

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

## MEDICIÓN DE PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS EN INTERSECCIONES REGULADAS POR PRIORIDAD DE PASO: EL CASO DE LIMA

Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

**CARLOS EDÚ SALDAMANDO CAMAC**

**Asesor: Ing. Félix Israel Cabrera Vega**

**Lima, Marzo del 2015**

## RESUMEN

Desde hace varias décadas, ha ido incrementándose el interés en los modelos matemáticos y software de simulación para analizar el tráfico vehicular; sin embargo, para que este tipo de modelos tengan resultados acertados, es necesario recopilar cantidades generosas de información de campo.

Debe mencionarse, además, que los programas empleados para obtener estos resultados son desarrollados en otros países, en los cuales los diseñadores describen algoritmos que se ajustan al comportamiento de los conductores de sus propios países, por lo cual, los resultados que se obtienen no pueden considerarse confiables para un sistema vial donde los conductores no se rigen por los mismos comportamientos.

Por lo tanto, es necesario desarrollar un conocimiento pormenorizado de los comportamientos de los conductores mediante una serie de mediciones del mismo sistema, que brinden un conocimiento real de los parámetros matemáticos que describen sus comportamientos.

En este trabajo, los datos recolectados fueron de las intersecciones viales reguladas únicamente por prioridad de paso, es decir, aquellas cuyos flujos vehiculares no están controlados por semáforos, y aquellas que sean en forma de “T” o en forma de “+” (cruz). Además, constan de una vía principal de mayor flujo vehicular y una vía secundaria de menor flujo, desde donde se producen los giros a la derecha, giros a la izquierda y maniobras de cruce recto (en el caso de intersecciones en forma de cruz).

Este estudio busca principalmente cuantificar los intervalos de tiempo aceptados y rechazados en distintas intersecciones reguladas por prioridad, para luego representar los comportamientos encontrados en valores cuantificables que posteriormente permitan calcular la capacidad de las intersecciones viales con una mayor certeza.







*A Dios y a mis padres, por el amor y corrección que me brindaron  
y me hicieron aspirar siempre a ser un hombre recto.*

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación presente, así como todos mis estudios previos a esta culminación de mi carrera universitaria se lo debo a mis padres, Carlos Elmer Saldamando y Ana María Camac, quienes con su esfuerzo, apoyo y amor, me impulsaron constantemente en todo este largo camino.

Quisiera agradecer a también a todos mis familiares y amigos quienes con sus consejos me animaron a perseverar en mis estudios a pesar de las adversidades. A mi novia Karina Flores, quien ha sido para mí un ejemplo de superación y de excelencia, y me inspiró la convicción de ansiar ser un gran profesional. A mi asesor el Ingeniero Cabrera, quien me guio y ayudó notablemente en todo el desarrollo de este trabajo. Finalmente y de forma principal quiero agradecer a Dios, el cual ha sido siempre mi guía y fortaleza en todo este tiempo, por quien vivo y quien da sentido a mi vida y me ha bendecido enormemente en todo este tiempo



## INDICE DE CONTENIDO

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>APROBACIÓN DE TEMA DE TESIS</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	v
<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.3.1 Generales.....	2
1.3.2 Específicos.....	2
1.4 HIPÓTESIS PLANTEADAS.....	3
1.5 ALCANCE DEL ESTUDIO.....	3
<b>CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	4
2.1 DEFINICIONES PREVIAS.....	4
2.2 TIPOS DE INTERSECCIONES REGULADAS POR PRIORIDAD Y MANIOBRAS.....	6
2.3 TIPOS DE BRECHAS.....	10
2.4 MODELOS DE BRECHAS.....	11
2.4.1 Factores que influyen en el valor de la brecha.....	17
2.5 LA BRECHA CRÍTICA.....	20
2.6 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA BRECHA CRÍTICA.....	21
2.7 ANTECEDENTES.....	24
- En otras culturas fuera de Latinoamérica.....	24
- En otros países latinoamericanos.....	24
- En el Perú.....	25
<b>CAPITULO 3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION</b> .....	26
3.1 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE INTERSECCIONES.....	26
3.2 INTERSECCIONES ELEGIDAS PARA EL ESTUDIO.....	37
3.3 METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	40
3.4 CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE BRECHAS.....	44
3.5 EXTRACCION DE DATOS RECOLECTADOS.....	45
3.6 METODOLOGÍA PARA EXTRACCIÓN DE TIEMPOS DE AVANCE DE COLA.....	46

3.7 EVENTUALIDADES PRESENTADAS EN LA TOMA DE DATOS DE CAMPO .....	47
<b>CAPITULO 4. RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
4.1 DISTRIBUCIÓN DE VEHÍCULOS POR INTERVALOS DE HORA .....	48
4.2 DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS POR INTERVALOS DE HORA .....	50
4.2.1 <i>Brechas aceptadas</i> .....	50
4.2.2 <i>Brechas rechazadas</i> .....	52
4.3 DISTRIBUCIONES TOTALES DE LAS BRECHAS REGISTRADAS EN CADA INTERSECCIÓN .....	53
4.4 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN CADA INTERSECCIÓN POR INTERVALOS DE HORA .....	55
4.5 OBTENCIÓN DE BRECHA CRÍTICA PARA CADA INTERSECCIÓN A LO LARGO TODAS LAS HORAS DE ESTUDIO .....	58
4.5.1 <i>Método de Raff</i> .....	58
4.5.2 <i>Método del Percentil 50</i> .....	61
4.6 OBTENCIÓN DE BRECHA CRÍTICA PARA CADA INTERSECCIÓN POR INTERVALOS DE HORAS .....	64
4.7 DETERMINACIÓN DE TIEMPO DE AVANCE DE COLA .....	65
4.8 COMPARACION DE RESULTADOS .....	66
4.9 ECUACION PARA LA DETERMINACIÓN DE BRECHA CRÍTICA .....	71
4.10 COMPARACIÓN DE CAPACIDADES EMPLEANDO HCM Y RESULTADOS DEL PRESENTE ESTUDIO .....	75
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>78</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>81</b>
<b>ANEXOS</b>	

