fue necesario establecer un parámetro que adicionalmente midiera la calidad de servicio, el mismo que se denomina nivel de servicio.

2.7.1 Capacidad en intersecciones semaforizadas

Según el TRB (2000), la capacidad para una intersección semaforizada se define para cada grupo de carriles como la máxima tasa horaria a la cual los vehículos pueden cruzar la intersección bajo condiciones prevalecientes del tráfico, la vía y la semaforización.

2.7.2 Nivel de servicio en intersecciones semaforizadas

Para un flujo discontinuo, la demora por control es la medida operacional crucial para definir el nivel de servicio (NS), La Tabla 2 muestra la correspondencia entre la demora y el NS según el TRB (2000).

Tabla 2. Nivel de servicio en intersecciones Semaforizadas

Nivel de Servicio	Características de Operación	Demora por Control
A	Baja demora, coordinación extremadamente favorable y ciclos	≤ 10
B	Ocurre con una buena coordinación y ciclos cortos, los	$> 10 -$
C	Ocurre con una coordinación regular y/o ciclos largos, los	$> 20 -$
D	Empieza a notarse la influencia de congestión ocasionada por un ciclo largo y/o una coordinación desfavorable o relaciones	$> 35 -$
E	Es el límite aceptable de la demora; indica una coordinación muy pobre, grandes ciclos y relaciones v/c mayores, las fallas	$> 55 -$
F	El tiempo de demora es inaceptable para la mayoría de los conductores, ocurren cuando los valores de flujo exceden a la capacidad de la intersección o cuando las relaciones v/c son	> 80

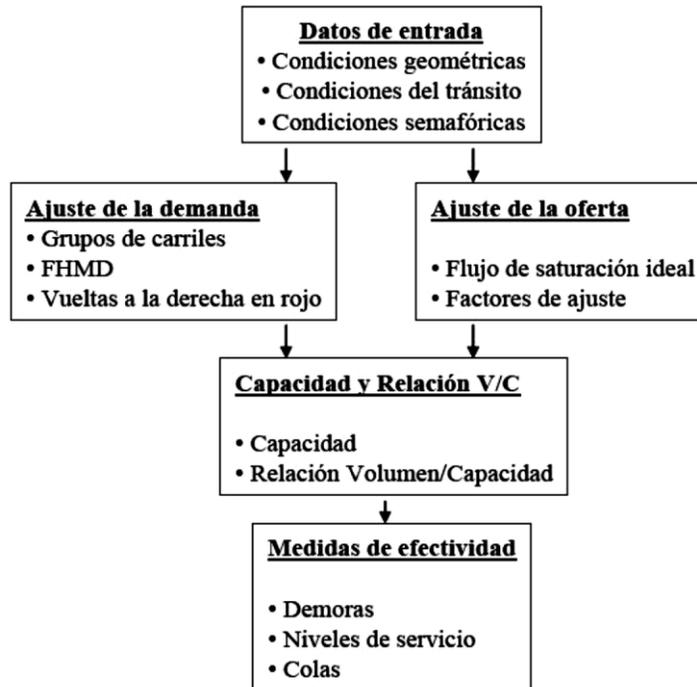
Fuente: (HCM 2000, p. 16-2)

CAPITULO III METODOLOGIAS DE LA INVESTIGACION

3.1 METODOLOGÍA DEL MANUAL DE CAPACIDAD DE CARRETERAS HCM 2000

El TRB presenta una metodología para el análisis de intersecciones semaforizadas en el Capítulo 16 del Manual de Capacidad de Carreteras. A continuación se detalla el procedimiento empleado por el HCM 2000.

Figura 8. Metodología de análisis operacional para intersecciones semaforizadas



Fuente: (TRB, 2000, p. 16-2)

3.1.1 DATOS DE ENTRADA

3.1.1.1 Condiciones geométricas

Son aquellas condiciones que incluyen toda la información de la configuración física de la intersección como número y ancho de carriles, inclinación de los accesos, número y ubicación de estacionamientos, movimientos por carril, etc.

3.1.1.2 Condiciones de circulación

Se refieren a los volúmenes de tránsito para cada movimiento en cada acceso de la intersección. Deben considerar tanto la distribución de los tipos de vehículos, como el tránsito de peatones y bicicletas que interfieren con los giros ya sea a la izquierda o a la derecha.

Un parámetro muy importante que determina las condiciones de circulación es el *tipo de llegada* que es el parámetro que describe la calidad de la progresión o coordinación en una intersección semaforizada. El HCM considera que el tipo de Llegada es mejor observado en campo; sin embargo, a pesar de que no hay parámetros definitivos para cuantificarlo, puede ser vinculado con la relación de pelotón (R_p) a través de la Tabla 3, en donde R_p se calcula mediante la Ecuación 9.

Tabla 3. Relacion entre el tipo de llegada y la relacion peloton

Tipo de Llegada	Rango de Pelotón (R_p)	Valor por Defecto (R_p)	Calidad de la Progresión
1	≤ 0.50	0.333	Muy pobre
2	$> 0.50-0.85$	0.667	Desfavorable
3	$> 0.85-1.15$	1.000	Llegadas
4	$> 1.15-1.50$	1.333	Favorable
5	$> 1.50-2.00$	1.667	Altamente
6	> 2.00	2.000	Excepcional

Fuente: (TRB, 2000, p. 16-20)

$$R_p = \frac{P}{\left(\frac{g_i}{C}\right)} \quad (\text{Ec.9})$$

Donde.

- R_p : relación de pelotón.
- P : proporción de todos los vehículos que llegan durante la fase verde ($P \leq 1$).
- C : longitud del ciclo (s).
- g_i : tiempo de verde efectivo del movimiento o grupo de carriles (s).

3.1.1.3 Condiciones de semaforización

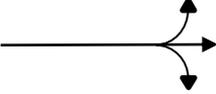
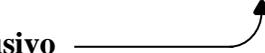
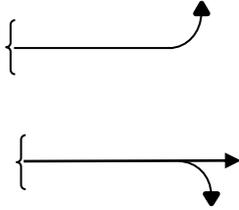
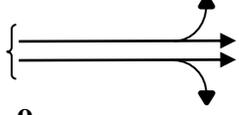
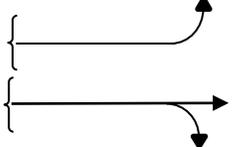
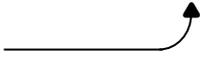
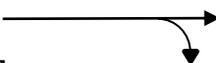
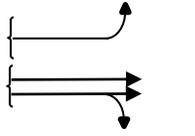
Son aquellas que incluyen la información relacionada a los semáforos, como la longitud del ciclo, los tiempos de verde y demás intervalos; los mismos que pueden resumirse en un diagrama de fases.

3.1.2 AJUSTE DE LA DEMANDA

3.1.2.1 Agrupamiento de carriles

La metodología del HCM considera los accesos de una intersección de manera individual y los grupos de carriles de cada acceso también de forma individual. La segmentación toma en cuenta la geometría de la intersección y la distribución de movimientos. En la Tabla 4 se presentan algunos agrupamientos de carriles comunes.

Tabla 4 Grupo de Carriles típicos

Número de carriles	Movimientos por carril	Número de posibles grupo de carriles
1	LT + TH + RT  Izquierdo, directo y derecho	(1)  Acceso carril sencillo
2	EXC LT  Izquierdo exclusivo TH + RT  Directo y derecho	(2) 
2	Izquierdo y directo LT + TH  TH + RT  Directo y derecho	(1)  o (2) 
3	Izquierdo exclusivo EXC LT  TH  Di TH + RT  Directo y derecho	(2)  o (3) 

Fuente (TRB, 2000, p. 16-7)

3.1.2.2 Determinación de la tasa de flujo

La *tasa de flujo* durante los 15 minutos pico se determina de un volumen horario dividiéndolo entre el *factor de hora pico (FHP)*; de tal modo que a partir de la Ecuación 1 se obtiene la Ecuación 10.

$$v_p = \frac{V}{FHP} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde,

- v_p : tasa de flujo durante los 15 minutos pico
- V : volumen horario (veh/h).
- FHP : factor de hora pico.

Debido a que no todos los movimientos pueden alcanzar su volumen pico en el mismo periodo de 15 minutos, es recomendable observar directamente los flujos cada 15 minutos y seleccionar el periodo crítico de análisis.

3.1.3 AJUSTE DE LA OFERTA

3.1.3.1 Determinación de la tasa de flujo de saturación

El HCM calcula la tasa de flujo de saturación de un grupo de carriles a partir del ajuste de la tasa de flujo de saturación ideal, empleando la Ecuación 11.

$$s = s_o * N * f_W * f_{HV} * f_g * f_p * f_{bb} * f_a * f_{LU} * f_{LT} * f_{RT} * f_{Lpb} * f_{Rpb} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde,

- s : tasa de flujo de saturación del grupo de carriles (veh/h-verde).
- s_o : tasa de flujo de saturación ideal por carril (veh/h/carril).
- N : número de carriles del grupo de carriles.
- f_W : factor de ajuste por ancho de carriles.
- f_{HV} : factor de ajuste por vehículos pesados.
- f_g : factor de ajuste por pendiente del acceso.
- f_p : factor de ajuste por estacionamientos adyacentes al grupo de
- f_{bb} : factor de ajuste por bloqueo de buses que paran cerca de la
- f_a : factor de ajuste por tipo de área.
- f_{LU} : factor de ajuste por utilización de carriles.
- f_{LT} : factor de ajuste por giros a la izquierda.
- f_{RT} : factor de ajuste por giros a la derecha.

f_{Lpb} : factor de ajuste por peatones y bicicletas para giros a la izquierda.
 f_{Rpb} : factor de ajuste por peatones y bicicletas para giros a la derecha.

El HCM recomienda un valor por defecto para la *tasa de flujo de saturación ideal* (carriles de 3.6m, pendiente de 0%, mismo tipo de vehículos, sin estacionamientos ni giros, etc.) de 1900 vehículos livianos por hora por carril (veh/h/carril).

3.1.3.2 Factores de ajuste del flujo de saturación

- **Ajuste por ancho de carril (f_W)**

Es aquel que incorpora el impacto negativo de carriles angostos en la tasa de flujo de saturación, así como también permite una tasa de flujo mayor en carriles anchos. El ancho de carril considerado estándar es de 3.6m.

- **Ajuste por vehículos pesados (f_{HV})**

Es aquel que incorpora el espacio adicional ocupado por los vehículos pesados y sus diferencias operativas en comparación con los vehículos livianos. El equivalente en vehículos livianos (ET) empleado para cada vehículo pesado es de 2 vehículos livianos y es reflejado en la fórmula de la Tabla 5.

- **Ajuste por pendiente del acceso (f_g)**

Es aquel que incorpora el efecto de la pendiente de la rasante sobre la operación de todos los vehículos, incluyendo vehículos pesados y livianos.

- **Ajuste por estacionamientos (f_P)**

Es aquel que incorpora los bloqueos ocasionales debido a las maniobras de estacionamiento. Se emplea el número de maniobras por hora en estacionamientos adyacentes al grupo de carriles y dentro de 75 m corriente arriba desde la línea de parada. Además, se considera un límite práctico de 180 maniobras como máximo y

se debe tener en cuenta que las condiciones de estacionamiento con cero maniobras tienen un impacto diferente que una situación donde no hay estacionamientos.

- **Ajuste por bloqueo de buses (fbb)**

Es aquel que incorpora el tránsito local de buses que se detienen a recoger o dejar pasajeros dentro de los 75 m desde la línea de parada (corriente arriba o corriente abajo). Este factor solo se debería emplear cuando los buses detenidos bloquean el flujo de tráfico. Se emplea un límite práctico de 250 paradas como máximo.

- **Ajuste por tipo de área (fa)**

Es aquel que incorpora la ineficiencia relativa de las intersecciones en los distritos de negocios. Es apropiado en áreas con características de un distrito central de negocios (CBD, Central Business District), las cuales incluyen derechos de paso en calles angostas, maniobras de parqueo frecuentes, bloqueo de vehículos, actividades de taxis y buses, pequeños radios de giro, uso limitado de carriles exclusivos de giro, alta actividad de peatones, etc.

- **Ajuste por utilización de carril (fLU)**

Es aquel que incorpora la distribución desigual del tráfico entre los carriles en un grupo de carriles con más de un carril. El factor fLU está basado en el flujo del carril con el volumen más alto y se calcula empleando la ecuación correspondiente de la Tabla 5.

- **Ajuste por giros a la derecha (fRT)**

Es aquel que intenta reflejar el efecto de la geometría. Depende de si los giros se realizan desde un carril exclusivo o compartido y de la proporción de vehículos en el grupo de carriles que giran a la derecha. Nótese que el factor de giro a la derecha es 1.0 si el grupo de carriles no incluye ningún giro a la derecha.

- **Ajuste por giros a la izquierda (fLT)**

Los factores de ajuste por giros a la izquierda dependen de si los giros son protegidos o permitidos y de si se realizan desde un carril exclusivo o compartido. El procedimiento detallado en el Apéndice C del Capítulo 16 del HCM 2000 es utilizado en el presente trabajo.

- **Ajuste por peatones y bicicletas (fLpb y fRpb)**

El procedimiento para la determinación de los factores de ajuste por bloqueo de peatones y bicicletas tanto para giros a la izquierda como para giros a la derecha, se detalla en el Apéndice D del Capítulo 16 del HCM 2000, el mismo que es empleado en esta investigación.

En la Tabla 5 se presentan y resumen todos los factores de ajuste mencionados junto con las fórmulas para su cálculo.

Tabla 5. Factores de ajuste

Factor	Fórmula	Definición de Variables	Observaciones
Ancho de carril	$f_w = 1 + \frac{(W - 3.6)}{9}$	W = ancho de carril (m)	$W \geq 2.4$ If $W > 4.8$, puede considerarse para dos carriles de análisis
Vehículos pesados	$f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV(E_T - 1)}$	%HV = % de vehículos pesados – grupo de carriles	$E_T = 2.0$ veh equivalente /HV
Pendiente	$f_g = 1 - \frac{\%G}{200}$	%G = % pendiente en el acceso – grupo de carriles	$-6 \leq \%G \leq +10$ Negativo para cuesta abajo
Parqueos	$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18N_m}{3600}}{N}$	N = número de carriles por grupo Nm = número de maniobras de parqueo/hora	$0 \leq N_m \leq 180$ $f_p \geq 0.050$ $f_p = 1.000$ sin parqueos
Bloqueo de buses	$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_B}{3600}}{N}$	N = número de carriles en el acceso N_B = número de parada de buses/hora	$0 \leq N_B \leq 250$ $f_{bb} \geq 0.050$
Tipo de área	$f_a = 0.900$ en CBD $f_a = 1.000$ otras áreas	CBD = Central Business Distric = Centro de negocios	
Utilización de Carril	$f_{LU} = v_g / (v_{g1} N)$	v_g = proporción de flujo de demanda sin ajustar para el grupo de carriles, en veh/hora v_{g1} = proporción de flujo de demanda sin ajustar en el carril único con el volumen más alto en el grupo de carriles, veh/h N = número de carriles en el grupo	
Giros Izquierdos	Fase protegida: Carril exclusivo $f_{LT} = 0.95$ Carril compartido $f_{LT} = \frac{1}{1.0 + 0.05P_{LT}}$	P_{LT} = proporción de giros izquierdos en el grupo de carriles	Consultar cuadro C16-1 de la página 16-122, del manual HCM 2000 apéndice C
Giros derechos	Carril exclusivo $f_{RT} = 0.85$ Carril compartido $f_{RT} = 1.0 - (0.15)P_{RT}$ Carril único $f_{RT} = 1.0 - (1 - 0.135)P_{RT}$	P_{RT} = proporción de giros derechos en el grupo de carriles	$f_{RT} \geq 0.050$
Bloqueo por Peatones y Bicicletas	Ajuste giro izquierdo $f_{Lpb} = 1.0 - P_{LT}(1 - A_{pbT})(1 - P_{LTA})$ Ajuste giro derecho $f_{Rpb} = 1.0 - P_{RT}(1 - A_{pbT})(1 - P_{RTA})$	P_{LT} = proporción de giros izquierdos en el grupo A_{pbT} = ajuste en la fase permitida P_{LTA} = proporción de giro izquierdo de la fase protegida sobre el total de verde del grupo P_{RT} = proporción de giro derecho en el grupo de carriles P_{RTA} = proporción de giro derecho de la fase protegida sobre el verde total	Referirse al apéndice D del Manual HCM 2000, página 16-135, para seguir paso a paso el procedimiento

(TRB, 2000, p. 16-11)

3.1.4 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD Y LA RELACIÓN V/C

3.1.4.1 Capacidad

En intersecciones semaforizadas la capacidad se basa en los conceptos de flujo de saturación y tasa de flujo de saturación. Se calcula mediante la Ecuación 12.

$$c_i = s_i \left(\frac{g_i}{C} \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde,

- c_i : capacidad del grupo de carriles i (veh/h).
- s_i : tasa de flujo de saturación para el grupo de carriles i
- g_i : tiempo de verde efectivo para el grupo de carriles i (s).
- C : longitud del ciclo del semáforo (s).
- g_i/C : proporción de verde efectivo para el grupo de carriles i .

3.1.4.2 Relación v/c

La relación v/c es a menudo denominada relación de volumen-capacidad o grado de saturación y expresa la razón entre la tasa de flujo (v) y la capacidad (c). En el análisis de intersecciones es representada con el símbolo X , por lo que para un grupo de carriles dado i , X_i se calcula empleando la Ecuación 13.

$$X_i = \frac{v_i}{c_i} = \frac{v_i}{s_i \left(\frac{g_i}{C} \right)} = \frac{v_i \times C}{s_i \times g_i} \quad (\text{Ec 13})$$

Donde,

- X_i : relación v/c o grado de saturación para el grupo de carriles i .
- v_i : tasa de flujo de demanda actual o proyectada para el grupo de carriles i
- c_i : Capacidad del grupo de carriles i .
- s_i : tasa de flujo de saturación para el grupo de carriles i (veh/h).
- g_i : tiempo de verde efectivo para el grupo de carriles i (s).
- C : longitud del ciclo (s).

3.1.4.3 Grupos de carriles críticos y grado de saturación crítico

Los grupos de carriles críticos para cada fase son aquellos que presentan la mayor relación de flujo v/c y se emplean para evaluar la intersección en su conjunto (forma agregada) con respecto a su geometría y a la duración del ciclo, dando lugar al

grado de saturación crítico de la intersección (X_c) que se obtiene mediante la Ecuación 14.

$$X_c = \left(\frac{c}{c-L} \right) \times \sum \left(\frac{v}{s} \right)_{ci} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde,

- X_c : relación v/c crítica o grado de saturación crítico para la intersección.
- $\sum(v/c)_{ci}$: sumatoria de las relaciones de flujo para todos los grupos de carriles
- C : longitud del ciclo (s).
- L : tiempo perdido total por ciclo, calculado como tiempo perdido, tL , para la trayectoria crítica de los movimientos (s).

