
CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DE INTERSECCIÓN A NIVEL A UTILIZAR A PARTIR DE LA CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

William Castro García

Programa de Investigación en Tránsito y Transporte (PIT)

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia

Carrera 30 No. 45-03, Bogotá, Colombia; Tel: (+571) 3165 328

E-mail: wcastrog@unal.edu.co

RESUMEN

Los puntos críticos para la circulación vehicular por las diferentes vías de la red vial son las intersecciones. En el caso de las zonas urbanas la mayoría de las mismas se manejan a nivel y se controlan principalmente por medio de señales de pare e intersecciones semaforizadas.

Ese carácter crítico de las intersecciones en la red, hace que sea importante contar con unos elementos de planeación de intersecciones, que permitan la toma de decisiones sobre el control, a partir de indicadores de operación de las mismas para diferentes rangos de demandas vehiculares calibrados a nuestro medio. Esto le puede permitir al planeador urbano contar con elementos para la toma de decisiones sobre la utilización de uno u otro tipo de intersecciones a nivel.

Los actuales requisitos que permiten justificar el momento en que el planeador debe cambiar un control con señal de pare a un control semaforizado están basados en los siguientes requisitos previos: volumen mínimo de vehículos, interrupción del tránsito continuo, volumen mínimo de peatones, movimiento o circulación progresiva, antecedentes, experiencias sobre accidentes y combinación de las condiciones anteriores.

ABSTRACT

The critical points for vehicular traffic by different routes of the road network are the intersections. In the case of urban areas most of them managed to level and are mainly controlled by stop signs and signal intersections.

This critical character of the intersections in the network, makes it important to have some elements of planning of intersections, to making decisions about control, as indicators of operating the same for different ranges of vehicle applications to calibrated our environment. This may allow the city planner with elements for making decisions on the use of one type or another at intersections.

The current requirements that justify the time the glider has to change with a control signal to stop a signal control are based on the following prerequisites: minimum volume of vehicles, interruption of continuous traffic, volume of pedestrian movement or movement progressive background, experience on the combination of injuries and conditions.

1. INTRODUCCIÓN

Las acciones sobre las vías, vehículos y la forma de operarlos, son medidas en el ámbito de la denominada oferta de transporte. Bien diseñadas y ejecutadas, representan un gran potencial de ahorro de recursos sociales, pues cada vez que apunten directamente a reducir situaciones de congestión, evitan cuantiosos costos que pesan sobre la comunidad en materia de tiempo, combustible, accidentes y contaminación.

Los puntos críticos para la circulación vehicular por las diferentes vías de la red vial son las intersecciones. En el caso de las zonas urbanas la mayoría de las mismas se manejan a nivel y se controlan principalmente por medio de señales de pare e intersecciones semaforizadas, generando un flujo discontinuo por las paradas que se presentan en las mismas.

Ese carácter crítico de las intersecciones en la red, hace que sea importante contar con unos elementos de planeación de intersecciones, que permitan la toma de decisiones sobre el control y otras intervenciones en la intersección, a partir de indicadores de operación de las mismas para diferentes rangos de demandas vehiculares calibrados a nuestro medio. Esto le puede permitir al planeador urbano contar con elementos para la toma de decisiones sobre la utilización de uno u otro tipo de intersecciones a nivel.

• **Justificación**

En la actualidad la implementación de controles semaforizados en intersecciones a nivel requieren estudios de Ingeniería de Tránsito que permiten justificar la inversión de acuerdo con los requisitos técnicos establecidos o definidos para semaforizar una intersección.

Para el caso de intersecciones aisladas los diferentes controles buscan ordenar las corrientes de tráfico vehicular, generando la alternancia al paso, conducirlas con el máximo de seguridad y el mínimo tiempo de demora.

Los actuales requisitos que permiten justificar el momento en que el planeador debe cambiar un control con señal de pare a un control semaforizado están basados en los siguientes requisitos previos¹:

- Volumen mínimo de vehículos
- Interrupción del tránsito continuo
- Volumen mínimo de peatones
- Movimiento o circulación progresiva
- Antecedentes y experiencias sobre accidentes
- Combinación de las condiciones anteriores

Lamentablemente estos requisitos son tomados de manuales internacionales, los cuales no tienen en cuenta las reales condiciones de operación de los conductores colombianos a los diferentes dispositivos de control, es por esto, que surge la necesidad de calibrar la operación de las intersecciones controladas por señales de pare para determinar en que momento las mismas han cumplido su vida útil llegando a su capacidad potencial y debe implementarse otro tipo de control, como son las intersecciones semaforizadas.

¹ MINISTERIO DE TRANSPORTE. Manual de Señalización. Dispositivos para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia del Ministerio de Transporte. Bogotá. 2004.

- **Objetivos**

Se pretende entonces con esta investigación, determinar a partir de diferentes volúmenes vehiculares en intersecciones de vías principales y secundarias con características geométricas uniformes e ideales, los indicadores de operación mediante el control de una señal de pare en comparación con un control semaforizado.