## LISTA DE TABLAS

## Página

TABLA 1. COMPARACIÓN DE CAPACIDADES EN VÍA SUBORDINADA CON DISTINTOS MODELOS PARA VALORES DE BRECHA CRÍTICA VARIABLE.....	16
TABLA 2. EJEMPLO HIPOTÉTICO DE DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS EN INTERVALOS DE TIEMPO.....	22
TABLA 3. VALORES DE BRECHAS EQUIVALENTES A LAS CRÍTICAS USADAS EN NORTEAMÉRICA.....	24
TABLA 4. FORMATO DE TOMA DE DATOS PARA FASE 1.....	33
TABLA 5. DETALLE DE LAS MUESTRAS TOMADAS PARA EL ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA BRECHA CRÍTICA.....	38
TABLA 6. DETALLE DE LAS MUESTRAS TOMADAS PARA EL ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE AVANCE DE COLA.....	39
TABLA 7. DETALLE DE PERIODOS DE GRABACIÓN PARA CADA INTERSECCIÓN.....	41
TABLA 8. PERIODOS DE ANÁLISIS PARA CADA INTERSECCIÓN.....	50
TABLA 9. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS POR INTERVALOS DE HORA. INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	51
TABLA 10. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS RECHAZADAS A POR INTERVALOS DE HORA. INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	52
TABLA 11. CLASIFICACIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS EN INTERVALOS DE UN SEGUNDO. INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	64
TABLA 12. CLASIFICACIÓN DE BRECHAS RECHAZADAS EN INTERVALOS DE UN SEGUNDO. INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	65
TABLA 13. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS EN INTERSECCIONES.....	67
TABLA 14. RELACIÓN DE VISIBILIDAD Y BRECHAS CRÍTICAS TOTALES.....	67
TABLA 15. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DISTRIBUCIONES DE VELOCIDADES REGISTRADAS EN INTERSECCIONES.....	68
TABLA 16. COMPARACIÓN DE DATOS FINALES OBTENIDOS.....	69
TABLA 17. COMPOSICIÓN DEL AFORO VEHICULAR EN INTERSECCIONES.....	71
TABLA 18. RELACIONES DE VELOCIDAD MEDIA DE VEHÍCULOS EN VÍA PRINCIPAL Y VALOR DE BRECHA CRÍTICA PROMEDIO.....	72
TABLA 19. PAQUETES DE DATOS PARALELOS PARA ANÁLISIS DE ESCENARIO HIPOTÉTICO.....	75
TABLA 20. CAPACIDADES DE INTERSECCIONES USANDO MODELOS TEÓRICOS EMPLEANDO EN PARALELO VALORES SUGERIDOS DEL HCM Y LOS DETERMINADOS POR EL ESTUDIO.....	76

## LISTA DE FIGURAS

## Página

FIGURA 1. PARÁMETROS MICROSCÓPICOS DEL FLUJO VEHICULAR.....	5
FIGURA 2. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS MOVIMIENTOS VEHICULARES EN INTERSECCIONES EN FORMA DE “T” Y EN FORMA DE “+” (CRUZ).....	7
FIGURA 3. ZONAS DE CONFLICTO POR FLUJOS CONVERGENTES Y DIVERGENTES.....	7
FIGURA 4. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LA ACCIÓN DEL CONDUCTOR EN LA VÍA SECUNDARIA PARA INCORPORARSE EN LA INTERSECCIÓN.....	8
FIGURA 5. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS TIEMPOS IMPLÍCITOS EN LA ESTIMACIÓN DE LOS CONDUCTORES EN LA VÍA SECUNDARIA.....	8
FIGURA 6. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE CONDUCTORES ARRIESGADOS QUE ASUMEN HOLGURAS DE TIEMPO PELIGROSAMENTE PEQUEÑAS.....	9
FIGURA 7. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS.....	9
FIGURA 8. GRAFICO EXPLICATIVO SOBRE EL ESPACIO DE TIEMPO COMPRENDIDO COMO INTERVALO INTEGRO.....	10
FIGURA 9. GRAFICO EXPLICATIVO SOBRE EL ESPACIO DE TIEMPO COMPRENDIDO COMO INTERVALO RESIDUAL.....	11
FIGURA 10. MODELOS DE TIPOS DE BRECHAS SEGÚN LA DISTANCIA DE ACOPLAMIENTO AL FLUJO PRINCIPAL.....	11
FIGURA 11. CIRCULACIÓN INTERRUMPIDA POR UNA INTERSECCIÓN.....	12
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE CÁLCULOS CAPACIDAD DE VÍA SECUNDARIA EMPLEANDO DISTINTOS MODELOS PARA VALORES DE BRECHA CRÍTICA HIPOTÉTICOS.....	16
FIGURA 13. DIAGRAMAS ESPACIO-TIEMPO PARA VEHÍCULOS EN LAS CERCANÍAS DE UNA SEÑAL DE ALTO.....	21
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS EN CURVA DE PORCENTAJES ACUMULADA PARA HALLAR EL PERCENTIL 50.....	22
FIGURA 15. VALOR DE BRECHA CRÍTICA MEDIANTE INTERPOLACIÓN POR MÉTODO DE RAFF.....	23
FIGURA 16. CARACTERÍSTICAS DE INTERSECCIONES ELEGIDAS PARA EL ESTUDIO.....	27
FIGURA 17. DESCRIPCIÓN DE MANIOBRAS EN LA INTERSECCIÓN CUYAS BRECHAS NO FUERON CONSIDERADAS PARA EL ESTUDIO.....	27
FIGURA 18. TIPOS DE INTERSECCIONES ELEGIDAS PARA EL ESTUDIO.....	28
FIGURA 19. EJEMPLO ESQUEMÁTICO DE DESCRIPCIÓN DE LOS FLUJOS EN INTERSECCIÓN.....	28
FIGURA 20. INTERSECCIÓN CON PRESENCIA DE BACHES EN LA ZONA DE GIRO.....	29
FIGURA 21. DESCRIPCIÓN DE ESTADOS DE PAVIMENTO PARA LA FASE 1.....	29
FIGURA 22. CONDICIONES DE DISEÑO GEOMÉTRICO CERCANOS PARA LAS INTERSECCIONES ELEGIDAS PARA EL ESTUDIO.....	30
FIGURA 23. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS TIPOS DE VISIBILIDAD DISPONIBLES.....	31
FIGURA 24. DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA EN INTERSECCIÓN REGULADA POR PRIORIDAD.....	34
FIGURA 25. ESQUEMA DE VISIBILIDAD DESDE EL ACCESO SECUNDARIO.....	35
FIGURA 26. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PARADA EN VÍA SECUNDARIA.....	36