3.1.5 MEDIDAS DE EFICIENCIA

3.1.5.1 Determinación de la demora

Los valores derivados de los cálculos de demora representan la demora media por control experimentada por todos los vehículos que llegan durante el periodo de análisis, incluyendo aquellas demoras contraídas fuera del mismo cuando el grupo de carriles se encuentra sobresaturado. La demora por control además considera los movimientos a bajas velocidades y las detenciones conforme los vehículos se mueven en la cola o disminuyen la velocidad corriente arriba de la intersección. La demora promedio por control por vehículo para un grupo de carriles se obtiene mediante la Ecuación 15.

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde,

- d : demora por control por vehículo (s/veh).
- d_1 : demora por control uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh).
- PF : factor de ajuste de demora uniforme por coordinación, el cual tiene en cuenta los efectos de la coordinación de semáforos.

- d_2 : demora incremental que toma en cuenta los efectos de llegadas aleatorias y colas sobresaturadas, ajustada por la duración del periodo de análisis y el tipo de controlador; este componente de la demora asume que no hay cola inicial para el grupo de carriles al inicio del periodo de análisis (s/veh).
- d_3 : demora por cola inicial, la cual tiene en cuenta las demoras de todos los vehículos en el periodo de análisis debido a las colas iniciales al comienzo del periodo de análisis (s/veh).

3.1.5.2 Demora uniforme

Es aquella demora que se obtiene al asumir el caso ideal de llegadas uniformes, flujo estable, y ausencia de cola inicial. La Ecuación 16 brinda una estimación aceptada y precisa de la demora uniforme, la cual está basada en el primer término de la fórmula de demora de Webster (ver Ecuación 8). Nótese que los valores de X no pueden ser mayores de 1.

$$d_1 = \frac{0.5C\left(1-\frac{g}{C}\right)^2}{1-\left[\min(1,X)\times\frac{g}{C}\right]} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde,

- d_1 : demora por control uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh).
 C : longitud del ciclo (s); longitud de ciclo empleada en semáforos con controladores
 g : tiempo de verde efectivo para el grupo de carriles (s); tiempo de verde empleado en semáforos con controladores de tiempo fijo.
 X : relación v/c o grado de saturación para el grupo de carriles.
 d_1 demora por control uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh).
 C : longitud del ciclo (s); longitud de ciclo empleada en semáforos con controladores
 g : tiempo de verde efectivo para el grupo de carriles (s); tiempo de verde empleado en semáforos con controladores de tiempo fijo.
 X : relación v/c o grado de saturación para el grupo de carriles.

3.1.5.3 Factor de ajuste por coordinación

El factor de ajuste por coordinación es aquel que incorpora el efecto de la coordinación de semáforos. Se entiende que una buena coordinación de semáforos resultará en una alta proporción de vehículos llegando durante el verde, mientras que una coordinación pobre resultará en una baja proporción de vehículos que llegan en verde. El factor de ajuste por coordinación (PF) se aplica a todos los grupos de carriles coordinados, incluyendo a los grupos de carriles con controles de tiempo fijo. La coordinación afecta fundamentalmente a la demora uniforme, y por esta razón el ajuste se aplica solo a d_1 . El valor de PF puede determinarse usando la Ecuación 17.

$$PF = \frac{(1-P) \times fPA}{1 - \left(\frac{g}{C}\right)} \quad (EC.17)$$

Donde,

PF: factor de ajuste por coordinación.

P: proporción de vehículos que llegan en verde.

g/C: proporción de tiempo de verde disponible.

fPA: factor de ajuste suplementario por grupos vehiculares que llegan durante el verde.

Si se llevan a cabo mediciones de campo, *P* debería determinarse como la proporción de vehículos en el ciclo que arriban a la línea de parada o que se unen a la cola (estacionaria o en movimiento) mientras se presenta la fase verde. Por otro lado, si se emplea el tipo de llegada (*AT*), *P* se podrá calcular a través de la Tabla 3 y la Ecuación 9 de modo que *fPA* y *PF* se obtengan empleando la Tabla 6.

Tabla 6. Factor de ajuste por coordinacion

Relación g/C	Tipo de Llegada					
	AT	AT	AT	AT	AT	AT
0.20	1.16	1.00	1.00	1.00	0.83	0.75
0.30	1.28	1.06	1.00	0.98	0.71	0.57
0.40	1.44	1.13	1.00	0.89	0.55	0.33
0.50	1.66	1.24	1.00	0.76	0.33	0.00
0.60	2.00	1.39	1.00	0.57	0.00	0.00
0.70	2.55	1.65	1.00	0.25	0.00	0.00
fPA	1.00	0.93	1.00	1.15	1.00	1.00
Rp	0.33	0.66	1.00	1.33	1.66	2.00

Fuente: (TRB, 2000, p. 16-20)

3.1.5.4 Demora incremental

Es aquella demora que toma en consideración llegadas no uniformes y colapsos temporales de ciclos (demora aleatoria), así como los periodos sustanciales de sobresaturación (demora de sobresaturación). La demora incremental se puede estimar mediante la Ecuación 18, la cual asume que no hay demanda insatisfecha que genere colas iniciales al comienzo del periodo de análisis (T). El término de demora incremental es válido para todos los valores de X, incluyendo grupos de carriles altamente sobresaturados.

$$d_2 = 900T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \times k \times I \times X}{c \times T}} \right] \text{ (Ec.18)}$$

Donde,

- d_2 demora incremental que toma en cuenta los efectos de colas aleatorias y sobresaturadas, ajustada por la duración del periodo de análisis y el tipo de controlador del semáforo (s/veh).
- T : duración del periodo de análisis (h).
- k : factor de demora incremental que es dependiente del ajuste de los controladores.
- I : factor de ajuste por ingresos a la intersección corriente arriba.
- c : capacidad del grupo de carriles (veh/h).
- X : relación v/c para el grupo de carriles o grado de saturación.

El término de calibración (k) o *factor de calibración de demora incremental* se incluye en la Ecuación 18 para incorporar el efecto del tipo de controlador. Para

semáforos de tiempo fijo se emplea un valor de $k = 0.50$. Por otro lado, el *factor de ajuste de demora incremental* (I) incorpora los efectos de ingresos desde semáforos corriente arriba en intersecciones coordinadas. Para el caso de intersecciones aisladas I tomará el valor de 1.

3.1.5.5 Demora por cola inicial

Es la demora adicional que se genera debido a las colas residuales (remanentes o insatisfechas) del periodo previo, ya que estas deberán primero despejar la intersección antes de dar paso a los vehículos que llegan durante el periodo de análisis. En los casos en que $X > 1$ para un periodo de 15 minutos, el siguiente periodo comenzará con una cola inicial denominada Q_b , que es expresada en vehículos y debe observarse al inicio del rojo. Siempre y cuando $Q_b \neq 0$, los vehículos que lleguen durante el periodo de análisis experimentarán una demora por cola inicial, que se designa por d_3 . Para estimar la demora por cola inicial existen cinco posibles escenarios de análisis, que se describen a continuación:

- Caso 1: el periodo es no saturado sin cola inicial. Por lo tanto, $d_3=0$
- Caso 2: el periodo es sobresaturado sin cola inicial. Por lo tanto, $d_3=0$
- Caso 3: la cola inicial Q_b se disipa durante el periodo T. Para que esto ocurra, la suma de Q_b y la demanda total en T (q_T) debe ser menor que la capacidad disponible (c_T).
Es decir, $Q_b + q_T < c_T$.
- Caso 4: cuando aun existe demanda insatisfecha al final del periodo T pero es decreciente. Para que esto ocurra, la demanda en T debe ser menor que la capacidad. Es decir, $q_T < c_T$.
- Caso 5: cuando la demanda en T excede la capacidad. Aquí la demanda insatisfecha se incrementa

La demora por cola inicial d_3 se podrá calcular mediante la Ecuación 19.

$$d_3 = \frac{1800Q_b(1+u)t}{cT} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde,

- Q_b : cola inicial al inicio del periodo T
- c : capacidad (veh/h).
- T : duración del periodo de análisis (h).
- t : duración de la demanda insatisfecha
- u : parámetro de demora.

Para los casos 3, 4 y 5, los parámetros t y u se determinan mediante las Ecuaciones 20 y 21.

$$t = 0 \text{ si } Q_b = 0 \quad \text{sino: } t = \min\left\{T, \frac{Q_b}{c[1-\min(1,X)]}\right\} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$u = 0 \text{ si } t < T \quad \text{sino: } u = 1 - \frac{cT}{Q_b[1-\min(1,X)]} \quad (\text{Ec. 21})$$

Adicionalmente, para los casos 4 y 5, el último vehículo que llega en el periodo T despejará la intersección en el tiempo $T_c > T$, denominado tiempo de despeje de cola inicial. Por lo tanto, en el caso de una cola inicial, T_c se calcula con la Ecuación 22.

$$T_c = \text{máx}\left(T, \frac{Q_b}{c} + TX\right) \quad (\text{Ec. 22})$$

Para los casos 3, 4 y 5, el componente uniforme de la demora por control (d_1) debe ser evaluado empleando $X=1.0$ para el periodo en el que existe una cola de sobresaturación (t) y usando el valor real de X para el periodo restante ($T-t$). En consiguiente, para estos casos se emplea un valor ponderado de d_1 , tal como muestra la Ecuación 23.

$$d_1 = d_s * \frac{t}{T} + d_u * PF * \frac{(T-t)}{T} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde,

- d_s : demora saturada (d_I evaluado para $X = 1.0$).
- d_u : demora no saturada (d_I evaluado para el valor real)

3.1.5.6 Estimación de demoras agregadas (ponderadas)

El procedimiento para la estimación de demoras provee la demora por control por vehículo para cada grupo de carriles, por lo que para determinar las demoras en un acceso es necesario ponderar las demoras de los grupos de carriles, tal como muestra la Ecuación 24.

$$d_A = \frac{\sum(d_i \times v_i)}{\sum v_i} \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde,

- d_A : demora para el acceso A (s/veh).
- d_i : demora para el grupo de carriles i (en el acceso A)
- v_i : flujo ajustado para el grupo de carriles i (veh/h).

De modo similar, para obtener la demora por control promedio de toda la intersección, se pueden ponderar las demoras por control de los accesos empleando la Ecuación 25.

$$d_I = \frac{\sum(d_A \times v_A)}{\sum v_A} \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde,

- d_I : demora por vehículo para la intersección
- d_A : demora para el acceso A (s/veh).
- v_A : flujo ajustado para el acceso A (veh/h).

3.1.5.7 Determinación del nivel de servicio

Tal como se mencionó en el ítem 2.7.2., la demora media por control es la medida de eficiencia determinante en la estimación del nivel de servicio para intersecciones semaforizadas. Por lo tanto, el nivel de servicio se determina empleando la Tabla 2.

3.2 SIMULACION

3.2.1. Modelos microscópicos:

Estos modelos capturan el movimiento de cada vehículo. Vehículos en particular pueden ser rastreados a través de la red y sus trayectorias tiempo-espaciales pueden ser trazadas. El modelo contienen una lógica de procesamiento que describe cómo se comporta cada vehículo, este comportamiento incluye la aceleración, desaceleración, cambios de carril, maniobras de rebase, movimientos de vuelta, y la aceptación de espaciamiento (gap).

3.2.2. Modelos mesoscópicos:

Estos modelos caen entre los modelos microscópicos y macroscópicos en términos del detalle logrado. Por lo general los vehículos se modelan individualmente tal como en un modelado microscópico, pero están gobernados por reglas similares a las que se usan en una macrosimulación.

3.2.3. Modelos macroscópicos:

Estos modelos están en el otro lado del espectro. Tienden a emplear las variables de la velocidad de flujo y otros descriptores generales de cómo se mueve el tránsito. La tasa de flujo dentro de un segmento de carretera está relacionada con las tasas de flujo tanto aguas arriba como aguas abajo a través de la ecuación fundamental de conservación del flujo y otras ecuaciones que aseguren que se cumplan las condiciones de frontera en la interfaz entre los segmentos del sistema.

3.2.3.1. PARAMETROS MACROSCOPICOS

a. Volumen: Se define como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal de un carril o calzada, durante un ciclo de tiempo determinado.

Se expresa mediante la relación.

$$Q = N/T$$

Q= vehículos

N =Número total de vehículos que pasan

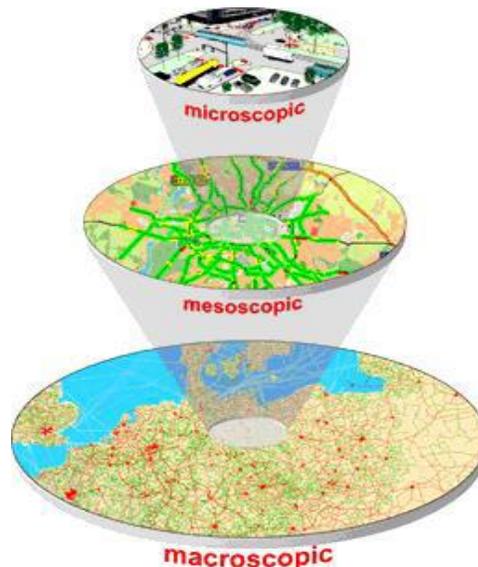
T = Periodo determinado (unidades de tiempo)

a. Velocidad: Es la distancia recorrida por un vehículo, durante una unidad de tiempo. La podemos expresar en millas/hora, km/hora, pies/seg.

b. Densidad: Algunas veces llamada también concentración y es el número de vehículos que viajan sobre una longitud unitaria de carretera para un instante de tiempo. Por lo general la longitud unitaria es una milla, y la unidad de densidad sería el número de vehículos por milla (vehículos/milla).

Como se describió anteriormente, podemos distinguir los modelos de simulación según su nivel de enfoque, centrándonos concretamente en los modelos de simulación del tránsito podemos identificar estos modelos tal como se indica en el Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2000):

Figura 9 Tipos de simuladores



Fuente: (Radelat,2009)

3.2 CARACTERÍSTICAS DE SYNCHRO 8

Synchro es un software desarrollado por Trafficware que permite el análisis y optimización de sistemas de tráfico a un nivel macroscópico. En principio, la versión 8 de Synchro implementa las metodologías de los Capítulos 15, 16 y 17 del Manual de Capacidad de Carreteras-HCM 2000; sin embargo, también existen algunas diferencias con respecto al HCM, entre las cuales se destaca un método alternativo para el cálculo de demoras, denominado Método Percentil de Demoras. Adicionalmente, Synchro calcula directamente el factor de progresión (PF) e incorpora un término para la demora por bloqueo debido a la interacción de colas. A continuación se describen brevemente las principales consideraciones empleadas por Synchro.

3.2.1 Ajuste de la Demanda

Synchro divide los volúmenes de tráfico entre el FHP para determinar la tasa de flujo durante el periodo de 15 minutos más cargado durante la hora, tal cual es indicado por el HCM.

3.2.2 Ajuste de la Oferta

Para el cálculo de la tasa de flujo de saturación, Synchro emplea el valor por defecto para la tasa de flujo de saturación ideal de 1900 veh/h/carril y la ajusta automáticamente con los factores correspondientes, tal como fue presentado en el ítem 3.4.1. Mediante la Ecuación 11. Sin embargo, también es posible emplear un valor de flujo de saturación directo, en caso de que este haya sido determinado.

3.2.3 Determinación de la Capacidad

Para el cálculo de la relación volumen-capacidad (v/c), Synchro incorpora todos los ajustes y estimaciones del HCM 2000, pero adicionalmente provee un método alternativo denominado ICU (Intersection Capacity Utilization).

3.2.4 Determinación de las Medidas de eficiencia

3.2.4.1 Demoras

Synchro determina la demora por control y la demora por cola, con las que se obtiene la demora total. Es decir:

$$\text{Demora total} = \text{demora por control} + \text{demora por cola}$$

La *demora por control* de Synchro es utilizada para el análisis de los efectos de coordinación, actuación y congestión; siendo el componente de demora generado por el dispositivo de control.

La *demora por cola* de Synchro incorpora los efectos de interacción de colas: *spillback*, *starvation* y bloqueos en tramos cortos o bahías cortas.

3.2.4.2 Método de Webster (HCM)

Bajo esta modalidad, Synchro emplea la ecuación de demora del HCM (ver Ecuación 15), a la que denomina también Fórmula de Webster¹⁸. En la Ecuación 15, Synchro no utiliza el término d_3 , el cual incorpora la demora por cola inicial ($d_3 = 0$); pero además calcula explícitamente la demora con los efectos de coordinación, por lo que determina directamente el factor de progresión PF empleando la Ecuación 38.

$$PF = \text{DelayCoord} / \text{DelayUnCoord} \quad (\text{Ec. 38})$$

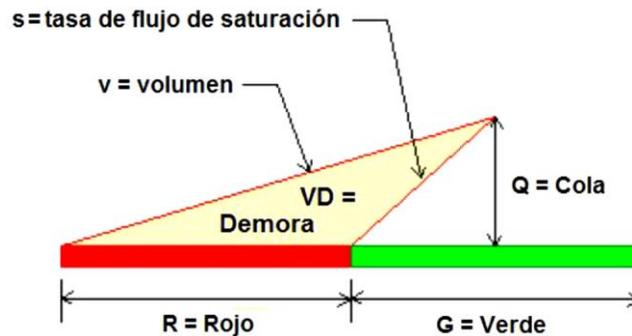
Donde,

- PF*: factor de progresión.
- DelayCoord*: demora uniforme calculada por Synchro con coordinación.
- DelayUncoord*: demora uniforme calculada por Synchro asumiendo llegadas aleatorias.

3.2.4.3 Método de demora percentil

En la Figura 9, la demora promedio para un grupo de carriles en un semáforo de tiempo fijo está representada por el área del triángulo y la altura del mismo representa la máxima extensión de la cola.

Figura 10. Diagrama de colas y cálculo de demora con Synchro



Fuente: (Trafficware, 2006, p. 13-30)

De las relaciones geométricas de la figura anterior se obtiene la Ecuación 39, la que es empleada por Synchro para el cálculo de la demora promedio uniforme por vehículo para un escenario percentil determinado.

$$d_p = 0.5C \frac{[1-(g/c)]^2}{[1-x(g/c)]} \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde,

- d_p : Demora uniforme por vehículo, para el escenario percentil "p" (s/veh).
- X: grado de saturación.
- C: longitud de ciclo (s).
- g: tiempo de verde efectivo (s).

La Ecuación 39 es idéntica a la fórmula de "Webster" (HCM) para d_1 (ver Ecuación 16), pero la diferencia principal entre el Método Percentil y "Webster" radica en la determinación del tiempo de verde y el manejo bajo condiciones casi saturadas o

sobresaturadas.