Para el cumplimiento de esta meta, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Calibrar a nuestro medio los parámetros que permiten describir la operación de una intersección controlada por medio de una señal de pare.
- Modelar diferentes combinaciones de volúmenes vehiculares que se podrían presentar en una intersección de vías principal y secundaria, para determinar el valor de volúmenes recomendables que permitan tomar la decisión de cambiar a un control semaforizado.
- Comparar los anteriores resultados con los presentados en el Manual de Señalización del Ministerio de Transporte, en los criterios de volumen mínimo de vehículos e interrupción del tránsito continuo.

Modelar diferentes combinaciones de volúmenes vehiculares que se podrían presentar en una intersección manejada por un control semaforizado.

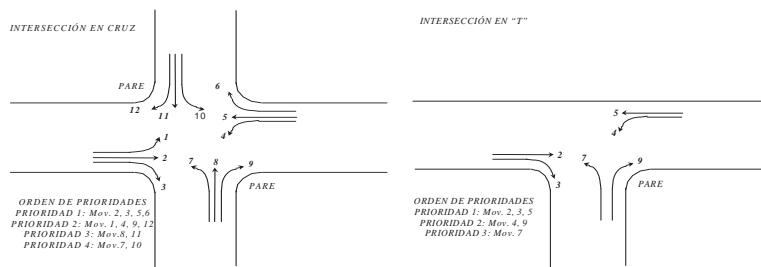
2. CARACTERÍSTICAS DE LAS INTERSECCIONES DE PRIORIDAD

Las intersecciones de prioridad forman la vasta mayoría de las intersecciones a nivel en cualquier sistema de vías. Las intersecciones de prioridad son empleadas para asignar el derecho de paso en una vía y son controladas mediante la señal reglamentaria de pare (SR-01) colocada en el acceso secundario. La señal de pare se emplea para notificar al conductor de la vía secundaria que debe detener completamente el vehículo y sólo reanudar la marcha cuando pueda hacerlo en condiciones que eviten totalmente la posibilidad de accidente.

La condición de pare obliga a los conductores de la vía controlada a seleccionar espacios entre vehículos del flujo de la vía principal para hacer las maniobras de cruce o giro. La capacidad de una intersección de prioridad esta controlada por:

- Distribución de espacios entre vehículos en la corriente de tránsito de la vía principal.
- Discernimiento del conductor para seleccionar espacios entre vehículos para ejecutar la maniobra deseada.
- Intervalo de entrada para cada vehículo de la cola.

La operación de una intersección de prioridad está basada en un régimen priorizado de uso de espacios entre vehículos empleados en el siguiente orden de prioridad: (1) giros derechos de la vía secundaria, (2) giros izquierdos de la vía principal, (3) movimientos directos de la vía secundaria y (4) giros izquierdos de la vía secundaria. En la Figura 1 se presenta de forma esquemática cada uno de los movimientos de dos tipos de geometrías de intersecciones de prioridad: intersección en cruz e intersección en “T”.



Fuente: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual HCM. Washington D.C. 2000.

Figura 1. Representación Esquemática de los Movimientos en una Intersección Regulada con Señales de “Pare”

2.1. Determinación de la Capacidad Potencial

La capacidad para intersecciones controladas por señales de pare es el máximo número de vehículos que de manera razonable se pueda esperar pasen por un punto de la vía. La capacidad potencial en vehículos por hora se determina utilizando la ecuación presentada en el Manual de Capacidad HCM:

$$C_{p,x} = \frac{3600}{t_f} e^{-\left[\sum_y V_{c,y} t_0 \right] \frac{3600}{3600}} \quad (1)$$

$$t_0 = t_g - (t_f / 2) \quad (2)$$

Donde:

$C_{p,x}$: capacidad potencial del movimiento secundario “x” (veh livianos/hora)

$V_{c,y}$: volumen del tránsito en conflicto “y” (veh/hora)

t_g : brecha crítica, en segundos.

t_f : tiempo de seguimiento o lapso de tiempo entre la salida de un vehículo de la calle secundaria y la salida del siguiente bajo la condición de cola, en segundos.

El tiempo de brecha crítica (t_g) se define como el tiempo medio transcurrido en segundos entre dos vehículos sucesivos en la corriente del tránsito de la vía principal, aceptado por los conductores en el movimiento en estudio que deben cruzar o convergen con la vía principal. Un conductor cualquiera debería rechazar cualquier brecha menor que la brecha crítica y aceptar cualquier brecha mayor o igual a la brecha crítica.

Tabla 1. Valores Típicos de Brechas Críticas Base para Intersección de Prioridad

MOVIMIENTO	HCM-1994	HCM-2000	MANUAL-1998	MANUAL-2005
Giro izquierdo desde la vía principal	5,0	4,1	3,1	n.d.
Giro derecho desde la vía secundaria	5,5	6,2	3,6	4,1
Tránsito directo en la vía secundaria	6,0	6,5	4,2	4,6
Giro izquierdo desde la vía secundaria	6,5	7,1	4,2	n.d.

Nota: n.d.= No disponible

Fuente: Manual de Capacidad HCM-1994 y 2000, Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte-1998 y 2005.

El tiempo de seguimiento (tf) para un movimiento de la vía secundaria es el transcurrido entre la entrada de un vehículo a la intersección desde la vía secundaria y la entrada del siguiente vehículo, en condiciones de cola continua.