FIGURA 27. EJEMPLO DE FLUJOGRAMA EN INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	37
FIGURA 28. DESCRIPCIÓN DE ELECCIÓN DE PUNTO DE GRABACIÓN.....	37
FIGURA 29. DISTRIBUCIÓN EN LIMA METROPOLITANA DONDE SE REALIZARON LAS RECOLECCIONES DE DATOS.....	38
FIGURA 30. FOTOGRAFÍA Y UBICACIÓN INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	39
FIGURA 31. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE INTERSECCIÓN: ANCHO DE VÍAS, VISTA IZQUIERDA Y VISTA DERECHA. INTERSECCIÓN AV. LOS FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	40
FIGURA 32. FILMADORA COLOCADA EN AZOTEA EN EDIFICIO ADYACENTE A INTERSECCIÓN AV. DEL RÍO CON CALLE GENERAL BORGÑO.....	41
FIGURA 33. FILMACIÓN REALIZADA DESDE DENTRO DE VEHÍCULO PARTICULAR CONECTADA A LA BATERÍA.....	42
FIGURA 34. DETALLE DE UBICACIÓN DE FILMADORA EN INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	42
FIGURA 35. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO MÁXIMO DE BRECHA ANALIZABLE.....	44
FIGURA 36. FORMA DE EXTRACCIÓN DE VALORES DE BRECHA A PARTIR DE FILMACIÓN.....	46
FIGURA 37. METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE TIEMPO DE AVANCE DE COLA.....	47
FIGURA 38. DISTRIBUCIÓN DE FLUJOS VEHICULARES EN INTERSECCIONES A LO LARGO DE HORAS DE ESTUDIO.....	49
FIGURA 39. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS REGISTRADAS A LO LARGO DE TODAS LAS HORAS DE FILMACIÓN. INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	53
FIGURA 40. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS REGISTRADAS A LO LARGO DE TODAS LAS HORAS DE FILMACIÓN. INTERSECCIÓN AV. SEPARADORA INDUSTRIAL CON CALLE CUETO FERNANDINI – ATE.....	54
FIGURA 41. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS REGISTRADAS A LO LARGO DE TODAS LAS HORAS DE FILMACIÓN. INTERSECCIÓN AV. DEL RÍO CON CALLE GENERAL BORGÑO – PUEBLO LIBRE.....	54
FIGURA 42. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS REGISTRADAS A LO LARGO DE TODAS LAS HORAS DE FILMACIÓN. INTERSECCIÓN AV. SUCRE CON JIRÓN NICOLÁS GUTARRA – PUEBLO LIBRE.....	55
FIGURA 43. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA VÍA PRINCIPAL REGISTRADAS POR INTERVALOS DE HORA. INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	56
FIGURA 44. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA VÍA PRINCIPAL REGISTRADAS POR INTERVALOS DE HORA. INTERSECCIÓN AV. SEPARADORA INDUSTRIAL CON CALLE CUETO FERNANDINI – ATE.....	57
FIGURA 45. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA VÍA PRINCIPAL REGISTRADAS POR INTERVALOS DE HORA. INTERSECCIÓN AV. DEL RÍO CON CALLE GENERAL BORGÑO – PUEBLO LIBRE.....	57

FIGURA 46. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA VÍA PRINCIPAL REGISTRADAS POR INTERVALOS DE HORA. INTERSECCIÓN AV. SUCRE CON JIRÓN NICOLÁS GUTARRA – PUEBLO LIBRE.....	58
FIGURA 47. CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS INTERSECTADAS PARA DETERMINAR BRECHA CRÍTICA POR EL MÉTODO DE RAFF. INTERSECCIÓN AVENIDA FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS - LA MOLINA.....	59
FIGURA 48. CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS INTERSECTADAS PARA DETERMINAR BRECHA CRÍTICA POR EL MÉTODO DE RAFF. AV. SEPARADORA INDUSTRIAL CON CALLE CUETO FERNANDINI - ATE.....	59
FIGURA 49. CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS INTERSECTADAS PARA DETERMINAR BRECHA CRÍTICA SEGÚN RAFF. AV. DEL RIO CON CALLE GENERAL BORGÑO – PUEBLO LIBRE.....	60
FIGURA 50. CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS Y RECHAZADAS INTERSECTADAS PARA DETERMINAR BRECHA CRÍTICA SEGÚN RAFF. INTERSECCIÓN AVENIDA SUCRE CON JIRÓN NICOLÁS GUTARRA – PUEBLO LIBRE.....	61
FIGURA 51. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS SEPARADO POR INTERVALOS DE MEDIO SEGUNDO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA BRECHA CRÍTICA POR EL MÉTODO DE PERCENTIL 50. AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS - LA MOLINA.....	62
FIGURA 52. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS SEPARADO POR INTERVALOS DE MEDIO SEGUNDO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA BRECHA CRÍTICA POR EL MÉTODO DE PERCENTIL 50. AV. SEPARADORA INDUSTRIAL CON CUETO FERNANDINI – ATE.....	62
FIGURA 53. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS SEPARADO POR INTERVALOS DE MEDIO SEGUNDO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA BRECHA CRÍTICA POR EL MÉTODO DE PERCENTIL 50. AV. DEL RIO CON CALLE GENERAL BORGÑO – PUEBLO LIBRE.....	63
FIGURA 54. DISTRIBUCIÓN DE BRECHAS ACEPTADAS SEPARADO POR INTERVALOS DE MEDIO SEGUNDO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA BRECHA CRÍTICA POR EL MÉTODO DE PERCENTIL 50. AV. SUCRE CON JIRÓN NICOLÁS GUTARRA – PUEBLO LIBRE.....	64
FIGURA 55. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE AVANCES DE COLA EN HORA PICO. INTERSECCIÓN AV. FRUTALES CON CALLE LOS CEREZOS – LA MOLINA.....	66
FIGURA 56. DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE BRECHA CRÍTICA EN INTERSECCIONES POR MÉTODOS DE RAFF Y $P_{50}$ .....	70
FIGURA 57. RELACIÓN DE VELOCIDADES EN VÍA PRINCIPAL Y BRECHAS CRÍTICAS PARA GIROS DERECHA E IZQUIERDA DESDE VÍA PRINCIPAL EN PERIODOS PICO Y VALLE.....	73
FIGURA 58. RELACIÓN DE VELOCIDADES EN VÍA PRINCIPAL Y BRECHAS CRÍTICAS. INTERVALOS DE PERIODOS PICO Y VALLE.....	74
FIGURA 59. COMPARACIÓN DE BRECHA CRÍTICA EMPLEANDO VALORES SUGERIDOS POR EL HCM Y SUGERIDOS POR LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.....	76

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

En Lima Metropolitana como en cualquier otra capital, se emplean dispositivos y metodologías para evaluar las condiciones de circulación y a partir de ello, conocer con mayor detalle el comportamiento del tránsito, derivando en una mayor eficiencia y un mejoramiento continuo. Para lograr este conocimiento, se requiere de una serie de estudios que busquen describir el comportamiento del tránsito en cada ciudad o país.

Este estudio tiene por finalidad ser un primer paso en nuestro país para conocer este comportamiento de forma detallada, basándose en datos tomados directamente de campo, para así establecer modelos matemáticos que resulten ser una mejor representación del tránsito en la ciudad de Lima.

#### 1.1 Planteamiento del problema

En los estudios de tránsito de intersecciones reguladas por prioridad de paso, se emplean conceptos como el de *brecha crítica* y el de *tiempo de avance de cola*, los cuales tienen una influencia considerable en la capacidad de las intersecciones vehiculares, tanto así que, una variación incluso de segundos en cuanto al valor de alguna de ellas, puede resultar en capacidades (vehículos/hora) que se diferencian en decenas o centenas de vehículos.