- **Escenarios percentil**

Durante el periodo de análisis los vehículos no llegan a la intersección de manera uniforme pues algunos ciclos podrían tener mayor tráfico que otros. Por lo tanto, para incorporar los efectos de la variación del tráfico, Synchro modela el flujo bajo cinco escenarios percentil: 10°, 30°, 50°, 70° y 90°. Por ejemplo, si 100 ciclos son observados, el ciclo de percentil-90 ó 90° será el nonagésimo ciclo más cargado. Cada uno de estos escenarios representará un 20% de los ciclos que realmente ocurren.

Synchro ajusta los volúmenes de tráfico para cada escenario hacia arriba o hacia abajo de tal manera que al final se obtenga la demora media percentil; para lo cual emplea la Ecuación 40.

$$v_p = v + \left(z \sqrt{v * C / 3600} \right) * \frac{3600}{c} \quad (\text{Ec. 40})$$

Donde,

- v_p : volumen ajustado para el percentil “ p ” (veh/h).
- v : volumen sin ajustar (veh/h).
- z : número de desviaciones estándar (ver Trafficware, 2006, p. 13-32)
- C : longitud de ciclo (s).

Para el caso de una intersección semaforizada no saturada con llegadas uniformes y semáforo de tiempo fijo, la demora media percentil se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 41.

$$d_1 = \frac{d_{10} + d_{30} + d_{50} + d_{70} + d_{90}}{(v_{10} + v_{30} + v_{50} + v_{70} + v_{90}) * C / 3600} \quad (\text{Ec. 40})$$

Donde,

- d_1 : demora media percentil (s/veh).
- d_p : demora vehicular uniforme para el escenario percentil “ p ” (s/veh).
- v_p : volumen percentil “ p ” (veh/h).
- C : longitud de ciclo (s).

Si el volumen excede la capacidad para un determinado escenario percentil; se emplea la capacidad en lugar del volumen para el cálculo de la demora uniforme. Para condiciones de congestionamiento Synchro aplica la Ecuación 42.

$$d_p = 0.5 * \frac{s}{3600} * \frac{[1-(g/c)]^2}{c} \quad (\text{Ec. 42})$$

Donde,

- d_p : demora vehicular para el escenario percentil “ p ” (s/veh).
- s : tasa de flujo de saturación (veh/h).
- C : longitud de ciclo (s).
- g : verde efectivo (s).

- **Sobresaturación y colapsos del ciclo**

Para tramos cerca o por encima de su capacidad, la demora percentil tendrá dos componentes y se obtendrá mediante la Ecuación 43

$$d = d_1 + d_2 \quad (\text{Ec. 43})$$

Donde,

- d : demora total percentil (s/veh).
- d_1 : demora media uniforme, de los escenarios percentiles (s/veh).
- d_2 : demora incremental (s/veh).

Conforme el volumen se aproxima a la capacidad, algunos o todos los vehículos no serán acomodados durante el primer ciclo. Synchro, al igual que el HCM, incluye un término por demora incremental (d_2) para tomar en cuenta las demoras de vehículos que esperan por ciclos extras. En ambos modelos d_2 incorpora las demoras debidas a situaciones cercanas a la saturación o debidas a sobresaturación. Por lo tanto, la demora incremental de Synchro se calcula empleando la misma fórmula que utiliza el HCM (ver Ecuación 18).

3.2.4.4 Nivel de servicio de la intersección

Para intersecciones semaforizadas, el nivel de servicio de la intersección es calculado de la misma manera que al emplear el HCM; tomando en cuenta la demora total de la intersección y la Tabla 2 aquí presentada.

CAPITULO IV APLICACIÓN PRÁCTICA DE LAS METODOLOGIAS

4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

Una de las etapas relevantes de esta investigación corresponde a la recolección de datos; para la cual, con el objeto de mejorar la calidad de los registros y permitir su verificación cuantas veces fuera necesario, se empleó videograbación. A continuación se describen los procedimientos utilizados para la recolección de datos, así como también aquellos empleados para la estimación de los principales parámetros de entrada necesarios para la aplicación de las metodologías estudiadas.

4.2 SELECCIÓN DE LAS ZONAS DE ANÁLISIS

En principio, se evaluaron intersecciones semaforizadas que podrían ser consideradas aisladas, que presentaran ciclos prefijados, con periodos pico y valle perfectamente identificables, y que pudieran presentar grados de saturación variables con probabilidad de sobre saturación vehicular en horas pico. Como resultado de esta evaluación preliminar, fueron seleccionadas cuatro intersecciones semaforizadas, en las que luego se verificaría la posibilidad de utilizar equipo de videograbación.

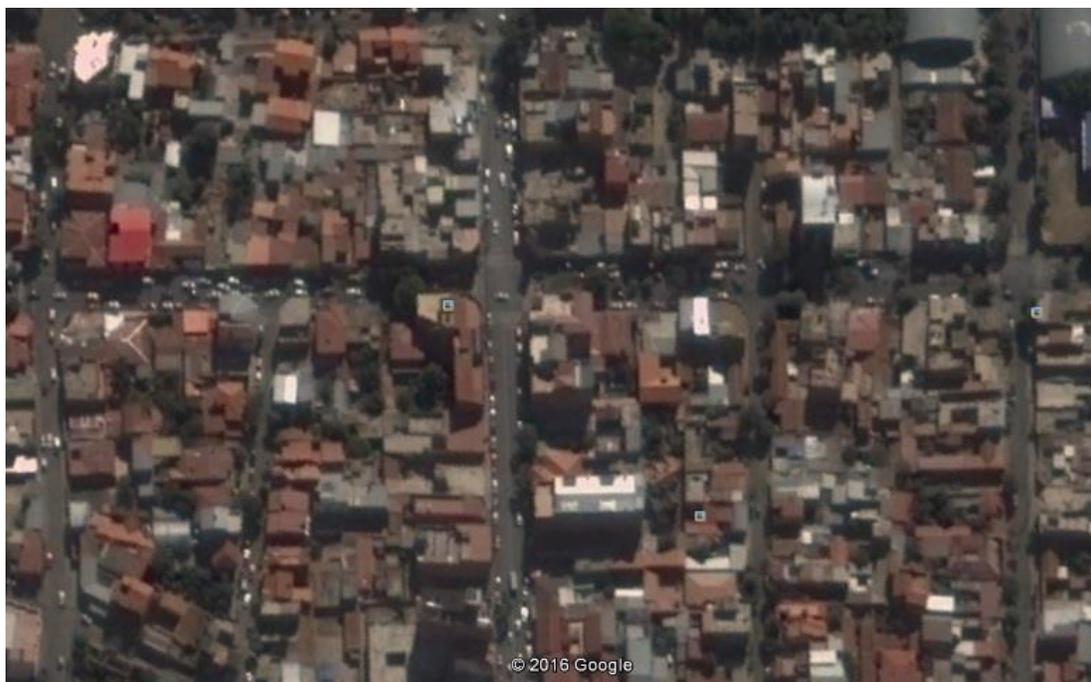
La técnica de videograbación requirió que la intersección de análisis presentara ciertas características adicionales, siendo la principal la ubicación de las cámaras de modo tal que los campos visuales permitieran el registro del comportamiento del tráfico en toda la intersección y no fueran afectados por interferencias.

Se llegaron a seleccionar las siguientes intersecciones por su variedad de factores que intervienen, su saturación de tráfico y la presencia o no del transporte público, a continuación se describen las características de cada una de ellas

4.2.1 Intersección Av. La Paz y Av. Belgrano.

Cuenta con cuatro accesos, tres de ellos de doble vía, la parte este de la avenida Belgrano cuenta con jardinera divisoria, mientras el lado oeste presenta un solo carril. La avenida La Paz en ambos lados de la intersección es doble vía sin separación de jardineras. Los cuatro accesos cuentan con afluencia de transporte público mediano (micros), esto causa un congestionamiento visible en horas picos, razón por la cual se procedió a elegirla como intersección de estudio.

Figura 11 Intersección La Paz y Belgrano



Fuente: Google Earth

4.2.2 Intersección Av. Potosí y Calle Junín.

Cuenta con tres accesos, dos de ellos doble vía, la avenida potosí cuenta a lo largo del segmento de la intersección este y oeste es doble vía, con separación de jardineras. La calle Junín presenta una sola vía con circulación de norte a sur.

En cuanto a la afluencia de transporte público mediano (micros), existe en los tres

accesos de la intersección.

Al tener un cruce entre una calle y una avenida, se tiene otro tipo de intersección a la puesto que visualmente también se observa congestiónamiento en dicho cruce, se procedió a escogerla como la segunda intersección de estudio.

Figura 12 Intersección Potosí y Junin



Fuente: Google Earth

4.2.3 Intersección Calle Gral. Trigo y Calle 15 de Abril.

Cuenta con dos accesos, ambos de una sola vía, se encuentra en la plaza principal Luis de Fuentes y Vargas, La circulación de la Calle Gral. Trigo es de sur a norte y también presenta congestiónamiento apreciable visualmente la igual que la Calle 15 de Abril.

Se procedió a escoger esta intersección por la ausencia de transporte público mediano, teniendo así otro tipo de intersección tipo, que las dos anteriores descritas, para así observar otro tipo de comportamiento del tráfico.

Figura 13 Intersección 15 de Abril y General Trigo



Fuente: Google Earth

4.2.4 Intersección Calle Gral. Trigo y Calle Ingavi.

Cuenta con dos accesos de una sola vía, esta intersección junto con la 4.2.4, pertenecen al llamado casco viejo de la ciudad, por lo que presentan un congestionamiento constante.

La calle Ingavi tiene circulación de Este a Oeste. Ambas calles cuentan con vehículos de transporte público mediano, diferenciándose así de la anterior intersección descrita, por lo que se logra tener otra intersección tipo con factores

diferentes.

Cabe recalcar que no se pudo encontrar una intersección semaforizada de doble vía que presente ausencia de transporte público mediano. Por lo que no se podrá analizar este tipo de intersección en el presente trabajo.

Figura 14 Intersección Ingavi y General Trigo



Fuente: Google Earth

4.3 DETERMINACION DE HORAS PICO.

Los aforos de tráfico se realizaron de manera manual los días 25, 26, 27 y 28 de mayo del 2016 en las intersecciones, Av. La Paz y Belgrano, Av. Potosí y Junín, C. 15 de Abril y Gral. Trigo, C. Ingavi y Gral. Trigo respectivamente, en un periodo

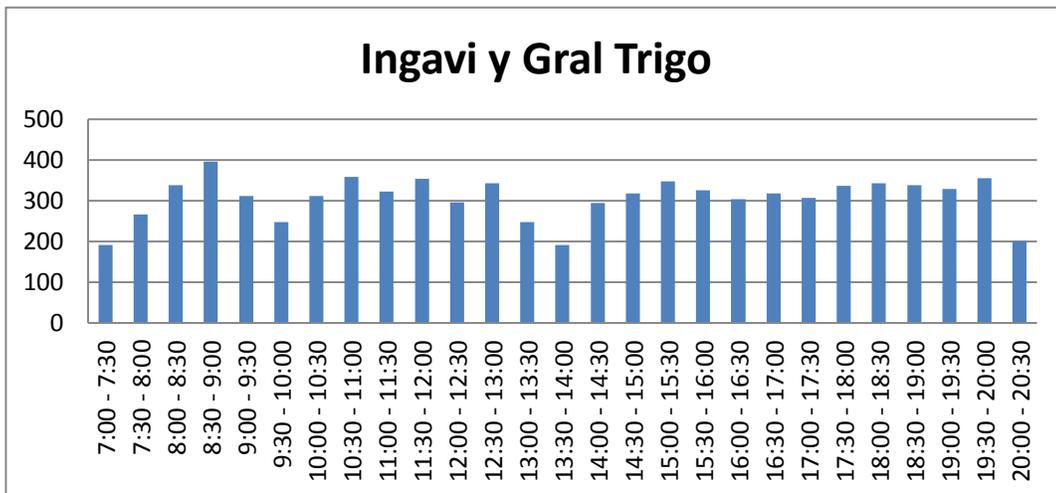
comprendido desde las 6:45 am a 8.00 pm, el aforo se detuvo a esa hora, puesto que se fue observando una disminución del tráfico. Como el objeto de este aforo es encontrar las horas pico, dado lo observado ya no se consideró necesario continuar con el registro de datos.

Figura 15 Hora Pico 15 de Abril y Gral trigo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 16 Hora pico Ingavi y Gral Trigo



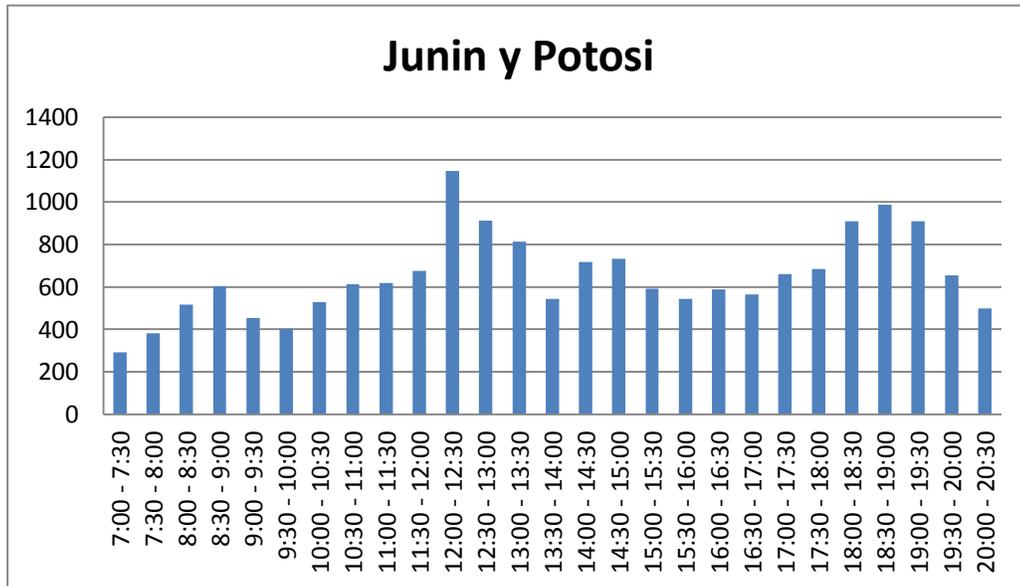
Fuente: Elaboración Propia

Figura 17 Hora pico Belgrano y La Paz



Fuente: Elaboración Propia

Figura 18 Hora pico Junín y Potosí



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7. Horas Pico

INTERSECCIÓN	HORA PICO
15 de Abril y Gral. Trigo	8:00 – 9:00
Gral. Trigo e Ingavi	8:00 – 9:00
Belgrano y La Paz	12:00 – 13:00
Junín y Potosí	12:00 – 13:00

Fuente: Elaboración propia

4.4 MEDICIÓN DE FASES DE LOS SEMÁFOROS.

Se tiene conocimiento por el Ing. Horacio Rubén Calizaya, funcionario de la HAM de Tarija, perteneciente a la unidad de tráfico, que la programación de los semáforos de la ciudad de Tarija es de tiempo fijo, es decir se mantienen constantes independientemente de la hora del día. Por lo que se procedió a la medición de los ciclos de prefijados en las intersecciones de estudio, dando como resultado lo siguiente:

Tabla 8 Semaforizacion actual

Intersección		Belgrano y La Paz	
	Tiempo (s)	Ciclo (s)	
Rojo	25	48	
Amarillo	3		
Verde	20		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9 Semaforizacion actual

Intersección		Potosí y Junín	
	Tiempo (s)	Ciclo (s)	
Rojo	25	42	
Amarillo	3		
Verde	20		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10 Semaforizacion actual

Intersección	15 de Abril y Gral. Trigo	
	Tiempo (s)	Ciclo (s)
Rojo	25	36
Amarillo	3	
Verde	20	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11 Semaforizacion actual

Intersección	15 de Abril e Ingavi	
	Tiempo (s)	Ciclo (s)
Rojo	25	36
Amarillo	3	
Verde	20	

Fuente: Elaboración Propia

4.5 AFOROS DE TRÁFICO

La recolección de datos se realizó en la hora pico determinada en el punto 4.3, dos días hábiles y un día de fin de semana en un periodo de 3 semanas comprendidas entre 9 de mayo y el 27 de mayo del presente año. Los detalles de los aforos se presentan en el Anexo I.

Para el conteo vehicular se tomó en cuenta 2 tipos de clasificación de vehículos:

4.5.1 Clasificación

4.5.1.1 Según el tamaño:

- Vehículos livianos.

Son los vehículos cuya longitud no supera los 3.5 m. como indica el manual colombiano, y solo cuentan con 2 ejes. Entran en esta clasificación taxis, automóviles y Vans.

- **Vehículos Medianos**

Son los vehículos cuya longitud supera los 3.5 m. y pueden tener en el eje trasero más de dos ruedas. Entran a esta clasificación los micros, vagonetas de cuatro puertas y camionetas doble cabina

- **Vehículos Pesados**

Son los vehículos cuya longitud excede los 6 m. y cuentan con más de dos ejes tándem. Puesto que no se permite el acceso a este tipo de vehículos en las intersecciones estudiadas no se tuvieron en cuenta

4.1.1.1 Según su función.

- **Vehículos Privados.**

Son los vehículos cuya función está al servicio de una persona particular, es decir no es usado para el transporte de pasajeros.

- **Vehículos Públicos**

Vehículos dedicados al transporte de pasajeros, son exclusivamente dedicados a este rubro. Entran en esta clasificación: taxis, micros y taxitrufis.

4.1.2 CONTEOS DE VEHÍCULOS.

Los aforos se realizaron por el procedimiento descrito anteriormente, pero solo en la hora pico, dando por resultado un flujo, que será usado en la simulación y el procedimiento para la optimización.

4.1.2.1 FACTORES DE EQUIVALENCIA PARA DIVERSOS TIPOS DE VEHÍCULOS

Tabla 12 Equivalencia de vehiculos

Automóvil	1
Camión liviano	1
Camioneta	1.75
Bus	2
Camión articulado	2.25

Fuente: Guido Radelat, Ingeniería de tránsito

Estos factores de equivalencia fueron utilizados en el presente trabajo, en lo correspondiente a flujo de saturación, así mismo, se obtuvo estos valores para vehículos medianos y buses en base a las condiciones prevalecientes en las intersecciones estudiadas.

En las siguientes tablas se detallan los aforos realizados en hora pico, para lograr el estudio se realice en grado de saturación.