Tabla 2. Valores Típicos de Tiempos de Seguimiento para Intersección de Prioridad

MOVIMIENTO	HCM-1994	HCM-2000	MANUAL-1998	MANUAL-2005
Giro izquierdo desde la vía principal	2,1	2,2	2,2	n.d.
Giro derecho desde la vía secundaria	2,6	3,3	2,8	3,6
Tránsito directo en la vía secundaria	3,3	4,0	3,0	3,7
Giro izquierdo desde la vía secundaria	3,4	3,5	2,8	n.d.

Nota: n.d.= No disponible

Fuente: Manual de Capacidad HCM-1994 y 2000, Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte-1998 y 2005.

Al comparar los valores de las brechas críticas del Manual de Capacidad HCM 2000 y del Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte para Bogotá (1998) se observan reducciones en promedio del 33% en el mismo, mientras que en el tiempo de seguimiento las reducciones son tan sólo del 4% en promedio. El Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte plantea que estas reducciones son debido a que los conductores bogotanos no reducen en su totalidad la velocidad al llegar a la señal de pare, y por tanto los usuarios ganan tiempo en las maniobras.

3. ESTUDIOS DE CAMPO

Para garantizar en el estudio representatividad de las diferentes geometrías, inicialmente se revisan todas las geometrías de intersecciones. Para ello, este proyecto procedió a efectuar todas las combinaciones del número de accesos y sentidos viales para la vía principal y para la vía secundaria. El resultado de todas estas combinaciones presentan intersecciones en cruz que se codificarán con la letra “C” e intersecciones en T que utilizarán la letra “T”. En la Figura 2 se presentan esquemáticamente las diferentes geometrías tipo “C” a trabajar en esta investigación.

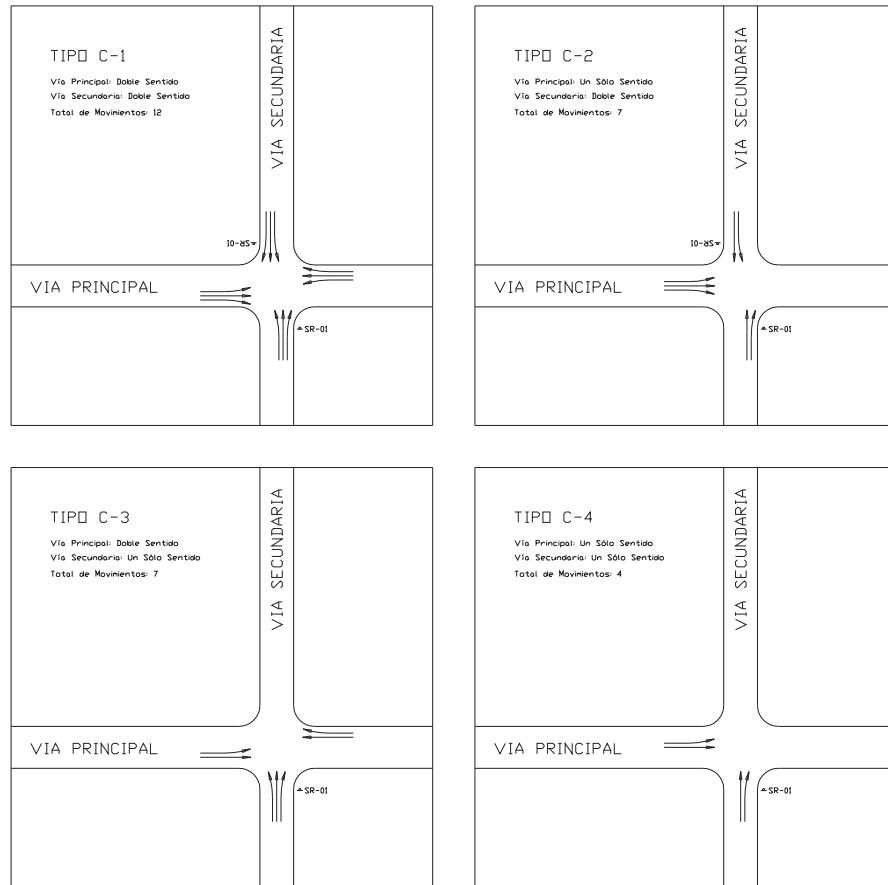


Figura 2. Geometrías de las Intersecciones Tipo Cruz

En las intersecciones seleccionadas como representativas se realizaron aforos vehiculares de 16 horas para identificar los períodos de mayor demanda, en estos períodos de dos horas se procedió a realizar las grabaciones de video que permitirán calibrar los parámetros de las mismas. A partir del análisis de los videos se procedió a determinar las brechas críticas y los tiempos de seguimiento para cada una de las cuatro maniobras secundarias de las intersecciones de prioridad. Estos datos se muestran en la Figura 3 y Tabla 3.