En el Perú hasta el momento, no se han realizado estudios para determinar alguno de estos valores por esto, al emplear diversos software de tránsito, se asumen valores que son representativos únicamente de los mismos países que los brindan (principalmente norteamericanos). Por esto, los resultados obtenidos empleando tales valores de brecha crítica o de tiempo de avance de colas, son valores sujetos a una alta incertidumbre y que no serían coherentes con la realidad del tránsito de nuestra ciudad.

#### 1.2 Justificación

Como se mencionó anteriormente, tan solo una pequeña variación en cuanto al valor que se le da a la brecha crítica o del tiempo de avance de cola, arrojan márgenes altos de variación en capacidades y niveles de servicio. Por esa razón, se deben realizar estudios para obtener valores de los mismos permitan determinar la capacidad de las obras de infraestructuras ya existentes o de las que se encuentre aun fase de proyecto, con una mayor precisión.

Además, para asegurar una mayor fiabilidad de estos valores, los datos deben recopilarse directamente de campo (es decir, en un escenario real) y no software de simulación. De esta forma se puede asegurar la plena certeza de los resultados obtenidos.

En cuanto a la recolección mencionada, la metodología constó en registrar mediante una filmación continua, los flujos de tránsito en distintas intersecciones distribuidas en Lima Metropolitana, para obtener distribuciones de brechas por giro a la derecha y a la izquierda.

Este estudio contempla aquellas intersecciones en las cuales no hay presencia de semáforos ni de otros factores que puedan restringir o influir en los flujos vehiculares, es decir, se centra en aquellos cruces donde los conductores de una vía subordinada desean incorporarse al flujo vehicular en una vía principal. Para esto, realizan antes una estimación del espacio de tiempo disponible para efectuar la maniobra.

### 1.3 Objetivos

En la presente investigación se plantea lograr los siguientes objetivos:

#### 1.3.1 Objetivos generales

- ✓ Analizar el efecto de la brecha crítica y del tiempo de avance de cola en los modelos teóricos para intersecciones reguladas con señal de prioridad y su aplicación en Lima Metropolitana.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar el valor de brecha crítica en intersecciones reguladas por prioridad de paso.
- ✓ Determinar el valor del tiempo de avance de cola en intersecciones reguladas por prioridad de paso
- ✓ Comparar las capacidades resultantes al emplear los valores sugeridos por el HCM y los valores determinados por medio de esta investigación.
- ✓ Describir el comportamiento de los conductores en intersecciones con diferentes características.

#### 1.4 Hipótesis planteadas

1. La brecha crítica es notablemente menor en comparación con las encontradas en otros países (especialmente fuera de Latinoamérica).
2. Los valores de brecha crítica están relacionados a la velocidad de circulación y los flujos vehiculares en la vía principal.
3. Los valores de brecha crítica están relacionados con la visibilidad para realizar la maniobra de giro.
4. Los valores de brecha crítica hallados por distintos métodos ofrecen valores considerablemente diferentes entre sí.
5. El tiempo de avance de cola es considerablemente menor que el sugerido por el HCM.

#### 1.5 Alcance del estudio

La investigación se limita a intersecciones dentro de Lima Metropolitana, con vías de dos carriles, tanto en la vía principal como en la vía subordinada. Además, los resultados obtenidos mediante el presente estudio son aplicables a intersecciones en las que los vehículos en la vía principal tengan capacidad de desarrollar velocidad mientras se aproximan a la vía subordinada, es decir, que en la cercanía a la intersección, dentro de la vía principal estén libres de: semáforos, reductores de velocidad, baches significativamente pronunciados, cruces peatonales, paraderos, etc.

Los resultados obtenidos no son aplicables para situaciones donde hay un alto porcentaje de vehículos pesados, motocicletas y vehículos no motorizados. Además, este estudio no pretende analizar el comportamiento de los conductores cuando el rozamiento en la superficie de rodadura se ve reducida por la presencia de humedad. Finalmente, este estudio no pretende generalizar los resultados obtenidos, sino que trata de brindar algunos criterios iniciales los cuales deberían ser verificados y complementados en investigaciones posteriores.

## CAPITULO 2

### REVISIÓN DE LITERATURA

A continuación se describen los diversos factores que de forma directa e indirecta influyen en los valores de brechas aceptadas y rechazadas por los conductores en la vía subordinada. Estos factores pueden estar relacionados a las características del vehículo, tales como dimensiones, potencia mecánica, etc., las características del conductor, tales como velocidad de reacción, pericia, tiempo de espera para incorporarse a la vía principal, etc., hasta las características geométricas de la intersección, como la visibilidad, estado del pavimento y ubicación de la intersección.

Asimismo, también se enumeran los distintos modelos desarrollados por investigadores precedentes en los cuales, el valor de la brecha crítica es el factor más influyente para determinar la capacidad y los niveles de servicio de las intersecciones vehiculares. Por lo tanto, es importante mencionarlos para poder entender el criterio de selección de las intersecciones, en este estudio, así como para la correcta interpretación de los resultados finales obtenidos.

#### 2.1 Definiciones previas

A continuación, se procede a detallar los conceptos más relevantes de la teoría de brechas:

- **La brecha de tránsito**

Entre dos vehículos que circulan en una misma vía, en la misma dirección, existen dos factores que son determinantes, estos son: los parámetros espaciales y los temporales.

Aunque ambos puedan derivarse a partir de un mismo suceso (el desplazamiento de dos vehículos sucesivos), cada cual se describe con un concepto diferente: los parámetros espaciales, se refieren a los espacios existentes entre ambos vehículos los cuales se miden en unidades de longitud, y los parámetros temporales son aquellos que se miden en unidades de tiempo (Radelat, 2003).

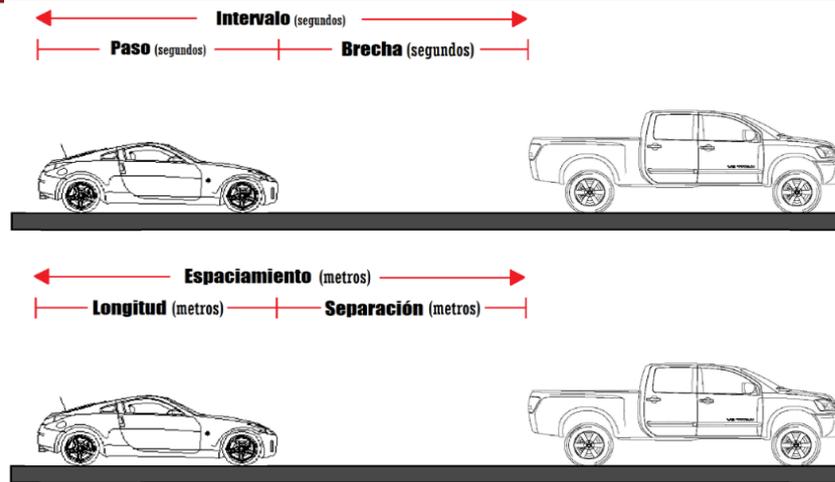


Figura 1. Parámetros microscópicos del flujo vehicular. Fuente: Adaptado de Fernández, 2008

A partir de la figura 1, se pueden determinar las siguientes relaciones:

$$\text{INTERVALO} = \text{BRECHA} + \text{PASO}$$

El paso se define como el tiempo que demora un vehículo en desplazarse una distancia igual a su propia longitud y la brecha el tiempo, que demora el vehículo posterior en alcanzar la parte trasera del vehículo delantero, habiendo fijado su posición en un punto fijo de la vía.