Tabla 13 Resumen de aforos

intersección:	Av. La Paz y Av. Belgrano					
Calle:	Belgrano		Sentido:		O – E	
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
04/05/2016	116	287	24	37	112	342
06/05/2016	112	274	60	63	140	313
09/05/2016	124	261	44	40	152	322
11/05/2016	156	223	44	56	172	261
16/05/2016	104	314	56	41	120	280
18/05/2016	132	278	80	54	92	369

media	124	273	51	49	131	315
Total	397		100		446	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Resumen de aforos

intersección:	Av. La Paz y Av. Belgrano					
Calle:	Belgrano			Sentido:	E - O	
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
04/05/2016	24	58	176	159	0	0
06/05/2016	20	55	152	129	0	0
09/05/2016	8	31	36	39	0	0
11/05/2016	36	54	232	141	0	0
16/05/2016	24	108	160	111	0	0
12/01/1900	95	172	233	0	0	369
media	35	80	165	97	0	62
Total	114		261		62	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15 Resumen de aforos

intersección:	Av. La Paz y Av. Belgrano					
Calle:	La Paz			Sentido:	N - S	
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
04/05/2016	108	107	0	0	236	304
06/05/2016	84	62	0	0	200	283
09/05/2016	76	51	0	0	228	294
11/05/2016	192	85	0	0	320	319
16/05/2016	68	71	0	0	260	307
12/01/1900	88	84	0	0	176	327
media	103	77	0	0	237	306
Total	179		0		542	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16 Resumen de aforos

intersección:	Av. La Paz y Av. Belgrano					
Calle:	La Paz			Sentido:	N - S	
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
04/05/2016	0	0	20	93	164	158
06/05/2016	0	0	20	82	172	135
09/05/2016	0	0	20	114	200	148
11/05/2016	0	0	36	141	260	158
16/05/2016	0	0	12	83	144	126
12/01/1900	0	0	44	74	144	105
media	0	0	25	98	181	138
Total	0		123		319	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Resumen de aforos

Intersección:	Av. Potosi y Junín					
Calle:	Potosi			Sentido:	O - E	
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
03/05/2016	4	37	0	0	284	479
05/05/2016	8	59	0	0	344	509
10/05/2016	12	85	0	0	312	532
12/05/2016	8	48	0	0	316	452
17/05/2016	12	29	0	0	344	401
19/05/2016	8	46	0	0	308	502
media	9	51	0	0	318	479
Total	59		0		797	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Resumen de aforos

Intersección:	Av. Potosí y Junín					
Calle:	Potosí			Sentido:		E - O
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
03/05/2016	0	0	32	26	316	341
05/05/2016	0	0	52	29	280	381
10/05/2016	0	0	68	62	320	311
12/05/2016	0	0	32	60	320	401
17/05/2016	0	0	40	37	300	401
19/05/2016	0	0	68	60	324	339
media	0	0	46	49	318	361
Total	0		95		679	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19 Resumen de aforos

Intersección:	Av. Potosí y Junín					
Calle:	Junín			Sentido:		S - N
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
03/05/2016	68	47	112	77	144	233
05/05/2016	100	79	120	94	132	255
10/05/2016	120	42	180	117	116	259
12/05/2016	88	100	52	97	160	249
17/05/2016	96	130	64	167	136	284
19/05/2016	44	94	84	53	92	222
media	92	87	98	96	134	252
Total	179		194		386	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Resumen de aforos

Intersección: 15 de Abril y Gral. Trigo						
Calle:	15 de Abril				Sentido:	O-E
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
04/05/2016	0	0	44	86	92	191
06/05/2016	0	0	52	96	80	133
09/05/2016	0	0	56	118	84	182
11/05/2016	0	0	36	130	104	207
16/05/2016	0	0	44	76	96	188
18/05/2016	0	0	32	60	96	196
media	0	0	44	91	94	190
Total	0		135		284	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21 Resumen de aforos

Intersección: 15 de Abril y Gral. Trigo						
Calle:	Gral. Trigo				Sentido:	N-S
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
04/05/2016	56	71	0	0	88	294
06/05/2016	68	64	0	0	96	181
09/05/2016	64	44	0	0	88	204
11/05/2016	56	81	0	0	84	295
16/05/2016	44	81	0	0	84	292
18/05/2016	44	84	0	0	92	306
media	56	76	0	0	88	293
Total	132		0		381	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 Resumen de aforos

Intersección:	Ingavi y Gral. Trigo					
Calle:	Ingavi			Sentido:	O-E	
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
03/05/2016	0	0	0	211	220	176
05/05/2016	0	0	0	225	228	173
10/05/2016	0	247	0	0	208	150
12/05/2016	0	205	0	0	192	184
16/05/2016	0	152	0	0	208	155
18/05/2016	0	181	0	0	220	175
media	0	167	0	0	214	174
Total	167		0		388	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23 Resumen de aforos

Intersección:	Ingavi y Gral. Trigo					
Calle:	Gral. Trigo			Sentido:	N-S	
Fecha	GI		GD		DF	
	Publico	Privado	Publico	Privado	Publico	Privado
03/05/2016	56	71	0	0	80	185
05/05/2016	72	41	0	0	88	172
10/05/2016	16	85	0	0	92	162
12/05/2016	40	74	0	0	76	213
16/05/2016	40	68	0	0	68	190
18/05/2016	40	79	0	0	80	169
media	40	73	0	0	80	179
Total	113		0		259	

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el resumen de los conteos de tráfico definitivos para proceder al cálculo de las metodologías explicadas.

4.1.3. DEPURACION DE DATOS DE VOLUMEN DE TRÁFICO

En toda muestra estadística que se realice se debe calcular la dispersión de datos es decir entre que valores máximos y mínimos puede estar comprendido el valor obtenido en los aforos de cada punto y tramo.

Para obtener este rango se procede a ordenar todos los datos, encontrar la media aritmética, la desviación estándar y se define el rango de depuración.

4.1.3.1 MEDIA ARITMETICA

$$X = \sum_{i=0}^n \frac{x}{n}$$

Donde

X= media aritmética

x = valor de observación

n= número de datos

4.1.3.2 DESVIACION ESTANDAR

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(x-X)^2}{n}}$$

σ = Desviación estándar

X= media aritmética

x = valor de observación

n= número de datos

El rango se define en la siguiente ecuación: $r = X + \sigma$

$$r = X - \sigma$$

Desechando todos los datos que no estén comprendidos entre ese rango.

Tabla 24 Aforos finales

Intersección:	Av. La Paz y Av. Belgrano		
Calle:	Belgrano	Sentido:	O - E
	GI	GD	DF
	397	100	446

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25 Aforos finales

Intersección:	Av. La Paz y Av. Belgrano		
Calle:	Belgrano	Sentido:	E - O
	GI	GD	DF
	88	290	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26 Aforos finales

Intersección:	Av. La Paz y Av. Belgrano		
Calle:	La Paz	Sentido:	N - S
	GI	GD	DF
	179	0	542

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27 Aforos finales

Intersección:	Av. La Paz y Av. Belgrano		
Calle:	La Paz	Sentido:	N - S
	GI	GD	DF
	0	123	319

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28 Aforos finales

Intersección:	Av. Potosi y Junín		
Calle:	Potosi	Sentido:	O - E
	GI	GD	DF
	59	0	797

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29 Aforos finales

Intersección:	Av. Potosi y Junín		
Calle:	Potosi	Sentido:	E - O
	GI	GD	DF
	0	95	679

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30 Aforos finales

Intersección:	Av. Potosi y Junín		
Calle:	Junín	Sentido:	S - N
	GI	GD	DF
	179	194	386

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31 Aforos finales

Intersección:	Ingavi y Gral. Trigo		
Calle:	Gral.Trigo	Sentido:	N-S
	GI	GD	DF
	113	0	257

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32 Aforos finales

Tabla 33

Intersección:	Ingavi y Gral. Trigo		
Calle:	Ingavi	Sentido:	N-S
	GI	GD	DF
	179	0	386

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34 Aforos finales

Intersección:	15 de Abril y Gral. Trigo		
Calle:	Gral. Trigo	Sentido:	N - S
	GI	GD	DF
	132	0	381

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35 Aforos finales

Intersección:	15 de Abril y Gral. Trigo		
Calle:	15 de Abril	Sentido:	O - E
	GI	GD	DF
	0	135	284

Fuente: Elaboración propia

4.6 APLICACIÓN METODOLOGIA HCM 2000

Se emplearon adaptaciones de las planillas de trabajo. En ellas se incorporaron los conceptos y ecuaciones descritos a lo largo de la presente investigación. A manera de ejemplo, se describe a continuación el caso de análisis para el periodo pico para la intersección de la calle Junín y Av. Potosí.

Tabla 36 Planilla de ajuste de la demanda

	E - O	O - E	N - S	N - S
Ajuste de Volumen				
Volumen	774	856	370	
Volumen izquierda Vizq (veh/h)	0	59	113	
Volumen Directo Vizq (veh/h)	679	797	257	
Volumen Derecho Vder (veh/h)	95	0	0	
Factor hora Pico, PHF	0,971	0,971	0,971	
Tasa de Flujo Ajustado en el grupo de carriles $V_p=V/PHF$	797,1	881,6	381,1	
Tasa de flujo ajustado Izquierda, $V_p=Vizq/PFH$ (veh/h)	0,0	60,8	116,4	
Tasa de flujo ajustado Directo, $V_p=Vdic/PFH$ (veh/h)	699,3	820,8	264,7	
Tasa de flujo ajustado Derecha, $V_p=Vder/PFH$ (veh/h)	97,8	0,0	0,0	
Proporcion de Giros LT o RT (PLT o PRT)				
Proporcion de Giros Izquierda (PLT)	0,0	0,1	0,3	
Proporcion de Giros Derecha (PRT)	0,1	0,0	0,0	

Fuente: elaboración propia

En segundo lugar, para el primer escenario de análisis, se ajustó la oferta empleando la planilla de la Tabla 69. En ella se calcularon los factores para la estimación de la tasa de flujo de saturación (ver Ecuación 11).

Tabla 37 Planilla de ajuste de oferta

	E - O	O - E	N - S	N - S
Tasa de Flujo de Saturación				
Flujo de Saturación ideal, S_o (pc/h/carril)	1900	1900	1900	
Número de carriles, N	2	1	1	
Ancho de carril, W	4	3,8	3,5	
Factor de ajuste por ancho de carril, fw	1,025	1,056	0,972	
Volumen de vehículos pesados, $\%HV=100*HV/V$	0	0	0	
Equivalente en vehículos livianos $E_t=2pc/HV$	0	0	0	
Factor de ajuste por vehículos pesados, fhv	1	1	1	
Pendiente en el grupo de carriles, %G	0	0	0	
Factor de ajuste por pendiente, Fg	1	1	1	
Numero de maniobras de estacionamiento por hora, Nm 180	30	25	21	
Factor de ajuste por estacionamiento, fp=0.050				
Numero de buses por estacionamiento, fp=0.050	0	0	0	

Numero de buses que se detienen por hora, MB=250	0	0	0	
Factor de ajuste por bloqueo de buses, fbb=0.050	1	1	1	
Tipo de Área	CBD	CBD	CBD	
Factor de ajuste por tipo de area, fa	0,9	0,9	0,9	
Tasa de flujo no ajustado para el grupo de carriles, Vg(veh/h)	774	856	370	
Tasa de flujo no ajustado para el carril con mayor volumen del grupo de carriles, vgl (veh/h)	774	856	370	
Factor de ajuste por utilización de carril, flu	0	1	1	
Factor de ajuste por giro a la izquierda, flt	1	1	0,984	
Factor de ajuste por giro a la derecha, frt=0.050	0,956	0,956	1	
Factor de ajuste por peat/bic para giros izquierda, flpb	1	1	1	
Factor de ajuste por peat/bic para giros derecha, frpb	1	1	1	
Flujo de saturación ajustado, s (veh/h) $s = s_0 N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{LPb} f_{RPb}$	843	1503	1198	

Fuente: elaboración propia

Para los casos de análisis correspondientes al segundo escenario, los factores de ajuste y la Ecuación 11 fueron obviados; por lo tanto las tasas de flujo de saturación “s” medidas en campo fueron ingresadas directamente en la Tabla 37

Tabla 38. Planilla de estimación de fLT para giros a la izquierda permitidos y

Tabla 38 Planilla de estimacion Flt

	E - O	O - E	N - S	S - N
Datos de entrada				
Longitud de ciclo, C(s)	20	20	20	
Tiempo de verde real para el grupo de carriles, LT, g(s)	17	17	17	
Tiempo de verde efectivo para el grupo de carriles, LT, G (s)	20	20	20	
Tiempo de verde efectivo del flujo opuesto, go (s)	18.5	18.5	18.5	
Número de carriles en el grupo de carriles LT, N	797,116	881,565	381,050	
Tasa de flujo LT ajuste, Vlt (veh/h)	0,463	0,069	0,305	
Proporción del volumen LT en el grupo de carriles LT, Plt		0,3054	0	
Proporción del volumen LT en el flujo opuesto, PL70	774	856	370	
Tasa de flujo ajustada para el acceso opuesto, vo (veh/h)	3	3	3	
Tiempo perdido para el grupo de carriles LT, tl	20	20	20	
Cálculos				
Volumen LT por ciclo, LTC=vlC/3600	7,92	9,30	3,00	

Flujo opuesto por carril, por ciclo, $V_{plc} = V_o C / 3600$	4,30	4,76	2,06	
Relación de pelotón opuesto, Rpo	1	1	1	
$g_f = G [e^{-0.860(LTC^{0.629})}] - t_L$ $0 \leq g_f \leq g$ (excepto carriles exclusivos de giro a la izquierda) ²	8,68	7,83	8,49	
Relación de cola opuesta, $qro = \max(1 - Rpo(g_o/C), 0)$	15,233	19,221	0,611	
$g_q = 4.943 v_{olc}^{0.762} q r o^{1.061} - t_L$ $g_q \leq g$	15,233	19,221	21,927	
$g_u = g - g_q$ si $g_q \geq g_f$ o $g_u = g - g_f$ si $g_q < g_f$	15,233	19,221	0,611	
$n = \max[(g_q - g_f) / 2, 0]$	15,233	19,221	21,927	
$P_{TH0} = 1 - P_{LT0}$	0,963	0,795	0,84	
Flujo opuesto efectivo, $v_{oe} = v_o / f_{LUo}$ ($f_{LUo} = 1$, carril único)	28,687	29,729	25,273	
Tipo de carril giro a la izquierda	COMPARTIDO	COMPARTIDO	COMPARTIDO	
Vehículos directos equivalentes para giros izquierda permitidos, E_{L1}	2,36	2,132	2,283	
$E_{L2} = \max[(1 - P_{TH0}^n) / P_{LT0}, 1.0]$, $E_{L2} \geq 1.0$	4,369	3,729	4,731	
$f_{min} = 2(1 + P_{LT}) / g$	12,98	6,304	8,112	
$g_{diff} = \max[g_p - g_f, 0]$ (excepto cuando el volumen de giro a la izquierda es 0) ³	0,963	0,795	0,84	
$f_{LT} = f_m = [g_f/g] + [(g_u/g) / (1 + P_{LT}(E_{L1} - 1))] + [(g_{diff}/g) / (1 + P_{LT}(E_{L2} - 1))]$ ($f_{min} \leq f_m \leq 1.00$)	715	556	370	

Fuente: elaboración propia

Tabla 39 Tasa de flujo de saturacion

	E - O	O - E	N - S	S - N
Datos de entrada				
Longitud de ciclo, C(s)	42	42	42	
Tiempo de verde real para el grupo de carriles, LT, g(s)	17	17	17	
Tiempo de verde efectivo para el grupo de carriles, LT, G (s)	20	20	20	
Tiempo de verde efectivo del flujo opuesto, go (s)	18.5	18.5	18.5	
Número de carriles en el grupo de carriles LT, N	797,116	881,565	381,050	
Tasa de flujo LT ajuste, Vlt (veh/h)	0,463	0,069	0,305	
Proporción del volumen LT en el grupo de carriles LT, Plt		0,3054	0	
Proporción del volumen LT en el flujo opuesto, P _{LT0}	774	856	370	
Tasa de flujo ajustada para el acceso opuesto, vo (veh/h)	3	3	3	
Tiempo perdido para el grupo de carriles LT, tl	20	20	20	
Cálculos				
Volumen LT por ciclo, LTC=vlc/3600	7,92	9,30	3,00	
Flujo opuesto por carril, por ciclo, $V_{plc} = V_o C / 3600$	4,30	4,76	2,06	
Relación de pelotón opuesto, Rpo	1	1	1	

$g_f = G[e^{-0.860(LTC^{0.629})}] - t_L \quad 0 \leq g_f \leq g$ (excepto carriles exclusivos de giro a la izquierda) ²	8,68	7,83	8,49	
Relación de cola opuesta, $qro = \max(1 - Rpo(g_o/C), 0)$	15,233	19,221	0,611	
$g_q = 4.943v_{oic}^{0.762}qro^{1.061} - t_L \quad g_q \leq g$	15,233	19,221	21,927	
$g_u = g - g_q$ si $g_q \geq g_f$ o $g_u = g - g_f$ si $g_q < g_f$	15,233	19,221	0,611	
$n = \max[(g_q - g_f)/2, 0]$	15,233	19,221	21,927	
$P_{TH0} = 1 - P_{LT0}$	0,963	0,795	0,84	
Flujo opuesto efectivo, $v_{oe} = v_o/f_{LUo}$ ($f_{LUo} = 1$, carril único)	28,687	29,729	25,273	
Tipo de carril giro a la izquierda	COMPARTIDO	COMPARTIDO	COMPARTIDO	
Vehículos directos equivalentes para giros izquierda permitidos, E_{L1}	2,36	2,132	2,283	
$E_{L2} = \max[(1 - P_{TH0}^n)/P_{LT0}, 1.0]$, $E_{L2} \geq 1.0$	4,369	3,729	4,731	
$f_{min} = 2(1 + P_{LT})/g$	12,98	6,304	8,112	
$g_{diff} = \max[g_p - g_f, 0]$ (excepto cuando el volumen de giro a la izquierda es 0) ³	0,963	0,795	0,84	
$f_{LT} = f_m = [g_f/g] + [(g_u/g)/(1 + P_{LT}(E_{L1} - 1))] + [(g_{diff}/g)/(1 + P_{LT}(E_{L2} - 1))]$ ($f_{min} \leq f_m \leq 1.00$)	715	556	370	

Fuente: elaboración propia

Luego de realizar los ajustes en los volúmenes y obtener los valores de tasa de flujo de saturación correspondientes; como tercer paso se realizó el análisis de capacidad descrito en la Tabla 40; con la cual se calcularon las capacidades “c” de los grupos de carriles, así como también los grados de saturación $X=v/c$ correspondientes, tanto para los grupos de carriles, como para los accesos y la intersección en su conjunto.