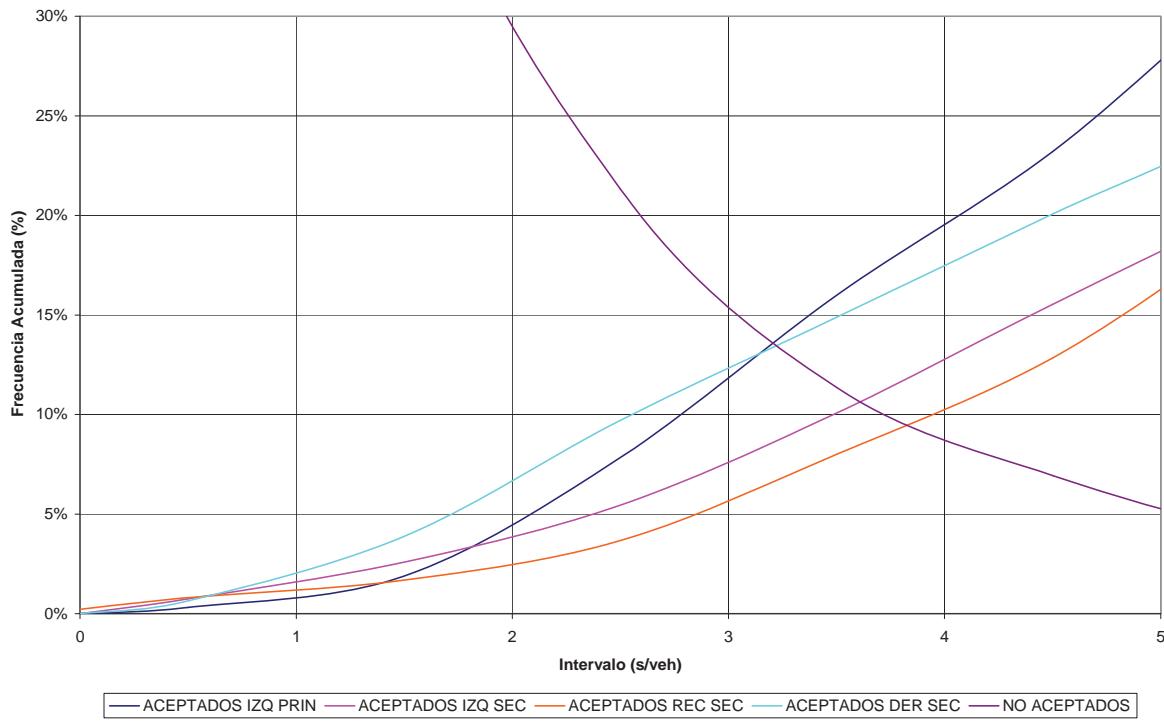


Figura 3. Calibración de Brechas Críticas

Tabla 3. Tablas Resumen Parámetros Calibrados

Maniobra	Brechas Críticas (s/veh)	Tiempos de Seguimiento (s/veh)
Izquierdo Principal	3,2	3,7
Derecho Secundaria	3,2	3,8
Directo Secundaria	3,8	3,2
Izquierdo Secundaria	3,6	2,7

Fuente: Elaboración propia

Al comparar los valores de las brechas críticas obtenidas en esta investigación con los valores del Manual de Capacidad HCM y del Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte para Bogotá (Tabla 1), se observan reducciones en promedio del 13%, mientras que en el tiempo de seguimiento se produce un aumento en promedio del 14% (Tabla 2).

4. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

La elaboración de los monogramas se inició realizando un modelo en HCS2000 para cada pareja de volúmenes (ver Figura 4), por cada intersección. Con esto se obtuvieron las demoras de cada acceso y con estas se determinó la demora ponderada de la intersección.

Los modelos se iniciaron a partir de la pareja de volúmenes (1,1) y se continuó con las siguientes parejas hasta llegar a una demora igual o superior a la correspondiente a un nivel de servicio F.

En el peor de los casos para llenar toda la grilla de información se requirió realizar hasta 64 modelos para la misma geometría y condición de operación.