La longitud es la medida del largo del vehículo, tomado desde el parachoque delantero hasta el parachoque trasero, esta medida se expresa en metros. En cuanto a la separación, como se indica en la figura 1, es la longitud que existe entre el parachoque frontal del vehículo posterior, con el parachoque posterior del vehículo delantero.

También, a partir de la figura 1 se pueden definir las siguientes relaciones espaciales:

$$\text{LONGITUD} + \text{SEPARACIÓN} = \text{ESPACIAMIENTO}$$

Tiendo en cuenta lo anterior, podemos establecer las siguientes expresiones:

$$\text{PASO} = \text{LONGITUD} / \text{VELOCIDAD}$$

$$\text{BRECHA} = \text{SEPARACION} / \text{VELOCIDAD}$$

Por tanto, la brecha es el espacio de tiempo medido en segundos, que existe entre dos vehículos que circulan en una misma vía, en la misma dirección, medido desde la parte posterior del vehículo delantero en un punto fijo de la vía, hasta la parte frontal del vehículo posterior, como se plasma en la figura 1.

Por ello, la brecha será el factor más importante en la determinación de los flujos vehiculares que podrán circular de forma continua por dicha intersección, ya que para realizar estas maniobras, habrá constantemente, conductores decidiendo aceptar o rechazar brechas disponibles. De los valores aceptados y rechazados, dependerá la capacidad y el nivel de servicio de una intersección, por lo que, determinar el valor de la brecha crítica es el principal objetivo de esta investigación.

- **El tiempo de avance de cola**

En las intersecciones reguladas por prioridad de paso, se forman colas de vehículos en la vía secundaria, los cuales esperan brechas en la vía principal que tengan longitud suficiente para poder realizar la maniobra de giro e incorporarse al flujo en la vía principal. El tiempo de avance de cola es el tiempo que le toma a un segundo vehículo en dicha cola, para avanzar hasta la línea de parada una vez que el primer vehículo de la misma cola, ha realizado la maniobra de giro para acoplarse al tránsito en la vía principal.

## **2.2 Tipos de intersecciones reguladas por prioridad y maniobras**

En cualquier ciudad existen distintos tipos de intersecciones reguladas por prioridad, en las cuales, los flujos vehiculares estarán influenciados por el ángulo de incidencia entre los accesos. Como parte del estudio, se analizó el comportamiento de los vehículos en aquellas intersecciones donde este ángulo sea de  $90^\circ$  (con una variación de  $\pm 10^\circ$ ).

Estas intersecciones, están conformadas por una vía principal, la cual posee un flujo vehicular notablemente mayor, y por una vía subordinada (o secundaria), la cual se caracteriza por tener un flujo vehicular menor. Estas pueden ser del tipo “T” o en “+” (cruz), dándose giros (maniobras) a la derecha, a la izquierda, así como también, maniobras de cruce recto (en caso de intersecciones en forma de cruz), en el que los vehículos cruzan de frente la vía sin realizar ningún giro.

Los movimientos en estos tipos de intersecciones se describen en la figura 2:

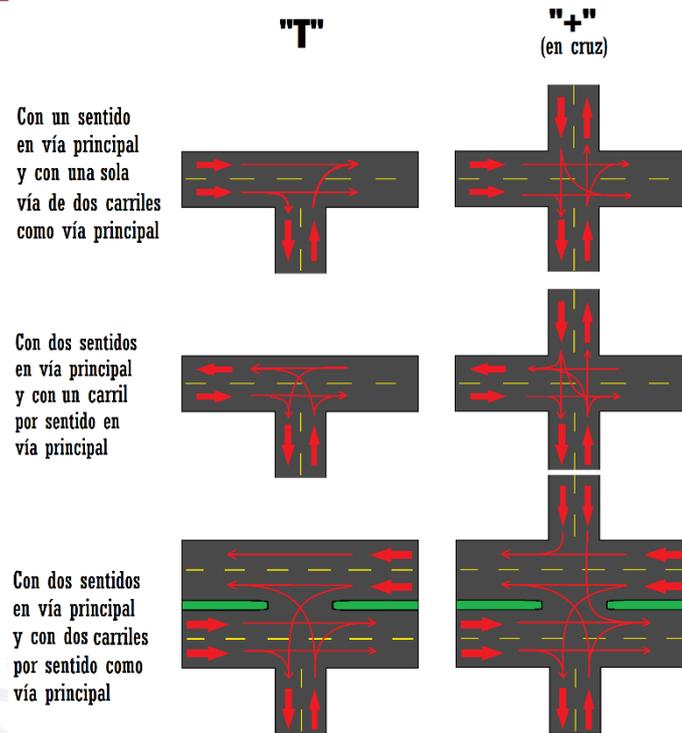


Figura 2. Descripción gráfica de los movimientos vehiculares en intersecciones en forma de "T" y en forma de "+" (cruz). Fuente: propia

Cuando existen intersecciones como estas, se puede apreciar que hay zonas de conflicto entre los distintos flujos vehiculares, tanto de flujos que convergen hacia una misma vía como de aquellos que se dirigen a vías distintas. El detalle de estos dos tipos de zonas de conflicto se aprecia en la figura 3.

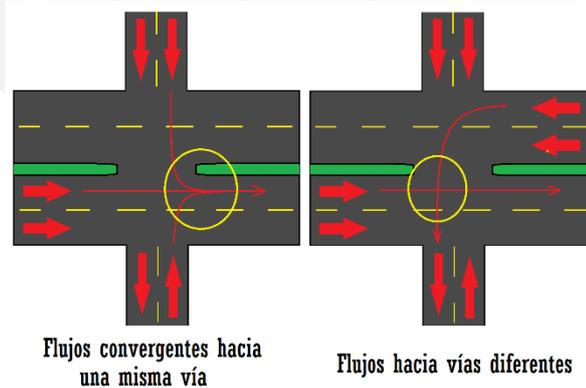


Figura 3. Zonas de conflicto por flujos convergentes y divergentes. Fuente: propia

Para la realización de las maniobras, en este tipo de intersecciones, se produce una tasación de parte de los conductores que esperan en la vía secundaria y desean realizar la maniobra de giro o cruce para introducirse en la vía prioritaria. A los resultados de esta tasación se les denomina brechas aceptadas o rechazadas. El tiempo que dure la maniobra de giro dependerá de la brecha (medida en segundos).