Tabla 41 Planilla de análisis y estimación de la capacidad en una intersección semaforizada

Tabla 40 Capacidad

Tabla 41

	E - O	O - E	N - S	S - N
Análisis de Capacidad				
Fase	1	1	1	
Tipo de fase	P	P	P	
Tasa de flujo ajustado, v (veh/h)	797,12	881,57	381,05	

Tasa de flujo de saturación, s (veh/h)	1835,00	1687,00	2865,00	
Tiempo perdido, tl (s), $tl=I+Y-e$	2,70	2,70	2,70	
Longitud de ciclo (s)	42,00	42,00	42,00	
Tiempo de verde efectivo, g(s), $g=G+Y-tl$	18,70	18,70	18,70	
Proporción de verde, g/C	0,45	0,45	0,45	
Capacidad del grupo de carriles, $c=s(g/C)$, (veh/h)	817,01	751,12	1275,61	
Relación v/c, X	1.28	0.98	1.53	
Relación de flujo, v/s	0,80	0,80	0,88	
Sumatoria de relaciones de flujo para grupo de carriles críticos, Yc	1169,54			
Tiempo perdido total por ciclo, L(s)	5,4			
Grado de saturación crítico, Xc	1228,017			

Fuente: elaboración propia

Como paso previo a la estimación de la demora por control fue necesario estimar la demora por cola inicial; para lo cual se empleó la planilla de la Tabla 44, donde primero fue definido el caso de análisis para luego determinar las demoras uniforme d_1 y por cola inicial d_3 .

Tabla 42 Analisis de capacidad

	E - O	O - E	N - S	S - N
Parámetros de entrada				
Periodo de análisis	15 minutos			
Duración del periodo de análisis, T(h)	0.25	0.25	0.25	
Longitud de ciclo, C(s)	42	42	42	
Cola inicial, Q_b (veh)	5	6	4	
Proporción de verde, g/C	0,759	0,759	0,759	
Relación v/c, $X=v/c$	1.28	0.98	1.53	
Capacidad del grupo de carriles, c(veh/h)	817,01	751,12	1275,61	
Proporción de vehículos que llegan en verde, P	0,823	0,597	0,269	
Relación de Pelotón (R_p)	1	1.000	1.000	
Factor de ajuste suplementario, f_{pa} (refiérase a tabla 11)	1	1	1	
Factor de ajuste por progresión/coordiación, $PF = (1 - P)f_{PA}/(1 - g/C)$	1	1	1	
Duración de la demanda insatisfecha en T, t(h) $t = \min\left\{T, \frac{Q_b}{c[1 - \min(1, X)]}\right\}$	0.25	0.25	0.25	
Caso de análisis				
Demora por cota inicial, d_3 (s) $d_3 = \frac{1800Q_b}{c}$	473,68	568,42	378,95	

Demora uniforme, d_1 (s) $d_1 = 0.5C(1 - g/C)$	31,36	69,64	98,35	
---	-------	-------	-------	--

Fuente: elaboración propia

Posteriormente a la estimación de las demoras d_1 y d_3 , se prosiguió con la estimación de la demora incremental d_2 ; para lo cual se empleó la planilla de la Tabla 45; la misma con la que también se obtuvieron los valores de las demoras por control “d” y niveles de servicio “NS”, tanto para los grupos de carriles, como para los accesos y la intersección.

Tabla 43 Nivel de servicio

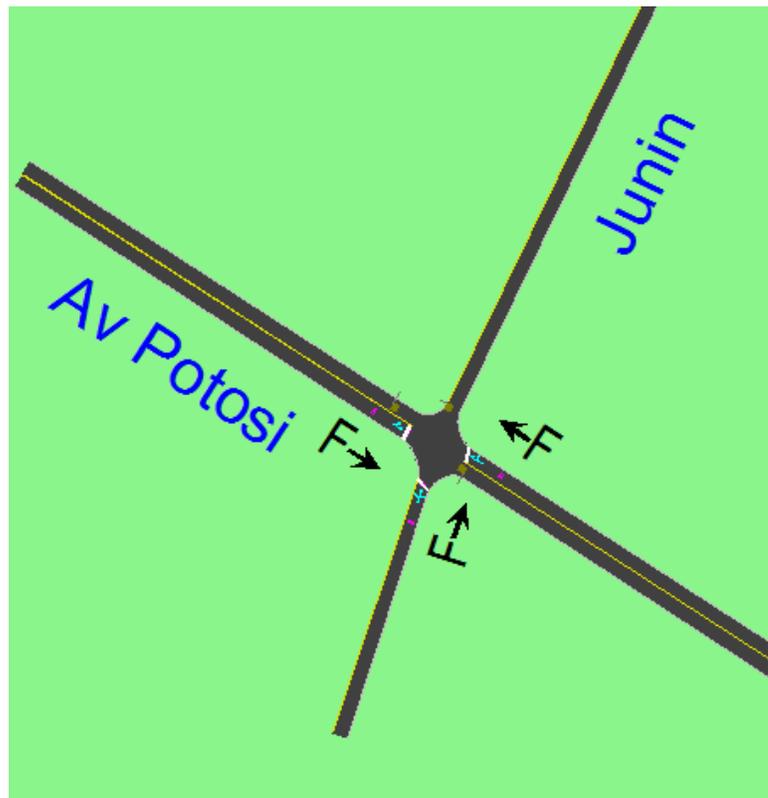
	E - O	O - E	N - S	S - N
Capacidad del grupo de carriles, Demora por control y determinación del Nivel de Servicio (NS)				
Tasa de flujo ajustado, v (veh/h)	797,12	881,565	381,050	
Capacidad del grupo de carriles, c (ceh/h)	817,01	751,117	1275,607	
Relación v/c, X=v/c	4,88	0,831	0,963	
Calibración de la demora incremental, k	0,5	0,5	0,5	
Factor de ajuste por entrada de la intersección corriente	1	1	1	
Duración de análisis, T (h)	0,25	0,25	0,25	
Demora incremental, d_2 (s/veh) $d_2 = 900T \left[(X - 1) + \sqrt{(X + 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right]$	25,78	79,3	101,68	
Demora por cola inicial, d_3 (s/veh) (de hoja de cálculo de demora por cola inicial)	8,4	8,3	3,98	
Demora uniforme, d_1 (veh/h) (de hoja de cálculo de demora por cola inicial)	8,4	8,3	3,98	
Factor de ajuste por progresión/coordinación $PF = (1 - P)f_{PA}/(1 - g/C)$	0,46	0,64	0,77	
Demora, $d = d_1(PF) + d_2 + d_3$ (s/veh)	29,35	128,68	219	
Nivel de servicio por grupo de carriles	C	F	F	
Demora por acceso, $d_A = \Sigma(d)(v)/\Sigma v$ (s/veh)	106.4	78.32	108.28	
Nivel de servicio NS por acceso	F	F	F	
Tasa de flujo del acceso, V_A (veh/h)	31,89	125,69	211,87	
Demora de la intersección, $d_1 = \Sigma(d_A)(v_A)/\Sigma v_A$ (s/veh)	179.59			
NS de la intersección	F			

Fuente: elaboración propia

4.7 APLICACIÓN DE SYNCHRO 7.0

El primer paso, tal como se aprecia en la Figura 19, consistió en ingresar las características de la intersección, empleando los comandos para la creación de links.

Figura 19 Entrada de carriles



Fuente: Synchro 8

Una vez creada la intersección, se empleó la ventana para el ingreso de la información de la capacidad. En la Figura 20 se presenta la ventana de Synchro 8, en la que se ingresan algunas características de la intersección como grupo de carriles, nombre del acceso, volúmenes de tráfico, ancho de carril, tipo de área, entre otros; pero además en la que se estiman los valores de tasa de flujo de saturación de acuerdo a lo indicado en el ítem 4.2.

De modo similar, La Figura 20 muestra la ventana de información de la demanda, en la que son ingresados el factor de hora pico, los volúmenes peatonales y de bicicletas, los porcentajes de vehículos pesados, la cantidad de bloqueos y las maniobras de estacionamiento, entre otros.

Por último, en la ventana de información semafórica de la Figura 40, se ingresaron las fases y los tiempos del semáforo. Adicionalmente, esta ventana también muestra las estimaciones de los valores de demora por control y los percentiles-50 para las longitudes de cola.

Figura 20 Datos de Carriles

LANE SETTINGS												
Lanes and Sharing (#RL)		↕			↕			↕				
Traffic Volume (vph)	59	597	0	0	679	95	179	386	154	0	0	0
Street Name	Av Potosi						Junin					
Link Distance (m)	—	115.2	—	—	103.1	—	—	73.4	—	—	143.8	—
Links Speed (km/h)	—	30	—	—	30	—	—	30	—	—	50	—
Set Arterial Name and Speed	—	EB	—	—	WB	—	—	NB	—	—	SB	—
Travel Time (s)	—	13.8	—	—	12.4	—	—	8.8	—	—	10.4	—
Ideal Satd. Flow (vphpl)	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900
Lane Width (m)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
Grade (%)	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—
Area Type CBD	—	<input checked="" type="checkbox"/>	—	—	<input checked="" type="checkbox"/>	—	—	<input checked="" type="checkbox"/>	—	—	<input checked="" type="checkbox"/>	—
Storage Length (m)	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0
Storage Lanes (#)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Right Turn Channelized	—	—	None	—	—	None	—	—	None	—	—	None
Curb Radius (m)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Add Lanes (#)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lane Utilization Factor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Right Turn Factor	—	1.000	—	—	0.983	—	—	0.971	—	—	—	—
Left Turn Factor (prot)	—	0.996	—	—	1.000	—	—	0.988	—	—	—	—
Saturated Flow Rate (prot)	—	1260	—	—	1303	—	—	1058	—	—	—	—
Left Turn Factor (perm)	—	0.605	—	—	1.000	—	—	0.988	—	—	—	—
Right Ped Bike Factor	—	1.000	—	—	1.000	—	—	1.000	—	—	—	—
Left Ped Factor	—	1.000	—	—	1.000	—	—	1.000	—	—	—	—
Saturated Flow Rate (perm)	—	766	—	—	1303	—	—	1058	—	—	—	—
Right Turn on Red?	—	—	<input checked="" type="checkbox"/>	—	—	<input checked="" type="checkbox"/>	—	—	<input checked="" type="checkbox"/>	—	—	<input checked="" type="checkbox"/>
Saturated Flow Rate (RTOR)	—	0	—	—	17	—	—	24	—	—	—	—
Link Is Hidden	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—
Hide Name in Node Title	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—

Fuente: Synchro 8

Figura 21 Datos de Semaforos

NODE SETTINGS		TIMING SETTINGS													
		EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR	PED	HOLD
Node #	3	Lanes and Sharing (#RL)													
Zone		Traffic Volume (vph)													
X East (m)	818.1	84	235	91	76	174	226	145	908	114	132	916	281		
Y North (m)	1290.2	Turn Type													
Z Elevation (m)	0.0	Protected Phases													
Description		Permitted Phases													
Control Type	Pre timed	Detector Phases													
Cycle Length (s)	121.2	Switch Phase													
Lock Timings	<input type="checkbox"/>	Leading Detector (m)													
Optimize Cycle Length	Optimize	Trailing Detector (m)													
Optimize Split	Optimize	Minimum Interval (s)													
Actuated Cycle(s)	121.2	Minimum Split (s)													
Natural Cycle(s)	130.0	Total Split (s)													
Max v/c Ratio	1.80	Yellow Time (s)													
Intersection Delay (s)	180.8	All-Red Time (s)													
Intersection LOS	F	Lost Time Adjust (s)													
ICU	1.07	Lagging Phase?													
ICU LOS	G	Allow Lead/Lag Optimize?													
Offset (s)	0.0	Recall Mode													
Referenced to	Begin of Green	Actuated Effect Green (s)													
Reference Phase	2+6 - NBT/ SBT/ SBR	Actuated g/C Ratio													
Master Intersection	<input type="checkbox"/>	Volume to Capacity Ratio													
Yield Point	Single	Control Delay (s)													
		Queue Delay (s)													
		Total Delay (s)													
		Level of Service													
		Approach Delay (s)													
		Approach LOS													
		Queue Length 50th (m)													
		Queue Length 95th (m)													

Fuente: Synchro 8

Figura 22 Flujo de Saturacion

LANE SETTINGS	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR
Lanes and Sharing (#RL)												
Traffic Volume (vph)	59	597	0	0	679	95	179	386	154	0	0	
Street Name												
Link Distance (m)		115.2			103.1			73.4			143.8	
Links Speed (km/h)		30			30			30			50	
Set Arterial Name and Speed		EB			WB			NB			SB	
Travel Time (s)		13.8			12.4			8.8			10.4	
Ideal Satd. Flow (vphpl)	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900
Lane Width (m)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
Grade (%)		0			0			0			0	
Area Type CBD	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	
Storage Length (m)	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0
Storage Lanes (#)												
Right Turn Channelized			None			None			None			None
Curb Radius (m)												
Add Lanes (#)												
Lane Utilization Factor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Right Turn Factor		1.000			0.983			0.971				
Left Turn Factor (prot)		0.996			1.000			0.988				
Saturated Flow Rate (prot)		1260			1303			1058				
Left Turn Factor (perm)		0.605			1.000			0.988				
Right Ped Bike Factor		1.000			1.000			1.000				
Left Ped Factor		1.000			1.000			1.000				
Saturated Flow Rate (perm)		766			1303			1058				
Right Turn on Red?			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>
Saturated Flow Rate (RTOR)		0			17			24				
Link Is Hidden	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Hide Name in Node Title	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Fuente Synchro 8.

Figura 23 Nivel de Servicio

TIMING SETTINGS														
	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR	PED	HOLD
Minimum Initial (s)	4.0	4.0	--	--	4.0	--	4.0	4.0	--	--	--	--	--	--
Minimum Split (s)	20.0	20.0	--	--	20.0	--	20.0	20.0	--	--	--	--	--	--
Total Split (s)	38.0	38.0	--	--	38.0	--	27.0	27.0	--	--	--	--	--	--
Yellow Time (s)	2.0	2.0	--	--	2.0	--	2.0	2.0	--	--	--	--	--	--
All-Red Time (s)	0.5	0.5	--	--	0.5	--	0.5	0.5	--	--	--	--	--	--
Lost Time Adjust (s)	--	0.0	--	--	0.0	--	--	0.0	--	--	--	--	--	--
Lagging Phase?	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Allow Lead/Lag Optimize?	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Recall Mode	Max	Max	--	--	Max	--	Max	Max	--	--	--	--	--	--
Actuated Effct. Green (s)	--	35.5	--	--	35.5	--	--	24.5	--	--	--	--	--	--
Actuated g/C Ratio	--	0.55	--	--	0.55	--	--	0.38	--	--	--	--	--	--
Volume to Capacity Ratio	--	1.14	--	--	1.05	--	--	1.11	--	--	--	--	--	--
Control Delay (s)	--	98.7	--	--	65.3	--	--	92.5	--	--	--	--	--	--
Queue Delay (s)	--	0.0	--	--	0.0	--	--	0.0	--	--	--	--	--	--
Total Delay (s)	--	98.7	--	--	65.3	--	--	92.5	--	--	--	--	--	--
Level of Service	--	F	--	--	E	--	--	F	--	--	--	--	--	--
Approach Delay (s)	--	98.7	--	--	65.3	--	--	92.5	--	--	--	--	--	--
Approach LOS	--	F	--	--	E	--	--	F	--	--	--	--	--	--
Queue Length 50th (m)	--	~108.3	--	--	~119.2	--	--	~115.5	--	--	--	--	--	--
Queue Length 95th (m)	--	#168.8	--	--	#185.0	--	--	#179.9	--	--	--	--	--	--
Stops (vph)	--	504	--	--	594	--	--	569	--	--	--	--	--	--
Fuel Used (l/hr)	--	63	--	--	53	--	--	62	--	--	--	--	--	--
Dilemma Vehicles (#/hr)	--	0	--	--	0	--	--	0	--	--	--	--	--	--

Fuente: Synchro 8

4.8 ANALISIS DE RESULTADOS

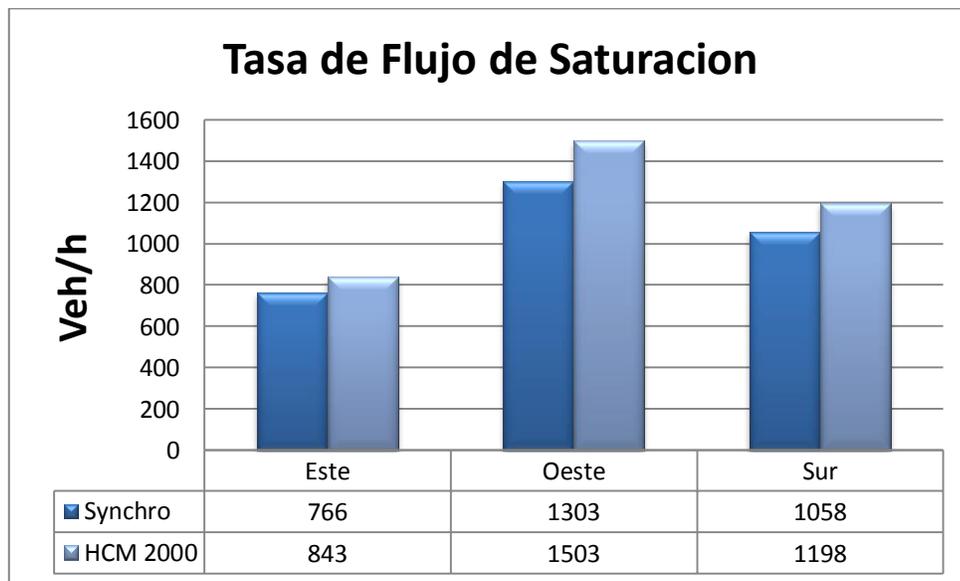
Luego de emplear las metodologías del HCM 2000 y Synchro 8 para el análisis de la intersección estudiada, fueron realizados los análisis comparativos de los parámetros tasa de flujo de saturación (s), grado de saturación (X) o relación v/c, demoras por control (d), niveles de servicio (NS). Así mismo, los resultados obtenidos fueron contrastados con los valores medidos directamente de la información de campo, en las siguientes figuras, se muestra la comparación de los valores más significativos.

Los factores más influyentes para el cálculo del nivel de servicio son tres:

- Relación de flujo de saturación
- Relación V/C
- Demora de la intersección.