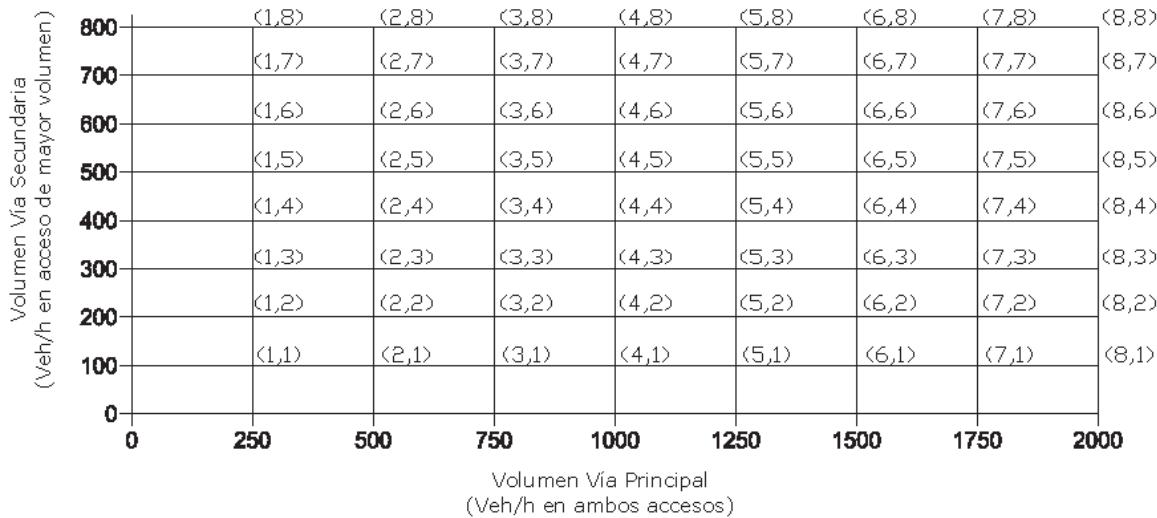


Figura 4. Parejas de Volúmenes Modelados

Conformada la grilla de demoras, estos datos fueron llevados al programa Surfer 8, el cual, por medio de interpolaciones une puntos con el mismo valor de demora, elaborando las líneas que definen los cambios en los niveles de servicio para cada tipo de operación: intersecciones de prioridad o intersecciones semaforizadas.

A modo de ejemplo se presentan para la geometría C-1P las Figuras 5 y 6 con los tiempos de demora y niveles de servicio obtenidos a partir de la modelación con los parámetros descritos anteriormente, para los parámetros del Manual HCM-2000 y para los parámetros calibrados en esta investigación.

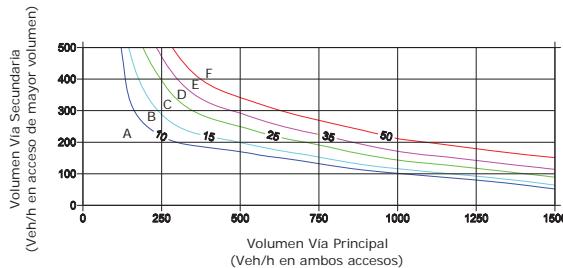


Figura 5. Tiempos de Demora (s/veh) y Niveles de Servicio Intersección C-1P Parámetros HCM 2000

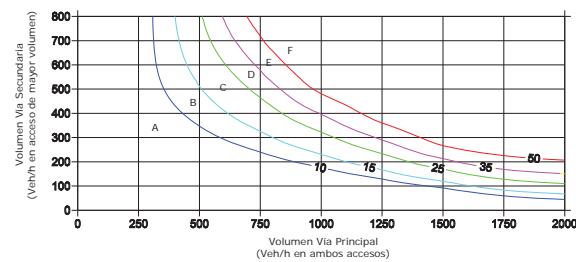


Figura 6. Tiempos de Demora (s/veh) y Niveles de Servicio Intersección C-1P Parámetros Calibrados en Investigación

En total se desarrollaron 10 monogramas para intersecciones de prioridad, las primeras cinco son utilizando los parámetros HCM y las siguientes cinco con los parámetros calibrados a Bogotá por esta investigación. La forma de las anteriores figuras es similar a la presentada en las Figuras 5 y 6, siendo asintótica en sus dos extremos, es decir, presenta unos volúmenes mínimos tanto en la

vía principal, como en la vía secundaria. La combinación de diferentes valores de volúmenes en ambos accesos de la intersección, genera una familia de cinco curvas que establecen las fronteras de los niveles de servicios de acuerdo con los tiempos de demora (s/veh) establecidos en el HCM 2000.

La comparación de las familias de curvas para los mismos parámetros pero con diferentes geometrías permite establecer que el orden de mejor a peor condiciones de operación es el siguiente: C-4, C-2, C-3, C-1G y C-1P. Lo anterior debido a que las condiciones de operación mejoran cuando se eliminan o restringen movimientos en una intersección de prioridad.

5. GENERACIÓN DE CURVAS NEMOTÉCNICAS

El análisis comparativo para las mismas geometrías, utilizando los parámetros HCM y los calibrados en esta investigación se presentan a continuación, en donde se observa que al disminuir las brechas críticas y los tiempos de seguimiento se obtienen menores tiempos de demora.

En la Figura 7, se presenta la comparación de la operación de las intersecciones de prioridad a partir de la superposición de las fronteras de nivel de servicio D, obtenidas con los parámetros HCM 2000 y con los calibrados a partir de este estudio. En nuestro país la infraestructura vial normalmente se diseña y se permite operar hasta condiciones de niveles de servicio iguales a D, dadas las restricciones de recursos para la inversión pública, y que esta situación aún no representa condiciones de saturación.

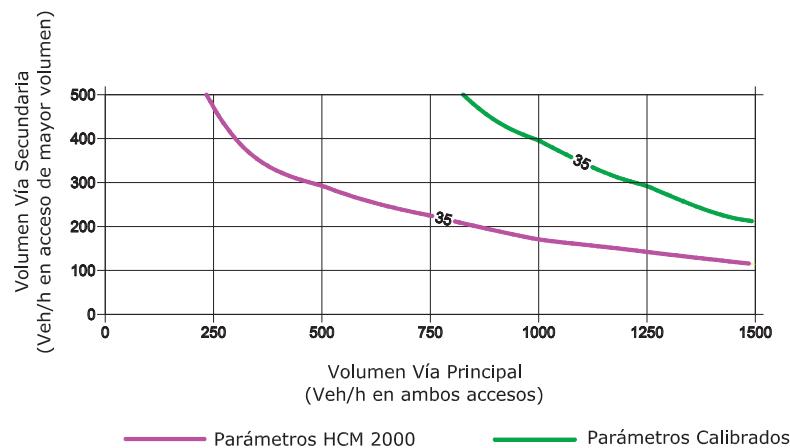


Figura 7. Comparación de Operación Intersección C-1P Parámetros HCM 2000 y Parámetros Calibrados

Calculando el área bajo cada curva en cada una de las figuras anteriores, se puede tener un indicador de la capacidad adicional que se obtiene al usar los parámetros calibrados en el presente estudio, el cual varía entre el 16% y el 33%, tomando como referencia el nivel de servicio D. En la Tabla 4 se presentan los datos.