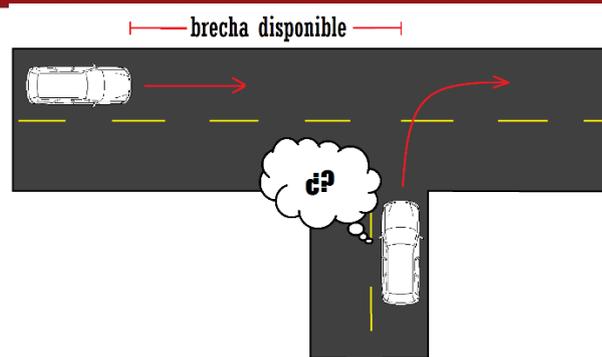


Figura 4. Descripción gráfica de la acción del conductor en la vía secundaria para incorporarse en la intersección. Fuente: propia

Cabe mencionar además, que dentro de esta brecha que necesita el conductor para realizar la maniobra de giro, se considera una holgura de tiempo por razones de seguridad. Además el vehículo en la vía secundaria deberá también estimar, un tiempo extra que le será necesario para que su vehículo logre desarrollar una velocidad que compatibilice su desplazamiento con el de los vehículos que se aproximan en la vía principal y así evitar riesgos de colisión.

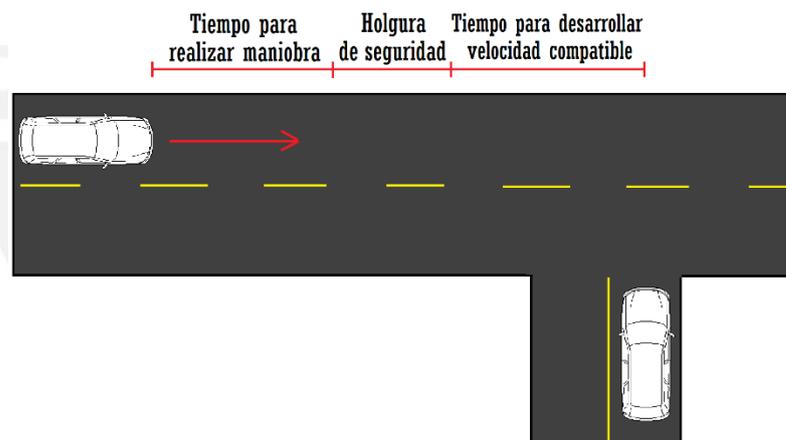


Figura 5. Descripción gráfica de los tiempos implícitos en la estimación de los conductores en la vía secundaria. Fuente: propia

Es oportuno señalar que los comportamientos de los conductores en las vías no siempre están acorde a lo que se estima en los diseños viales, puesto que así como hay conductores que esperan en la línea de parada de la vía secundaria, existen también conductores imprudentes que deciden introducirse en la intersección asumiendo márgenes de tiempo muy pequeños (o prácticamente nulos), ocasionando en el mejor de los casos, que los vehículos en la vía principal deban des-acelerar (en algunos casos bajar la velocidad y en algunos otros frenar completamente).

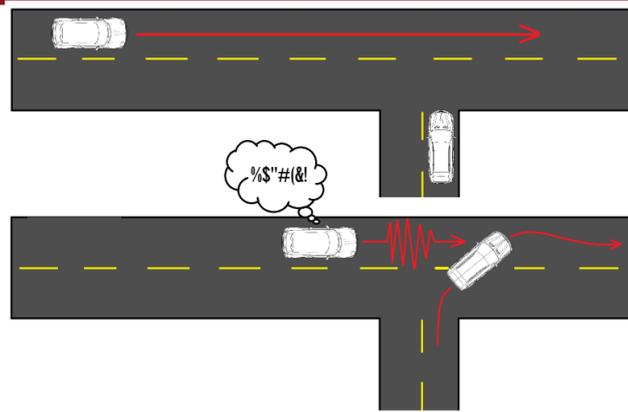


Figura 6. Descripción gráfica de conductores arriesgados que asumen holguras de tiempo peligrosamente pequeñas. Fuente: propia

Cuando un conductor decide que el espacio de tiempo disponible (teniendo en consideración los factores anteriormente mencionados y también otros) para poder efectuar la maniobra es suficiente, se dice que aquella brecha existente es una brecha aceptada. Por el contrario, cuando un conductor decide que la brecha disponible, en ese momento, es insuficiente, entonces decide esperar a que el vehículo en la vía principal pase para esperar otra brecha. En este caso se dice que brecha existente es una brecha rechazada. La secuencia de ambos tipos de brecha se describe en la figura 7.

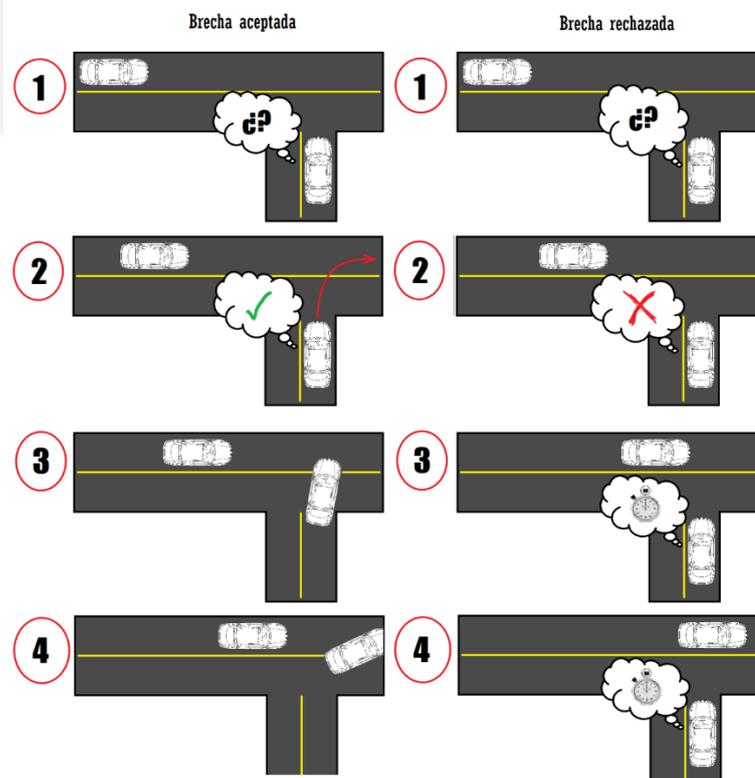


Figura 7. Descripción gráfica de brechas aceptadas y rechazadas. Fuente: propia

### 2.3 Tipos de brechas

Dentro de la investigación, se requieren concretar ciertos conceptos para que exista una comprensión eficaz de las fases de la misma así como también de los resultados finales obtenidos:

- **Intervalo íntegro (“gap” o brecha):** Se le denomina al espacio de tiempo que existe entre el paso de dos vehículos sucesivos que circulan en una misma dirección en la vía principal. Esto se mide marcando un punto fijo referencia en el que el vehículo delantero circula para luego calcular el espacio de tiempo que le toma al vehículo posterior en alcanzar ese mismo punto (Sergio López, 2006).