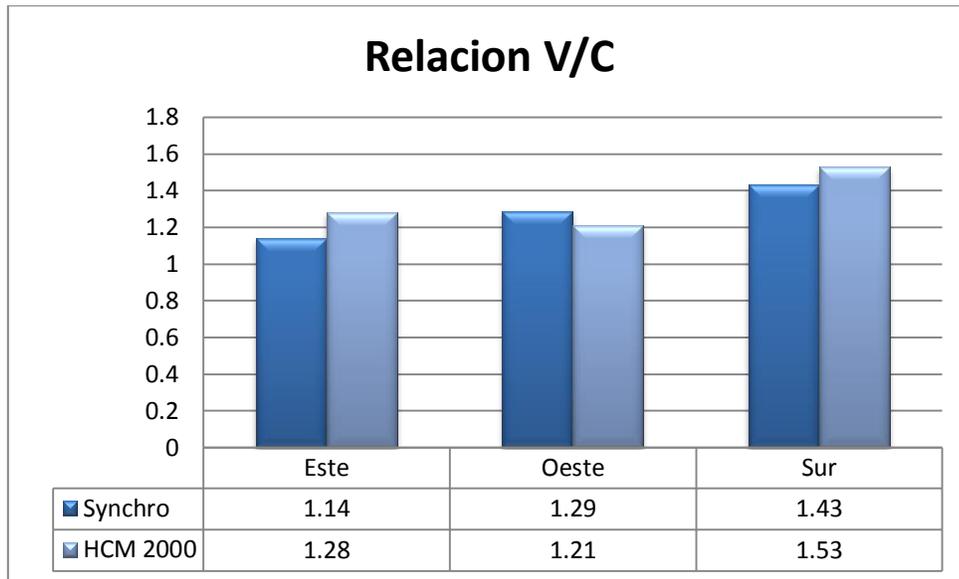
4.8.1 Intersección Av. Potosí y Junín

Figura 24. Flujo de Saturacion



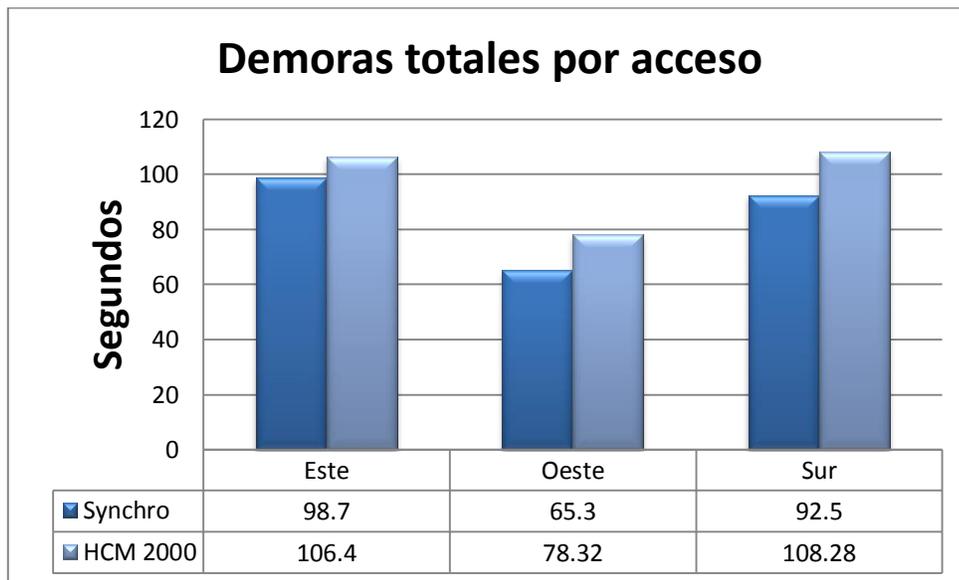
Fuente: Elaboración propia

Figura 25 Relacion Volumen/Capacidad



Fuente: Elaboracion Propia

Figura 26. Demoras totales



Fuente Elaboracion propia

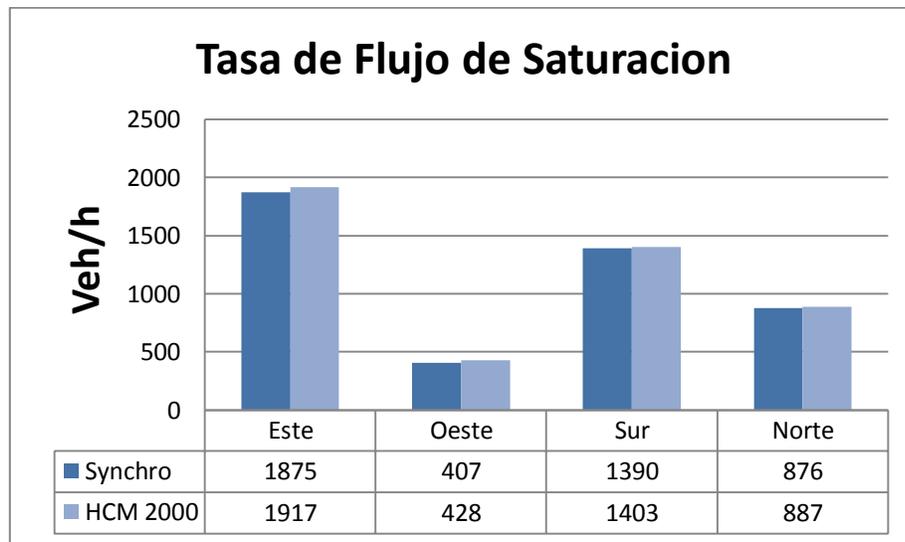
En la intersección Junín y Potosí muestra variaciones en el flujo de saturación, dando valores mayores los de las mediciones manuales calculadas por el método HCM.

Los valores más próximos a los del programa son los de flujo de saturación, puesto que estos valores no son susceptibles a modificaciones puesto que las variables están en tablas y son fácilmente medidas.

Los valores de relación v/c y las medidas de demoras están sujetas a más variaciones, esto porque entra el factor humano y la educación vial, cosas que son difíciles de simular por ser muy aleatorias, al tener poca educación vial, se muestran diferentes tipos de factores que alteran los resultados, es por esa razón que se muestra la mayor variación en cuanto a resultados obtenidos manualmente en las demoras totales.

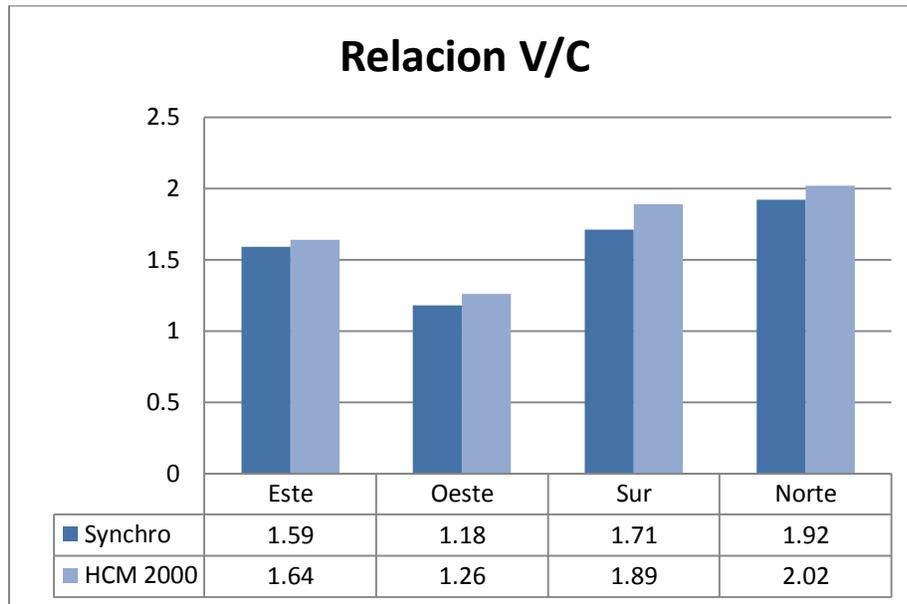
4.8.2 Intersección Av. Belgrano y C. La Paz

Figura 27. Relación de Flujo de saturación entre Synchro y HCM



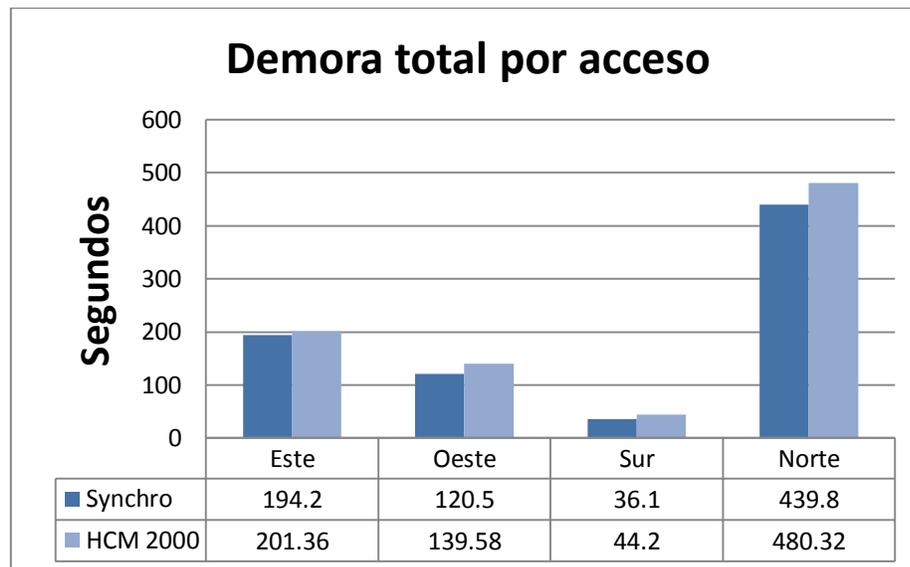
Fuente: Elaboración Propia

Figura 28. Relación de V/C entre Synchro y HCM



Fuente: Elaboración Propia

Figura 29. Relación de demoras entre Synchro y HCM



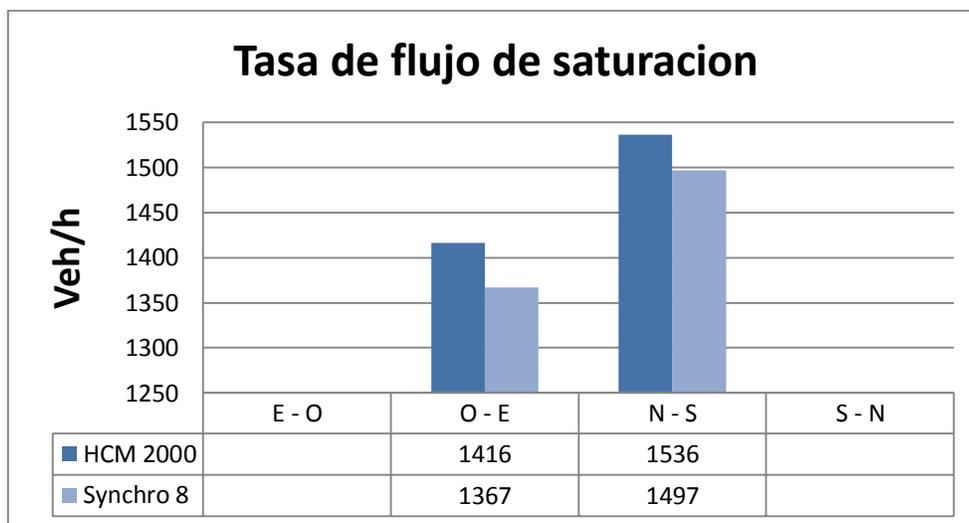
Fuente: Elaboración Propia

En la intersección Belgrano y La Paz los valores se presentan de forma similar a la anterior intersección, presentando con los valores más ajustados en el flujo de saturación.

Los valores de relación v/c y las medidas de demoras están sujetas a más variaciones, esto porque entra el factor humano y la educación vial, cosas que son difíciles de simular por ser muy aleatorias, al tener poca educación vial, se muestran diferentes tipos de factores que alteran los resultados.

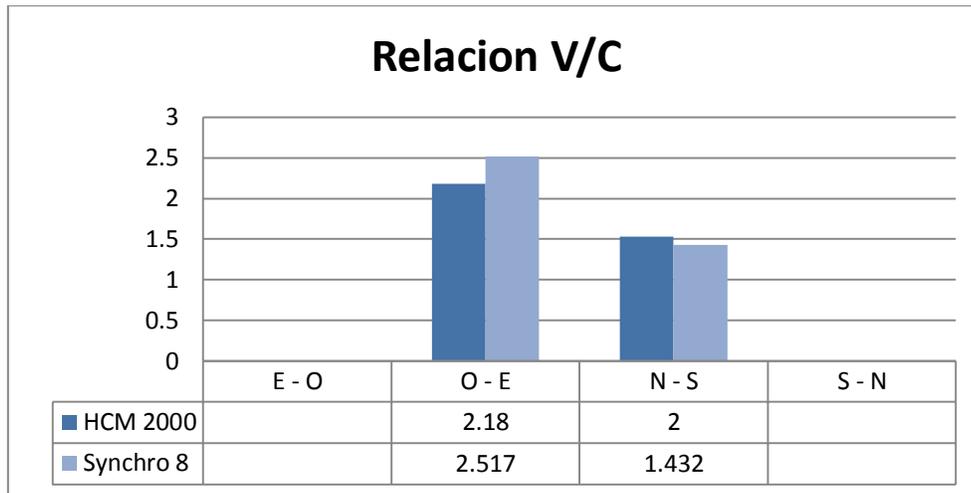
4.8.3 Intersección C. 15 de Abril y Gral. Trigo

Figura 30. Relación de Flujo de saturación entre Synchro y HCM



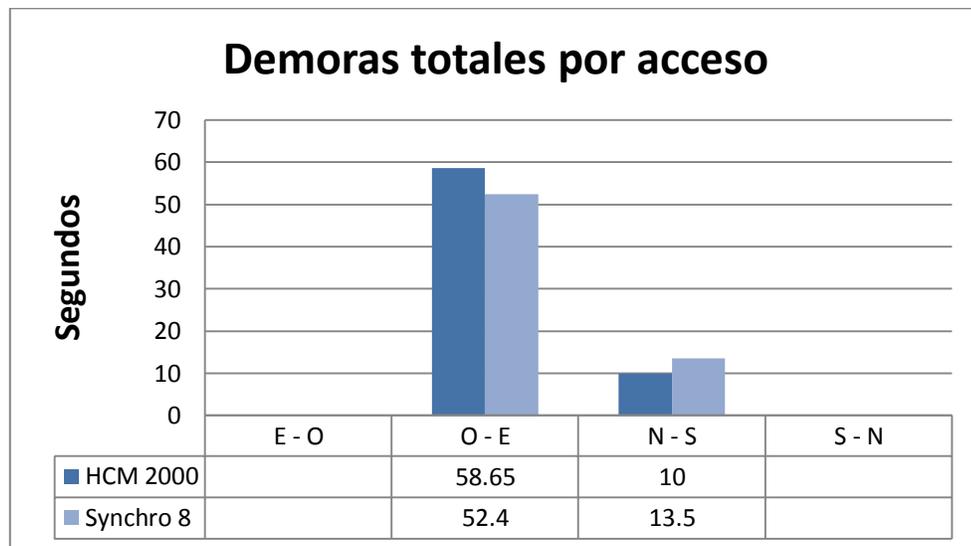
Fuente: Elaboración Propia

Figura 32. Relación de V/C entre Synchro y HCM



Fuente: Elaboración Propia

Figura 33. Relación de demoras entre Synchro y HCM



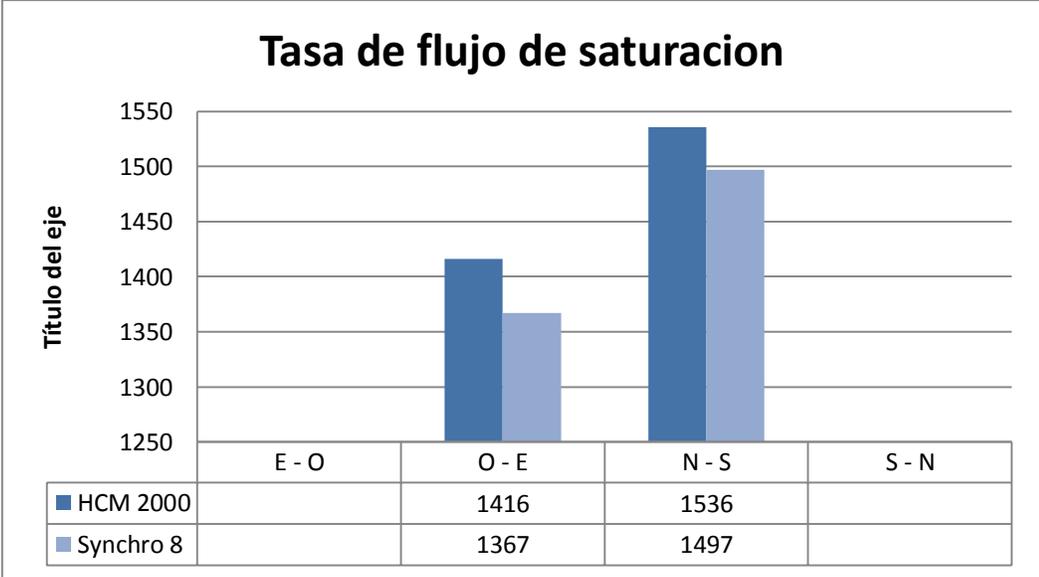
Fuente: Elaboración Propia

Esta intersección en particular presenta valores más ajustados con el programa, ya sea en el flujo de saturación como el los demás valores comparados con las anteriores intersecciones, esto se debe a las características particulares de la misma.

En esta intersección no se presenta buses, estos demoran y causan variaciones difíciles de medir o predecir, de esta manera el tráfico es más fluido y por lo tanto más predecible para simulaciones.

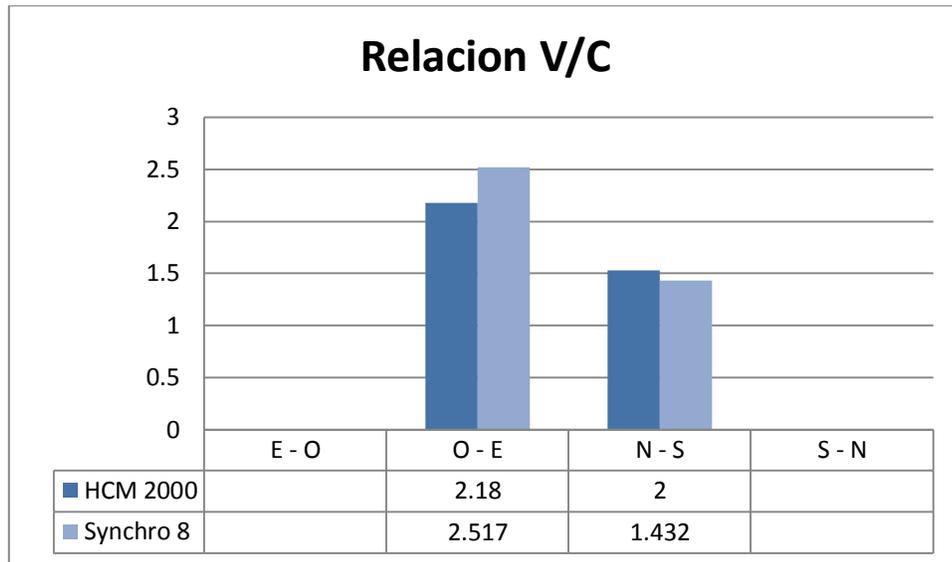
4.8.4 Intersección Ingavi y Gral. Trigo.