Tabla 4. Capacidad Adicional Obtenida con Parámetros Calibrados para Intersecciones de Prioridad

TIPO DE INTERSECCIÓN	AREA BAJO CURVA MANUAL	AREA BAJO CURVA CALIBRADA	CAPACIDAD ADICIONAL %
C-1G	407,161	612,069	33%
C-1P	505,537	652,507	23%
C-2	487,068	676,906	28%
C-3	512,348	682,067	25%
C-4	425,796	504,929	16%

Fuente: Elaboración propia.

5.1. Comparación de curvas para identificar fronteras de operación

La definición de los niveles de servicio de operación de una intersección que está controlada por una señal de pare o por un semáforo, es una herramienta para decidir que tipo de control optimiza el funcionamiento de la intersección de acuerdo con los volúmenes vehiculares que esta presenta. Se consideró que las isocurvas que limitan los niveles de servicio D, explicados en el numeral anterior, definirán las zonas de operación para cada tipo de control y para cada tipo de intersección.

A continuación se presenta la superposición de las isocurvas de nivel de servicio D para cada tipo de intersección. En la Figura 8, correspondientes a la intersección tipo C1P, se observa que la operación con intersecciones semaforizadas de cuatro fases implica una operación con mayores demoras que la operación de las intersecciones de prioridad, para ambos casos.

5.2. Generación de curvas nemotécnicas

A partir de las curvas presentadas en la sección anterior, es posible construir para cada tipo de intersección una curva nemotécnica que representa la zona de mejor operación para uno de los tipos de control.

Si comparamos únicamente la frontera de operación de las intersecciones de prioridad y las semaforizadas de las diferentes geometrías y sentidos viales se puede obtener una figura que muestra la contribución que tiene en la operación el cambio en la geometría y los sentidos viales para una intersección dada.

En la Figura 9 se presentan las zonas por tipo de control para la geometría tipo C-1P. Estas curvas, son las que pueden apoyar el proceso de toma de decisiones, sobre el tipo de control a utilizar en una intersección, ya sea intersecciones de prioridad, intersecciones semaforizadas u otro tipo de control (en donde se saturan las intersecciones semaforizadas). Sin embargo cabe recordar que estas figuras representan únicamente el criterio de volúmenes de tráfico vehicular.