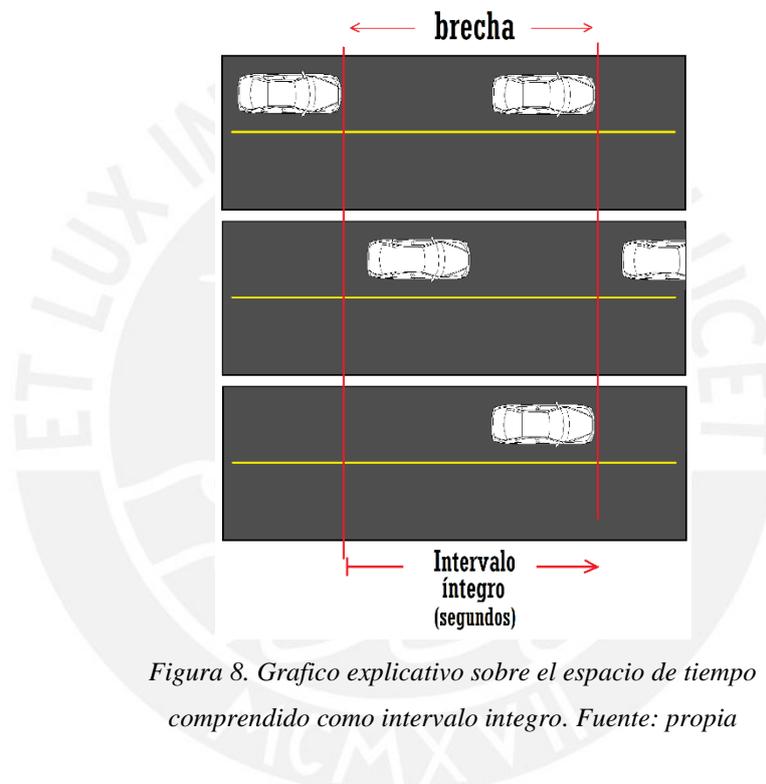


Figura 8. Grafico explicativo sobre el espacio de tiempo comprendido como intervalo íntegro. Fuente: propia

- **Intervalo residual (“lag”):** Se le considera al espacio de tiempo existente después de que el conductor haya aceptado asumir la brecha disponible para introducirse en la intersección e incorporarse al tránsito en la vía principal de forma efectiva y haya desarrollado una velocidad compatible con el flujo vehicular principal (Sergio López, 2006).

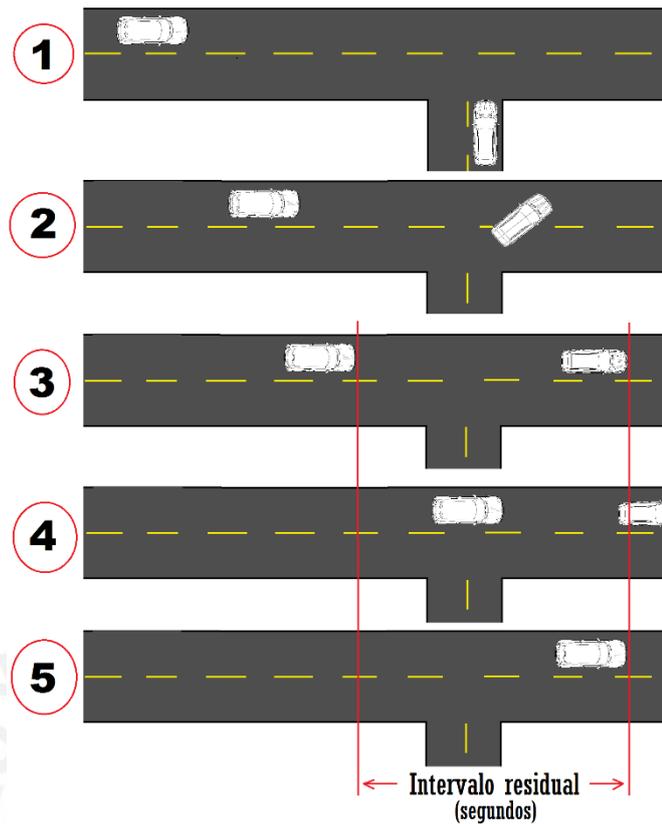


Figura 9. Grafico explicativo sobre el espacio de tiempo comprendido como intervalo residual. Fuente: propia

Respecto del intervalo residual (“lag”), se dice que este es aceptado cuando el vehículo detrás del que se acaba de introducir en el flujo vehicular de la vía principal decide asumir ese espacio de tiempo restante introduciéndose en la intersección inmediatamente tras del vehículo que se acaba de incorporar a la vía principal. En cuanto a la formación de los tipos de intervalos mencionados, podemos hallar las siguientes posibilidades:

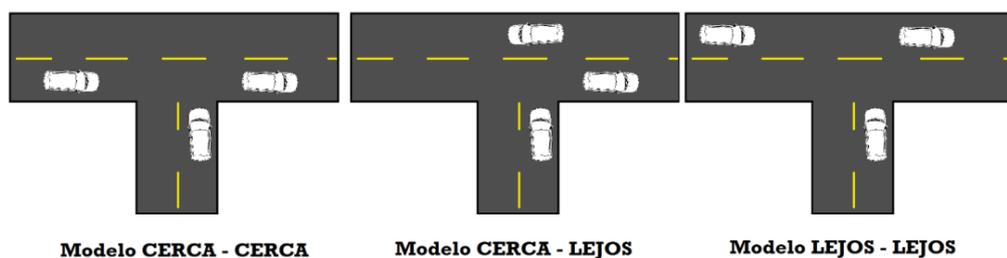


Figura 10. Modelos de tipos de brechas según la distancia de acoplamiento al flujo principal. Fuente: Adaptado Sergio López, 2006

### 2.4 Modelo de brechas

Son modelos teóricos que, se han venido empleando en diversos países como Inglaterra, Chile y

Los Estados Unidos. Estos modelos se basan en dos parámetros fundamentales como son la brecha crítica y el tiempo de avance de la cola.

- La brecha crítica: Es el tiempo mínimo (medido en segundos) necesario para que los conductores puedan realizar una maniobra de giro sin afectar el flujo continuo de los vehículos en la vía prioritaria.
- El tiempo de avance de cola: Es el tiempo (medido en segundos) que demora un vehículo para avanzar hasta la línea de parada.