Figura 34. Relación de Flujo de saturación entre Synchro y HCM



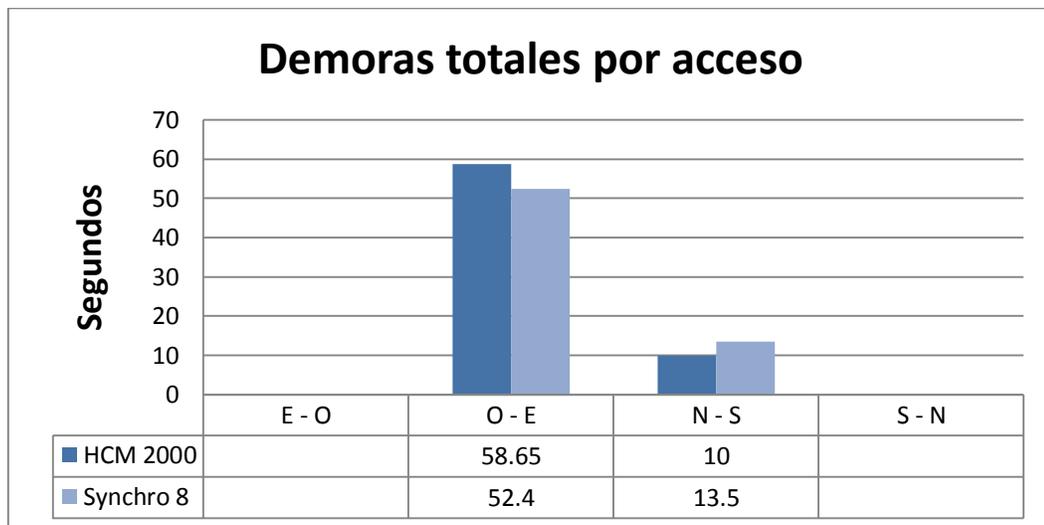
Fuente: Elaboración Propia

Figura 35. Relación de V/C entre Synchro y HCM



Fuente: Elaboración Propia

Figura 36. Relación de demoras entre Synchro y HCM



Fuente: Elaboración Propia

La elección de esta intersección fue para tener una comparación más directa con la de la 15 de Abril y Gral. Trigo, por la cercanía entre ambas y las características geométricas y de semaforización similares.

Aquí también se puede observar la variación principalmente en las demoras, el valor que nos lleva a obtener el nivel de servicio de una intersección. Esto se debe principalmente al transporte público mediano, que llega a tener una determinante función en el flujo de una intersección, causando variaciones.

4.9 INTERPRETACION DE RESULTADOS

Mediante las figuras anteriores se pudo evidenciar, la cercanía de los valores obtenidos mediante cálculo manual y los que arroja el software Synchro 8. Existe una variación pequeña, por lo cual se puede demostrar el alcance del programa,

Cabe recalcar que la introducción de valores en el software se debe hacer con cautela, puesto que la ubicación de los carriles y la determinación de maniobras de estacionamiento, vehículos pesados y giros protegidos afectan de gran manera a la tasa de flujo de saturación.

La mayor variación se presenta en las demoras, este factor es susceptible a variaciones de las mediciones, puesto que existen grandes factores que afectan este valor. En la presente investigación se observó que muchos de los factores humanos, como ser la educación vial producen alteraciones en el cálculo manual, esto deriva en variaciones en las mediciones manuales.

Con esto se llega a cumplir el objetivo principal del presente trabajo y se tiene un grado de exactitud en las mediciones de las intersecciones estudiadas presentando así que el software Synchro refleja de una manera significativa el comportamiento del tráfico real, por lo que su utilización para proyectos que requieran predecir el

comportamiento de un flujo vehicular en una intersección semaforizada, puede darse como factible y confiable.

4.10 VARIACIONES OBSERVADAS EN CAMPO

4.10.1 ANALISIS DE COLAS

Uno de los elementos sensibles a variaciones por el factor humano, es el comportamiento de la cola de espera. Todo debido principalmente a las llegadas aleatorias a la intersección en el comportamiento real, que se diferencia con las llegadas uniformes realizadas por el simulador. Se llevó a cabo un análisis estadístico, con la prueba de bondad de ajuste chi cuadrado, para así tener de manera objetiva el ajuste o no del comportamiento de colas real con el simulado, dando los siguientes resultados:

Tabla 44. Resumen de la prueba de bondad de ajuste
Av. Potosí y Junín

Tabla 44 Prueba de bondad de ajuste Potosi y junin

Sección			Fecha de aforo:
O – E	E – O	S – N	
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	03/05/2016
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	05/05/2016
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	10/05/2016
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	12/05/2016
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	17/05/2016
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	19/05/2016

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Resumen de la prueba de bondad de ajuste
Av. La Paz y Belgrano

Tabla 45 Prueba de bondad de ajuste La Paz y Belgrano

Sección				Fecha de aforo:
O - E	E - O	N - S	S - N	
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	04/05/2016
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	No se ajusta	06/05/2016
Se ajusta	No se ajusta	No se ajusta	Se ajusta	09/05/2016
No se ajusta	Se ajusta	No se ajusta	No se ajusta	11/05/2016
No se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	16/05/2016
Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	Se ajusta	18/05/2016

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Resumen de la prueba de bondad de ajuste
15 de Abril y Gral Trigo

Tabla 46 Prueba de bondad de ajuste 15 de Abril y Gral Trigo

Sección		Fecha de aforo:
O - E	N - S	
Se ajusta	Se ajusta	04/05/2016
Se ajusta	Se ajusta	06/05/2016
No se ajusta	No se ajusta	09/05/2016
No se ajusta	Se ajusta	11/05/2016
No se ajusta	No se ajusta	16/05/2016
Se ajusta	No se ajusta	18/05/2016

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47. Resumen de la prueba de bondad de ajuste
Ingavi y Gral Trigo

Tabla 47 Resumen de la prueba de bondad de ajuste Ingavi y Gral trigo

Sección		Fecha de aforo:
O - E	N - S	
Se ajusta	Se ajusta	03/05/2016
Se ajusta	No se ajusta	05/05/2016
No se ajusta	Se ajusta	10/05/2016

Se ajusta	Se ajusta	12/05/2016
No se ajusta	No se ajusta	16/05/2016
No se ajusta	Se ajusta	18/05/2016

Fuente: Elaboración propia

La prueba de bondad de ajuste chi cuadrado parte la el planteo de dos hipótesis, la positiva; “se ajusta” esto quiere decir que los valores observados y los esperados se ajustan para un grado de exactitud requerido, la hipótesis negativa; “no se ajusta” se refiere a que los datos observados tienen mucha discrepancia con los observados.

Para el presente proyecto se realizó la prueba para un ajuste del 90% y los resultados de las colas observadas con las del simulador, se encuentran plasmados en las tablas 44, 45, 46 y 47 para cada intersección con sus respectivos accesos.

En resumen se realizó 66 pruebas de bondad de ajuste, dando lugar a 16 negativos y 50 hipótesis positivas, representando el 75% de ajuste en el comportamiento de colas en las intersecciones de estudio.

En síntesis el 75% de los accesos estudiados mediante simulación se ajustan en un 90% al comportamiento real observado, en cuanto a colas se refiere, cabe recalcar que la principal variante es la aleatoriedad del comportamiento del tráfico real comparado con las llegadas uniformes que presenta el simulador.

4.10.2 ESTACIONAMIENTOS

Otra variable que es subjetiva, puesto que depende del comportamiento humano, habilidad de manejo y condiciones para el parqueo, son las maniobras de estacionamiento. El simulador asume un tiempo único para los estacionamientos indicados por defecto de 20 segundos, por lo que se encontró necesario realizar, aparte del conteo de maniobras, una medición del tiempo que toma cada una de ellas, observadas en campo, para luego sacar la media y la desviación, teniendo así un parámetro estadístico del tiempo real que toma estacionar en los accesos de estudio.

Se toma como observación que en horas pico, el lugar disponible para estacionar es escaso, puesto que se encuentran ocupados, se realizó la medición solo en horas pico de análisis, dando como resultado la siguiente tabla.

Tabla 48. Resumen de demoras de estacionamiento

Tabla 48 Resumen demoras de estacionamiento

Tabla resumen final

Interseccion	Demora por Acceso (s)				
	N -S	S - N	E - O	O - E	
Potosi y Junin		19.5	19.7	20.1	Media
		1.99	4.74	1.21	Desviacion
Belgrano y La Paz	22.3	22	22.1	19.5	Media
	3.05	3.08	2.48	2.08	Desviacion
Ingavi y Gral Trigo	16.9		21.4		Media
	5.81		5.01		Desviacion
15 de Abril y Gral Trigo	22		22.5		Media
	3.78		3.45		Desviacion

Fuente: Elaboración propia

Media Ponderada	20.7	segundos
------------------------	-------------	-----------------

El valor medio medido en campo se aproxima mucho al valor usado por defecto por el simulador que es de 20 segundos, por lo que es representativo para el tiempo e intersecciones de estudio, esto se aplica a analisis de horas pico, teniendo como limitante el tiempo mucho menor que tomaría estacionar en un lugar amplio sin restricciones de espacio

4.11 ALTERNATIVAS DE SOLUCION

Las alternativas de solución se analizaran de manera directa con el programa, buscando soluciones a las intersecciones donde los cambios, físicos, restricciones y cambios en las fases de semáforos sean posibles y signifiquen un mejor servicio.

En este punto se analizaran con el software y la simulación dos intersecciones, aisladas con semaforización, la calle Junín con Av. Potosí y la Av. Belgrano con la calle La Paz.

El análisis se centra en estas dos intersecciones puesto que las pertenecientes al casco viejo de la ciudad se encuentran con limitaciones claras para hacer cambios de planeación, geométricos y diferencias de fases, esto último por que se encuentran en una red más grande de sistema de semaforización, por lo que proponer cambios de ciclo en los semáforos tendrá un impacto directo sobre las intersecciones inmediatas cercanas a la misma

4.11.1 Avenida Potosí y Calle Junín

Esta intersección cuenta con tres accesos, al realizar el análisis de la misma, se pudo obtener que el nivel de servicio trabaje arriba del máximo en la tabla, es decir es el peor F, puesto que se analizó las alternativas para mejorar su desempeño.

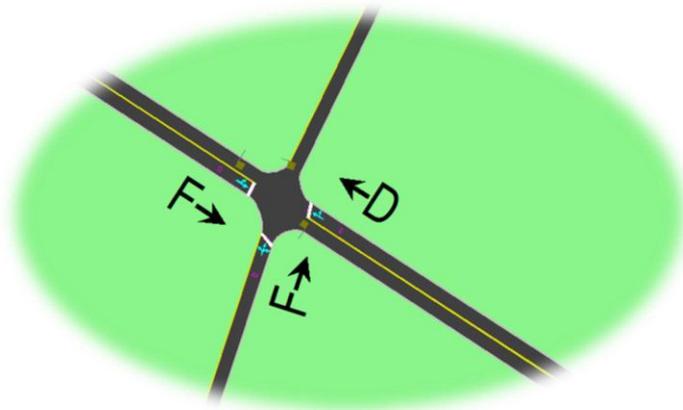
4.11.1.1 Alternativa de solución

Mediante la visión de la intersección se pudo notar que la calle Junín y la av. potosí en todos sus accesos presentan el uso de solo un carril para la entrada a la intersección, puesto que existe autos estacionados ocupando el otro carril, esto aumenta de manera dramática la demora para ingresar al cruce, siendo el nivel de servicio de la intersección F, en horas pico.

Usando el simulador, sin variar los volúmenes horarios aforados, se pudo obtener un comportamiento mucho más efectivo y continuo en el tráfico que ingresa, haciendo uso de los carriles usados para estacionamiento, como se puede apreciar en la figura 28 y 29 una comparación de los niveles de servicio y comportamiento del tráfico usando ambos carriles en los accesos nombrados anteriormente.

Esta solución comprende prohibir el estacionamiento en el acceso S y E de la intersección, esto no afectaría de gran manera a la demanda de estacionamientos, por ser calles de poca longitud, esto, sin variar las fases de semáforos produce mejoras en el nivel de servicio de la intersección.

Figura 37. Nivel de servicio actual de accesos en la intersección Av. Potos y Junín



Fuente: Synchro 8

En la figura 29 muestra el nivel de servicio actual en la intersección mostrando que dos de los tres accesos tienen un nivel de servicio F, sin modificar las fases ni tiempos de semáforos.

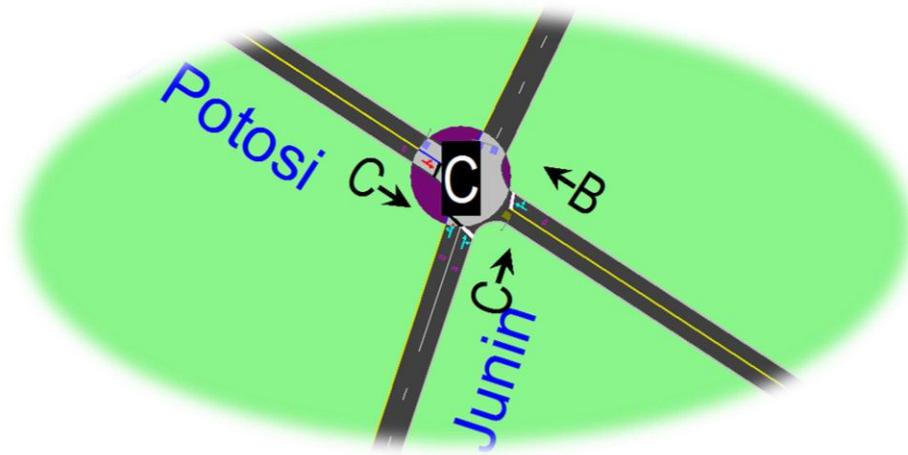
Aumentado el carril usado para estacionamiento en el acceso S de la calle Junín, incrementamos la movilidad disminuyendo la demora para ingresar, la prohibición de estacionamiento se aplicaría solo a ese acceso, puesto que los otros dos accesos pertenecientes a la Av. Potosí son de una longitud considerable y dan parqueo a una gran cantidad de vehículos, prohibir el estacionamiento ahí, provocaría un problema con la demanda de parqueos en la zona.

A su vez la intersección no está ligada a una gran red de semáforos coordinados, siendo el más cercano el de la calle Santa Cruz, por ese motivo se propone un cambio en la fase de la semaforización, aumentando el tiempo de ciclo de 45 seg. a 60 seg.

Este aumento del tiempo de ciclo, se basa en el uso de la función optimización de los semáforos que brinda el software Synchro, que hace un análisis de las colas presentes para determinar el tiempo de ciclo óptimo que brinde un mejor servicio.

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada en el software, cabe recalcar que los volúmenes no son modificados.

Figura 38. Nivel de servicio aplicando mejoras propuestas



Fuente: Synchro 8

En la figura 39 se puede evidenciar el cambio del nivel de servicio en la intersección, cambiando en la calle Junín, pasando de ser “F” a pasar a ser “C”, obsérvese el uso de dos carriles en el acceso de la Junín.

Figura 39. Demoras calculadas con el programa Synchro

TIMING SETTINGS														
	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR	PED	HOLD
Minimum Initial (s)	4.0	4.0	—	—	4.0	—	4.0	4.0	—	—	—	—	—	—
Minimum Split (s)	20.0	20.0	—	—	20.0	—	20.0	20.0	—	—	—	—	—	—
Total Split (s)	40.0	40.0	—	—	40.0	—	20.0	20.0	—	—	—	—	—	—
Yellow Time (s)	3.5	3.5	—	—	3.5	—	3.5	3.5	—	—	—	—	—	—
All-Red Time (s)	0.5	0.5	—	—	0.5	—	0.5	0.5	—	—	—	—	—	—
Lost Time Adjust (s)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—	—	—	—
Lagging Phase?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Allow Lead/Lag Optimize?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Recall Mode	Max	Max	—	—	Max	—	Max	Max	—	—	—	—	—	—
Actuated Effct. Green (s)	—	36.0	—	—	36.0	—	—	16.0	—	—	—	—	—	—
Actuated g/C Ratio	—	0.60	—	—	0.60	—	—	0.27	—	—	—	—	—	—
Volume to Capacity Ratio	—	0.87	—	—	0.76	—	—	0.83	—	—	—	—	—	—
Control Delay (s)	—	24.2	—	—	14.4	—	—	28.8	—	—	—	—	—	—
Queue Delay (s)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—	—	—	—
Total Delay (s)	—	24.2	—	—	14.4	—	—	28.8	—	—	—	—	—	—
Level of Service	—	C	—	—	B	—	—	C	—	—	—	—	—	—
Approach Delay (s)	—	24.2	—	—	14.4	—	—	28.8	—	—	—	—	—	—
Approach LOS	—	C	—	—	B	—	—	C	—	—	—	—	—	—
Queue Length 50th (m)	—	59.5	—	—	60.3	—	—	41.4	—	—	—	—	—	—
Queue Length 95th (m)	—	#133.6	—	—	105.4	—	—	#69.8	—	—	—	—	—	—
Stops (vph)	—	480	—	—	528	—	—	582	—	—	—	—	—	—
Fuel Used (l/hr)	—	30	—	—	28	—	—	34	—	—	—	—	—	—
Dilemma Vehicles (#/hr)	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	—	—	—	—

Fuente: Synchro 8

Las dos primeras columnas son los resultados de los accesos de la avenida potosí, la tercera columna viene a representar los resultados para el acceso de la calle Junín.

Ahí muestra en la fila de demoras totales (Total delays) demoras promedio de 24.2 s para el acceso Oeste de la avenida Potosí, 14.4 seg para el acceso Este y finalmente 28.8 seg para el acceso Sur correspondiente a la calle Junín.

De esta manera se puede evidenciar que existe una mejora significativa con respecto al anterior NS calculado sin las mejoras propuestas.