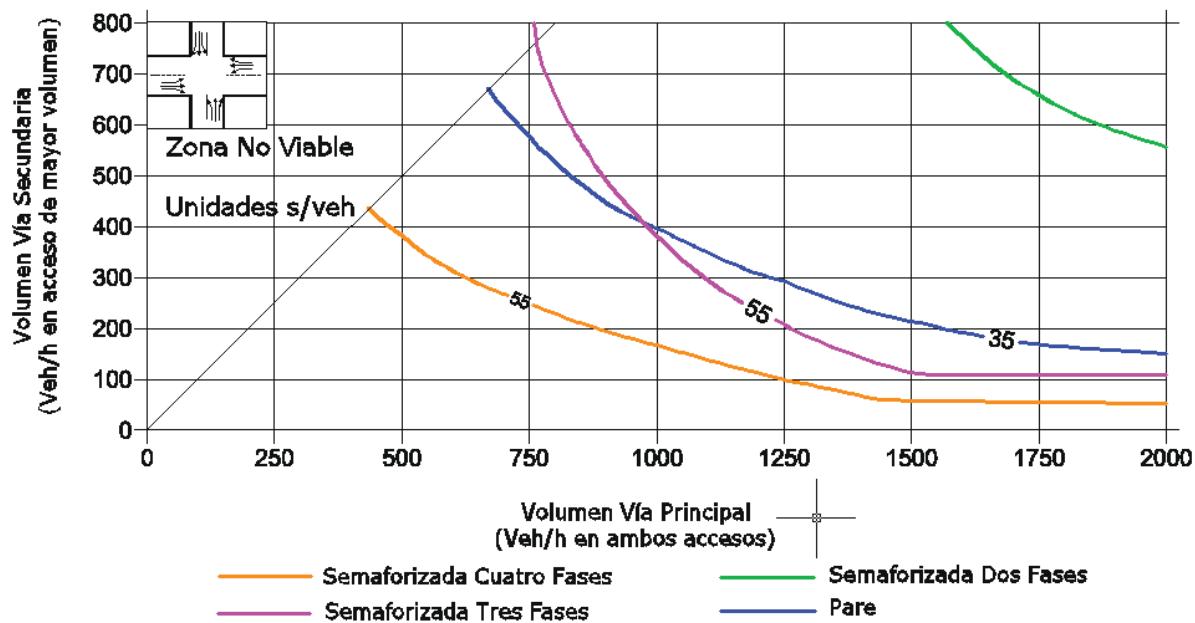


Figura 8. Monograma para Intersección Tipo C-1P

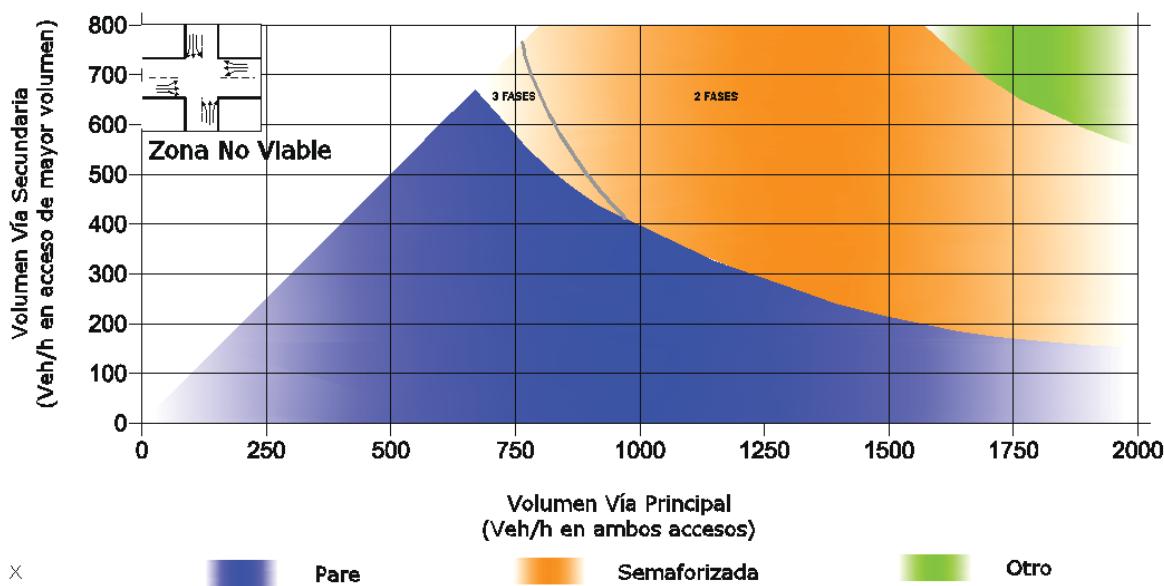


Figura 9. Zonas por Tipo de Control Intersección C-1P

La figura anterior también se realiza para las otras cuatro geometrías en estudio, generando una familia de curvas, en donde para volúmenes bajos, ya sea en la vía principal o en la secundaria, el tipo de control es el más sencillo: intersecciones de prioridad (zonas de color azul). Para volúmenes intermedios, el tipo de control corresponde a una intersección semaforizada, ya sea con tres o dos fases (zonas de color naranja). Por último, para altos volúmenes vehiculares se genera una zona de color verde en donde se requiere implementar otro tipo de medidas para mejorar la operación.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Uno de los puntos más críticos en la operación de los vehículos por la red vial urbana son las intersecciones, para el caso de la ciudad de Bogotá la mayoría de estas son intersecciones de prioridad e intersecciones semaforizadas, es por esto que esta investigación se concentra en revisar la operación de este tipo de intersecciones a nivel.

Después de revisar información secundaria de diferentes contratos del Distrito, se encontró que la mayoría de las intersecciones a nivel tienen una geometría en cruz preferiblemente sobre las geometrías en forma de “T”, por lo que se procede a concentrar esta investigación principalmente en las diferentes variaciones de esta geometría.

- **Calibración de parámetros**

Del resultado de la calibración a nuestro medio de los parámetros que permiten describir la operación de una intersección controlada por medio de una señal de pare: determinar los tiempos de las brechas críticas y tiempos de seguimiento en las intersecciones; se puede identificar que los conductores en Bogotá no respetan en su totalidad la señal de pare deteniendo totalmente sus vehículos. Los valores de brechas críticas obtenidos en esta investigación son menores en promedio en un 13% en comparación con los valores del Manual HCM-2000 generando una capacidad potencial mayor para este tipo de intersecciones. En cuanto al tiempo de seguimiento los valores tienen un incremento en promedio del 14% respecto a los datos del manual HCM-2000.

- **Indicadores de operación**

Por utilizar todas las ecuaciones desarrolladas en el Manual HCM-2000 y por permitir modificar los datos calibrados a nuestro medio en las diferentes intersecciones se seleccionó la utilización del software HCS-2000 como herramienta de modelación para la construcción de las iso-curvas de niveles de servicio.

- **Modelación de combinaciones de intersecciones**

Para efectos de la modelación de las intersecciones se dejaron constantes la geometría, el porcentaje de volumen para cada movimiento de giro derecho o izquierdo, el factor de hora pico, la pendiente, el porcentaje de vehículos pesados, el flujo de saturación y el volumen peatonal. Los datos variables corresponden al tipo de control (pare o semáforo), los sentidos viales (unidireccionales o bidireccionales), el número de fases para el caso de intersecciones semaforizadas, el volumen de la vía principal y el volumen de la vía secundaria.