Figura 40. Demoras calculadas sin mejoras propuestas

TIMING SETTINGS														
Minimum Initial (s)	4.0	4.0	—	—	4.0	—	4.0	4.0	—	—	—	—	—	—
Minimum Split (s)	20.0	20.0	—	—	20.0	—	20.0	20.0	—	—	—	—	—	—
Total Split (s)	24.0	24.0	—	—	24.0	—	21.0	21.0	—	—	—	—	—	—
Yellow Time (s)	3.5	3.5	—	—	3.5	—	3.5	3.5	—	—	—	—	—	—
All-Red Time (s)	0.5	0.5	—	—	0.5	—	0.5	0.5	—	—	—	—	—	—
Lost Time Adjust (s)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—	—	—	—
Lagging Phase?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Allow Lead/Lag Optimize?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Recall Mode	Max	Max	—	—	Max	—	Max	Max	—	—	—	—	—	—
Actuated Effct. Green (s)	—	20.0	—	—	20.0	—	—	17.0	—	—	—	—	—	—
Actuated g/C Ratio	—	0.44	—	—	0.44	—	—	0.38	—	—	—	—	—	—
Volume to Capacity Ratio	—	1.17	—	—	1.02	—	—	1.12	—	—	—	—	—	—
Control Delay (s)	—	128.5	—	—	53.4	—	—	91.8	—	—	—	—	—	—
Queue Delay (s)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—	—	—	—
Total Delay (s)	—	128.5	—	—	53.4	—	—	91.8	—	—	—	—	—	—
Level of Service	—	F	—	—	D	—	—	F	—	—	—	—	—	—
Approach Delay (s)	—	128.5	—	—	53.4	—	—	91.8	—	—	—	—	—	—
Approach LOS	—	F	—	—	D	—	—	F	—	—	—	—	—	—
Queue Length 50th (m)	—	~35.1	—	—	~66.8	—	—	~77.7	—	—	—	—	—	—
Queue Length 95th (m)	—	#73.2	—	—	#134.6	—	—	#133.5	—	—	—	—	—	—
Stops (vph)	—	225	—	—	588	—	—	543	—	—	—	—	—	—
Fuel Used (l/hr)	—	39	—	—	53	—	—	68	—	—	—	—	—	—
Dilemma Vehicles (#/hr)	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	—	—	—	—

Fuente: Synchro 8

En la figura 30 observamos las demoras previas a los cambios, se muestra de manera clara el cambio significativo en los tiempos de espera, principalmente en el acceso Oeste de la av Potosí, pasando de ser un nivel de servicio “F” a un nivel de servicio “C” sin hacer modificaciones a la geometría de la carretera ni prohibiciones que puedan causar conflictos con la población.

El acceso Sur es otro acceso con un gran cambio en su nivel de servicio, cambiando de una demora de 91.8 seg a una demora de 28 seg, este acceso es el que presenta más modificaciones, combinando la restricción de estacionamiento y el cambio de fase.

Por lo tanto la propuesta para descongestionar en la intersección Av. Potosí y Junín, es un cambio en la fase de semáforos, de 45 seg a 60 seg, también la prohibición de los estacionamientos en el segmento de la calle Junín inmediatamente próximo a la intersección de estudio.

4.11.2 Avenida Belgrano y Calle La Paz.

Como se muestra en la figura 31, el carril más desfavorable de la intersección es el acceso norte de la calle La Paz, con un nivel de servicio F, produciéndose largas colas que superan los 100m, esto principalmente en días que se realiza la feria, con esperas que superan los 300 segundos.

Esta intersección presenta mayores dificultades que la anterior, puesto que la demanda de lugares de parqueo es alta, el único acceso que usa dos carriles para ingresar a la intersección es el de la calle Belgrano en su acceso Oeste pero de igual forma el nivel de servicio prestado en este acceso es “F”.

Observando se puede llegar a proponer una prohibición de estacionamiento en la Calle La Paz, actualmente se usa ambos lados de la calle para parqueo, perjudicando el flujo vehicular, las medidas utilizadas en el casco viejo de la ciudad reduciendo a un solo carril las calles, para evitar y reducir el congestionamiento, logro una reducción del congestionamiento según el Ing. Horacio Calizaya trabajador de la sección de Tránsito y Transporte dependiente de la HAM, por lo tanto la restricción es una opción viable, siendo la única manera de subir el nivel de servicio, la modificación del tiempo de ciclo, no brinda mejoras significativas, manteniendo el nivel de servicio “F”.

En la siguiente figura se muestra las demoras actuales calculadas por Synchro, sin realizar modificación alguna.

Figura 41. Demoras calculadas sin mejoras propuestas

TIMING SETTINGS	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR	PED	HOLD
Minimum Initial (s)	4.0	4.0	—	4.0	4.0	—	—	4.0	—	4.0	4.0	—	—	—
Minimum Split (s)	20.0	20.0	—	20.0	20.0	—	—	20.0	—	20.0	20.0	—	—	—
Total Split (s)	20.0	20.0	—	20.0	20.0	—	—	25.0	—	25.0	25.0	—	—	—
Yellow Time (s)	3.5	3.5	—	3.5	3.5	—	—	3.5	—	3.5	3.5	—	—	—
All-Red Time (s)	0.5	0.5	—	0.5	0.5	—	—	0.5	—	0.5	0.5	—	—	—
Lost Time Adjust (s)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—
Lagging Phase?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Allow Lead/Lag Optimize?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Recall Mode	Max	Max	—	Max	Max	—	—	Max	—	Max	Max	—	—	—
Actuated Effct. Green (s)	—	16.0	—	—	16.0	—	—	21.0	—	—	21.0	—	—	—
Actuated g/C Ratio	—	0.36	—	—	0.36	—	—	0.47	—	—	0.47	—	—	—
Volume to Capacity Ratio	—	1.75d	—	—	1.14	—	—	0.77	—	—	1.92	—	—	—
Control Delay (s)	—	249.3	—	—	104.9	—	—	20.1	—	—	439.8	—	—	—
Queue Delay (s)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—
Total Delay (s)	—	249.3	—	—	104.9	—	—	20.1	—	—	439.8	—	—	—
Level of Service	—	F	—	—	F	—	—	C	—	—	F	—	—	—
Approach Delay (s)	—	249.3	—	—	104.9	—	—	20.1	—	—	439.8	—	—	—
Approach LOS	—	F	—	—	F	—	—	C	—	—	F	—	—	—
Queue Length 50th (m)	—	~66.0	—	—	~22.3	—	—	25.9	—	—	~105.8	—	—	—
Queue Length 95th (m)	—	#98.3	—	—	#53.9	—	—	#72.8	—	—	#131.7	—	—	—
Stops (vph)	—	767	—	—	74	—	—	296	—	—	643	—	—	—
Fuel Used (l/hr)	—	212	—	—	39	—	—	19	—	—	265	—	—	—
Dilemma Vehicles (#/hr)	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	—

Fuente: Synchro 8

Se observa retrasos de hasta 439 seg en el acceso Norte de la calle La Paz, el único acceso con un buen nivel de servicio es el Este de la av Belgrano, con demoras de 20 segundos.

Aplicando las restricciones de estacionamiento al lado derecho del acceso Norte y Sur de la calle La Paz y modificando la fase semafórica a 65 seg. se presenta las siguiente figura.

Figura 42. Demoras calculadas con mejoras propuestas

TIMING SETTINGS	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR	PED	HOLD
Minimum Initial (s)	4.0	4.0	—	4.0	4.0	—	—	4.0	—	4.0	4.0	—	—	—
Minimum Split (s)	20.0	20.0	—	20.0	20.0	—	—	20.0	—	20.0	20.0	—	—	—
Total Split (s)	37.0	37.0	—	37.0	37.0	—	—	28.0	—	28.0	28.0	—	—	—
Yellow Time (s)	3.5	3.5	—	3.5	3.5	—	—	3.5	—	3.5	3.5	—	—	—
All-Red Time (s)	0.5	0.5	—	0.5	0.5	—	—	0.5	—	0.5	0.5	—	—	—
Lost Time Adjust (s)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—
Lagging Phase?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Allow Lead/Lag Optimize?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Recall Mode	Max	Max	—	Max	Max	—	—	Max	—	Max	Max	—	—	—
Actuated Effct. Green (s)	—	33.0	—	—	33.0	—	—	24.0	—	—	24.0	—	—	—
Actuated g/C Ratio	—	0.51	—	—	0.51	—	—	0.37	—	—	0.37	—	—	—
Volume to Capacity Ratio	—	1.21d	—	—	0.86	—	—	0.44	—	—	1.04	—	—	—
Control Delay (s)	—	64.0	—	—	25.1	—	—	13.6	—	—	68.0	—	—	—
Queue Delay (s)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—
Total Delay (s)	—	64.0	—	—	25.1	—	—	13.6	—	—	68.0	—	—	—
Level of Service	—	E	—	—	E	—	—	B	—	—	E	—	—	—
Approach Delay (s)	—	64.0	—	—	25.1	—	—	13.6	—	—	68.0	—	—	—
Approach LOS	—	E	—	—	E	—	—	B	—	—	E	—	—	—
Queue Length 50th (m)	—	76.3	—	—	6.6	—	—	18.1	—	—	98.2	—	—	—
Queue Length 95th (m)	—	#113.2	—	—	#74.7	—	—	30.2	—	—	#91.1	—	—	—
Stops (vph)	—	740	—	—	110	—	—	252	—	—	592	—	—	—
Fuel Used (l/hr)	—	77	—	—	16	—	—	16	—	—	57	—	—	—
Dilemma Vehicles (#/hr)	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	—

Fuente: Synchro 8

En la figura 42 se muestra el incremento en el nivel de servicio en los accesos, la primeras columnas representan a los accesos de la La Paz Norte y Sur respectivamente y las otras dos, a los accesos Este y Oeste de la av Belgrano, se muestra un nivel de servicio D para la intersección, con un tiempo de fase de semáforo de 65 segundos.

Por lo tanto las prohibiciones mencionadas, más el cambio de fase de 45 a 65 segundos, brindan un resultado positivo en el funcionamiento de la intersección por lo que se recomienda

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación brinda indicios de que el software Synchro 8 en comparación con el método manual HCM 2000 se muestra como una importante herramienta para el análisis de intersecciones semaforizadas simples, quedando el demostrado que pese a las variables humanas se puede tomar como muy cercano a la realidad, por lo tanto el uso de esta herramienta toma importancia en los proyectos de tráfico.

La principal deficiencia del simulador se debe a la falta de educación vial.

La implementación de la metodología de campo, utilizando cámara de video es una manera eficiente de determinar las demoras reales. Sin embargo, tiene sus limitantes cuando las colas de vehículos son demasiado largas, como fue el caso de las intersecciones estudiadas donde las colas de vehículos llegaban a tener más de 200 m.

El uso de carriles como estacionamiento produce una baja significativa del nivel de servicio en una intersección como fue comprobado en la Av. Potosí y Junín. La restricción de esos estacionamientos darían como resultado directo un flujo de tráfico más fluido y con menor longitud de colas, esta alternativa se puede aplicar en horas pico, donde el tráfico muestra un congestionamiento fuerte.

La avenida La Paz presenta una geometría y planeamiento inusual, puesto que en el acceso Este de la Belgrano no hay un flujo directo, el tráfico tiene que girar, esto se debe a que al otro lado de la intersección el flujo va en dirección contraria, esto reduce la capacidad de ese carril. Se logró obtener una mejora ligera del nivel de servicio en el acceso Este optimizando el ciclo de semáforo

La comparación entre las intersecciones de la calle 15 de abril y Gral. Trigo, con el cruce de las calles Ingavi y Gral. trigo, produjo una visión clara de lo que el tráfico público mediano afecta al nivel de servicio y la simulación pierde exactitud por la

aleatoriedad del comportamiento de los usuarios del cruce, la poca educación vial hace prácticamente imposible realizar un modelo de simulación que represente la realidad de manera exacta

Mediante el uso de la simulación se pudo obtener una idea precisa de cómo se comportara el tráfico realizando diferentes medidas para el control urbano.

BIBLIOGRAFIA

Alcaldía Mayor de Bogotá, Cal y Mayor y Asociados (2005) *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte*, 2ª ed., Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Cabrera F. (2007) *Diapositivas del Curso de Ingeniería de Tráfico, Semestre 2007-2*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Currin T. (2001) *Introduction to Traffic Engineering: A Manual for Data Collection and Analysis*, CL-Engineering.

Daganzo C. F. (1983) *Derivation of Delays Based on Input-Output Analysis*, Transpn Res. 17A, 341-342.

Fernández R. (2008) *Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular*, Santiago de Chile: Universidad de los Andes.

Freeman W., Ho K. y McChesey E. (1999) *An Evaluation of Signalized Intersection System analysis Techniques*, E.I.T. Copyright ITE 1999 Annual Meeting CD. <http://www.trafficware.com/articles.html>.

Petraglia K. (1999) *Field Validation of MOE's for Signalized Intersection Analysis*, New England Section ITE Technical Committee, Copyright ITE 1999 Annual Meeting CD. <http://www.trafficware.com/articles.html>.

Powell J. L. (1998) *Field Measurement of Signalized Intersection Delay for 1997 Update of the Highway Capacity Manual*, Transportation Research Record 1646, 79- 86.

Radelat G. (2003) *Principia's de Ingeniería de Transit*, Washington D.C.: ITE-Institute of Transportation Engineers.

Trafficware (2006) *Synchro Studio 7 User Guide*, Texas: Trafficware Ltd.

TRB (2000) *Highway Capacity Manual 2000*, Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.

TRB (1992) *Traffic Flow Theory-A State of the Art Report*, update and expansion of the Special Report 165, Washington D.C.: Transportation Research Board, Federal Highway Administration.

Tung L., Kebab W., Abdel-Rahim A. y Dixon M.P. (2007) *Comparison of Automated and HCM Delay Measurement Techniques*, Presentation for the ITE district 6 Annual Meeting, Portland, Jul. 2007.

Contenido

CAPITULO I INTRODUCCION	6
1.1 INTRODUCCION.....	6
1.2 JUSTIFICACION	7
1.3 DISENO TEORICO	7
1.3.1 SITUACION PROBLEMICA.....	7
1.3.2 PROBLEMA	8
1.3.3 OBJETIVOS.....	8
1.3.4 HIPOTESIS.....	9
1.3.5 VARIABLES.....	9
1.4 DISENO METODOLOGICO	10
1.4.1 POBLACION	10
1.4.2 MUESTRA	10
1.4.3 METODOS.....	10
1.4.4 MEDIOS	12
1.5 ALCANCE DE LA INVESTIGACION	13
CAPITULO II REVISION TEORICA.....	14
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	14
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO VEHICULAR	15
2.2.1 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS.....	15
2.2.2 PARÁMETROS MICROSCÓPICOS	16
2.3 MODELACIÓN DEL TRÁFICO	17
2.4 FLUJO DISCONTINUO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS	18
2.4.1 Headways de entrada.....	18
2.4.2 Tasa de flujo de saturación y tiempo perdido.....	20
2.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS.....	21
2.5.1 Tipos de semaforización	23
2.6 TEORÍA DE COLAS	23
2.7 CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO.....	27
2.7.1 Capacidad en intersecciones semaforizadas	27

2.7.2	Nivel de servicio en intersecciones semaforizadas	27
CAPITULO III	METODOLOGIAS DE LA INVESTIGACION	29
3.1	METODOLOGÍA DEL MANUAL DE CAPACIDAD DE CARRETERAS HCM 2000.....	29
3.1.1	DATOS DE ENTRADA	30
3.1.2	AJUSTE DE LA DEMANDA	31
3.1.3	AJUSTE DE LA OFERTA	33
3.1.4	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD Y LA RELACIÓN V/C	38
3.1.5	MEDIDAS DE EFICIENCIA	39
3.2	CARACTERÍSTICAS DE SYNCHRO 8	48
3.2.1	Ajuste de la Demanda.....	48
3.2.2	Ajuste de la Oferta.....	48
3.2.3	Determinación de la Capacidad	48
3.2.4	Determinación de las Medidas de eficiencia	49
CAPITULO IV	APLICACIÓN PRÁCTICA DE LAS METODOLOGIAS	54
4.1	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	54
4.2	SELECCIÓN DE LAS ZONAS DE ANÁLISIS	54
4.2.1	Intersección Av. La Paz y Av. Belgrano.....	55
4.2.2	Intersección Av. Potosí y Calle Junín.....	55
4.2.3	Intersección Calle Gral. Trigo y Calle 15 de Abril.....	56
4.2.4	Intersección Calle Gral. Trigo y Calle Ingavi.	57
4.3	DETERMINACION DE HORAS PICO.....	58
4.4	MEDICIÓN DE FASES DE LOS SEMÁFOROS.....	61
4.5	AFOROS DE TRÁFICO	62
4.5.1	Clasificación.....	62
4.1.2	CONTEOS DE VEHÍCULOS.	63
4.1.3.	DEPURACION DE DATOS DE VOLUMEN DE TRÁFICO	70
Fuente Synchro 8.....		82
4.10	VARIACIONES OBSERVADAS EN CAMPO	93
4.10.1	ANALISIS DE COLAS.....	93
4.10.2	ESTACIONAMIENTOS.....	95

4.11 ALTERNATIVAS DE SOLUCION	97
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFIA.....	106

ANEXOS:

ANEXO I PLANILLAS DE AFOROS MANUALES

ANEXO II PLANILLAS DE CALCULO HCM 2000 METODO MANUAL

ANEXO III VENTANAS DE RESULTADOS EXTRAIDAS DE SYNCHRO

ANEXO IV PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE PARA COLAS

ANEXO V MEDICION DE ESTACIONAMIENTOS

ANEXO VI FOTOGRAFIAS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variables fundamentales en intersecciones semaforizadas.....	22
Tabla 2. Nivel de servicio en intersecciones Semaforizadas	28
Tabla 3. Relacion entre el tipo de llegada y la relacion peloton	30
Tabla 4 Grupo de Carri;es tipicos	32
Tabla 5. Factores de ajuste	37
Tabla 6. Factor de ajuste por coordinacion	42
Tabla 7. Horas Pico.....	61
Tabla 8 Semaforizacion actual	61
Tabla 9 Semaforizacion actual	61
Tabla 10 Semaforizacion actual	62
Tabla 11 Semaforizacion actual	62
Tabla 12 Equivalencia de vehiculos.....	64
Tabla 13 Resumen de aforos	64
Tabla 14 Resumen de aforos	65
Tabla 15 Resumen de aforos	65
Tabla 16 Resumen de aforos	66
Tabla 17 Resumen de aforos	66
Tabla 18 Resumen de aforos	67
Tabla 19 Resumen de aforos	67
Tabla 20 Resumen de aforos	68
Tabla 21 Resumen de aforos	68
Tabla 22 Resumen de aforos	69
Tabla 23 Resumen de aforos	69
Tabla 24 Aforos finales.....	71
Tabla 25 Aforos finales.....	71
Tabla 26 Aforos finales.....	71
Tabla 27 Aforos finales.....	71
Tabla 28 Aforos finales.....	72
Tabla 29 Aforos finales.....	72
Tabla 30 Aforos finales.....	72
Tabla 31 Aforos finales.....	72
Tabla 32 Aforos finales.....	73
Tabla 35 Aforos finales.....	73
Tabla 36 Planilla de ajuste de la demanda	74
Tabla 37 Planilla de ajuste de oferta	74
Tabla 38 Planilla de estimacion Flt.....	75
Tabla 39 Tasa de flujo de saturacion.....	76

Tabla 40 Capacidad	77
Tabla 42 Analisis de capacidad	78
Tabla 43 Nivel de servicio.....	79
Tabla 44 Prueba de bondad de ajuste Potosi y junin.....	93
Tabla 45 Prueba de bondad de ajuste La Paz y Belgrano.....	94
Tabla 46 Prueba de bondad de ajuste 15 de Abril y Gral Trigo	94
Tabla 47 Resumen de la prueba de bondad de ajuste Ingavi y Gral trigo.....	94
Tabla 48 Resumen demoras de estacionamiento.....	96

ANEXOS