A partir de la modelación de estas combinaciones se obtuvieron en total veintiún monogramas para las intersecciones de prioridad e intersecciones semaforizadas, en donde con los volúmenes de las vías principal y secundaria se pueden obtener los niveles de servicio y los tiempos promedio de demora por cada tipo de intersección.

Para la misma geometría la comparación de la operación de diferentes tipos de intersecciones permitió obtener las curvas nemotécnicas que a partir de los volúmenes de las vías principales y secundarias se pueden establecer en que momento se debe utilizar una intersección de prioridad,

una intersección semaforizada (cuatro, tres y dos fases) y en que momento se debe buscar otra solución diferente.

En la mayoría de los casos la operación de intersección semaforizada de cuatro fases genera unos mayores tiempos promedio de demoras y niveles de servicio que la operación de una intersección de prioridad.

- **Comparación con valores de Manuales**

Al comparar la capacidad potencial de las intersecciones de prioridad calibradas a nuestro medio con las obtenidas de los parámetros del HCM-2000 se observa un incremento en la misma que varía entre el 16% y el 33% para la diferentes geometrías, siendo mayor en el caso de una intersección en cruz de cuatro sentidos de circulación y menor para el caso de sólo dos sentidos de circulación.

Al comparar los parámetros de decisión para el caso de pasar entre una intersección de prioridad a una intersección semaforizada se observan capacidades adicionales entre el 37% y el 255% entre los resultados de esta investigación y los utilizados en el Manual de señalización colombiano, siendo la menor el caso de vías unidireccionales y la mayor el caso para vías bidireccionales.

- **Aplicaciones de la Investigación**

La aplicación de las curvas nemotécnicas resultados de esta investigación puede emplearse para evaluar operación actual, para el diseño y para la planeación de las diferentes tipos de intersecciones estudiadas.

La calibración de parámetros a nuestro medio permite presentar mejor la operación de una intersección de prioridad o intersección semaforizada. Adicionalmente, permite tener elementos propios de requisitos para tomar decisiones en el caso de semaforizar una intersección o de buscar una solución diferente cuando la misma se encuentre saturada.

- **Recomendaciones para otras investigaciones**

Como recomendaciones o temas necesarios de investigaciones posteriores se plantea la evaluación de intersecciones tipo en "T", el estudio de la relación entre los volúmenes de la hora pico de una intersección y el octavo volumen que se aplica en las presentes curvas. Adicionalmente, también se puede estudiar la incidencia de la colocación de carriles adicionales que permitan algunos giros de forma exclusiva.

REFERENCIAS

BARAHONA, Jeannette y GUZMAN, Deisy. Metodología para estimar demoras en intersecciones semaforizadas. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1997.

CAL Y MAYOR Y ASOCIADOS. Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte. Bogotá. 1998 y 2005.

CAL Y MAYOR, Rafael y CARDENAS G., James. Ingeniería de Tránsito. Alfaomega Grupo Editor. México, D.F. 2000.

- CASTRO GARCÍA, William. Modelos para el diseño de corredores de tráfico coordinados con aplicaciones en semaforización electrónica. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá. 1990.
- GARBER Nicholas, HOEL Lester. Ingeniería de Transito y Carreteras. México 2005.
- GARCIA, Roberto y RUBIANO, Luis Fernando. Modelos de simulación para aplicaciones en semaforización electrónica. Fase III. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá. 1989.
- HIGHWAY CAPACITY SOFTWARE HCS 2000. Version 4.1e. MacTrans Center. University of Florida. 2004.
- MCSHANE, William R. y ROESS, Roger P. Traffic Engineering. New Jersey. Prentice-Hall. 1992.
- MINISTERIO DE TRANSPORTE. Manual de Señalización. Dispositivos para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia del Ministerio de Transporte. Bogotá. 2004.
- RADELAT, Guido. Principios de Ingeniería de Tránsito. Instituto de Ingeniero de Transportes. ITE. Washington. 2003.
- RICHTLINIEN FUR LICHTSIGNALANLAGEN, Norma Alemana RILSA, 2001.
- SIGNALISED & UNSIGNALISED INTERSECTION DESIGN AND RESEARCH AID, aaSIDRA 2.0 User Guide. Akcelik & Associates Pty Ltd. February 2002.
- TORRES RUIZ, Nubby Liliana. Metodología para el planeamiento de intersecciones semaforizadas en función del tiempo. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de Grado. Bogotá, 2003.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual. National Research Council. Washington, D.C. 2000.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Seminario Internacional sobre manejo, gestión e infraestructura en la regulación del tráfico. Memorias Técnicas. Bogotá. Diciembre de 2000.
- US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Highway of Transportation. Manual on Uniform Traffic Control Devices. 2003.
- VALDES, Antonio. Ingeniería de Tráfico. Tercera Edición. Editorial Dossat S.A. Madrid. 1982.
- VASQUEZ CAÑAS, Luz Dary. El sistema de semaforización electrónica de Santafé de Bogotá. Trabajo de Grado Especialización en Transporte. Universidad Nacional de Colombia. Julio 1988.