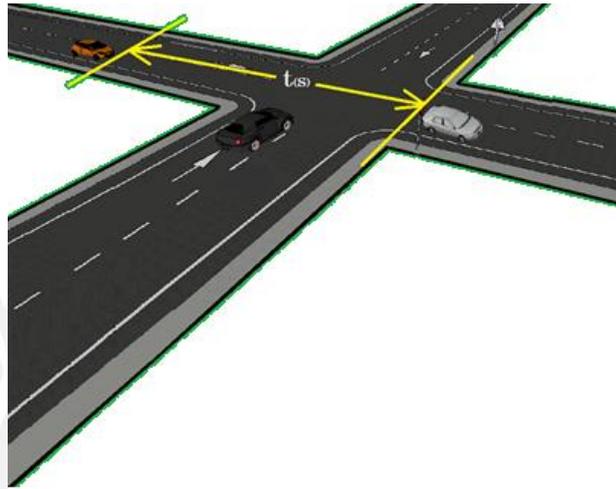


Figura 11. Circulación interrumpida por una intersección. Fuente: propia

Entonces, como resultado de la observación del conductor en la vía subordinada, este asumirá un valor determinado de brecha, el cual deberá ser siempre mayor o igual a un margen de tiempo mínimo requerido para poder realizar la maniobra.

A continuación, se especifican las variables que se consideran en estos modelos:

$q_p$	=	flujo de vehículos en la vía prioritaria vehículos/hora
$Q_p$	=	capacidad de vehículos en la vía prioritaria vehículos/hora
$g$	=	brecha disponible en la vía prioritaria s
$\tau$	=	brecha crítica (s)
$\beta$	=	tiempo de avance de la cola (s)
$\Delta$	=	$1/Q_p$ , el intervalo mínimo entre dos vehículos en la vía prioritaria (s)

Para poder elaborar un modelo que emule eficazmente el comportamiento descrito, se necesitan hacer algunas suposiciones para poder simplificar los distintos casos en circunstancias reales (Fernández, 2011):

**Primera suposición:** La distribución de las brechas de los vehículos en la vía principal es igual. Entonces, los vehículos en la vía primaria son homogéneos. Por lo que, se trabaja con intervalos ( $h$ ) en lugar de brechas.

**Segunda suposición:** El valor de la brecha crítica es siempre el mismo para todos los vehículos en la vía principal. Esto supone que los conductores en la vía secundaria, son constantes.

**Tercera suposición:** El tiempo de avance de cola es siempre el mismo; esto quiere decir que, los vehículos que circulan por la vía secundaria, son homogéneos.

- Aplicación práctica del modelo

Teniendo los supuestos ya definidos, se sabe que un intervalo “*h*” entre dos vehículos que circulan por la vía principal, tiene un valor tal que  $\tau \leq h \leq \tau + \beta$ , por lo que solo un vehículo podrá ejecutar la maniobra. Entonces, si el intervalo disponible está dentro del margen de  $\tau + \beta$   $\beta(n-1) \leq h \leq \tau + n\beta$ , entonces podrá cruzar un número “*n*” de vehículos.

Por lo tanto, sea “*f(n)*” la función que expresa la densidad perteneciente a la probabilidad de que crucen una cantidad “*n*” de vehículos cuando exista una brecha de valor “*h*”, por propiedades estadísticas, podrá expresarse que:

$$f(n) = P(\tau + \beta(n-1) \leq h \leq \tau + n\beta) = F(h = \tau + n\beta) - F(h = \tau + \beta(n-1)) \dots \dots \dots (1)$$

En donde “*F(h)*” es la función perteneciente a la distribución de intervalos y “*P(h)*”, será la probabilidad de que “*h*” asuma un valor determinado. Luego, suponiendo que se conoce el valor “*f(n)*”, el número de vehículos que podrán circular será:

$$E(n) = \sum n \cdot f(n) \dots \dots \dots (2)$$

Siendo “*E(n)*” la cantidad media de vehículos que pueden cruzar en un determinado número de intervalos con diferente duración, disponibles en la vía principal. Posteriormente, la capacidad que describa el acceso secundario, teniendo en cuenta que el intervalo medio es el inverso del valor del flujo, se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q_s = E(n)/E(h) = q_p \cdot E(n) \dots \dots \dots (3)$$

Luego, si se logra calcular el valor de “*E(n)*”, se podrá obtener la capacidad de una intersección vehicular. Para esto, es necesario especificar la función “*f(n)*”, a partir de la función “*F(h)*”, la misma que puede definirse con un cuarto supuesto:

**Cuarta suposición:** La distribución de los intervalos en la vía principal, posee la distribución siguiente (Cowan, 1975):

$$F(h) = 1 - (1 - \theta) e^{-\gamma(\Delta - h)}, \text{ para } h \geq \Delta$$

sabiendo que:  $q_p (1 - \theta) / (1 - q_p \cdot \Delta) \dots \dots \dots (4)$

Esta distribución describe el arribo de vehículos por la vía prioritaria de dos maneras superpuestas:

- De manera aislada, teniendo intervalos distribuidos determinados por la función exponencial negativa (según Poisson)
- En grupos, dentro de los cuales los intervalos que existen entre los vehículos son mínimos, y tienen un valor  $\Delta = 1/Q_p$ ; y sabiendo que la proporción de vehículos en pelotón es “ $\theta$ ”.

Finalmente, al reemplazar la expresión (4) en la (1), se obtiene como resultado la función “E(n)” de la siguiente forma:

$$E(n) = (1 - \theta) (1 - e^{-\gamma \cdot \beta}) \cdot e^{-\gamma(\tau - \beta \cdot \Delta)} \cdot \sum n \cdot e^{-\gamma \cdot n \cdot \beta}$$

Entonces, sabiendo que:  $\sum n \cdot e^{-\gamma \cdot n \cdot \beta} = (e^{-\gamma \cdot \beta}) / (1 - e^{-\gamma \cdot \beta})^2$ , la capacidad al acceso secundario resulta en:

$$Q_s = (q_p (1 - \theta) \cdot e^{-\gamma(\tau - \Delta)}) / (1 - e^{-\gamma \cdot \beta})$$

Por lo tanto, este será el modelo genérico de brechas, el cual está basado en el cuarto supuesto. A partir de este, se pueden derivar modelos más específicos, según supuestos de trabajo adicionales que han sido realizados por distintos autores, tales como:

- **Modelo de Tanner** (Tanner, 1962): En el que se asume que la proporción de vehículos que llega en cola es equivalente al grado de saturación perteneciente a la vía principal:

$$\theta = \frac{q_p}{Q_p} = q_p \cdot \Delta$$

$$Q_s = \frac{q_p (1 - q_p \cdot \Delta) e^{-q_p(\tau - \Delta)}}{1 - e^{-q_p \cdot \beta}}$$

- **Modelo de Gordon y Miller**: En el que se parte asumiendo que el espacio entre vehículos que llegan en grupo por la vía principal puede ser muy pequeño o prácticamente nulo, es decir:  $\Delta \rightarrow 0$ , por lo que se tiene que:

$$Q_s = \frac{q_p \cdot e^{-q_p \cdot \tau}}{1 - e^{-q_p \cdot \beta}}$$

Sin embargo, este modelo presenta una limitación, ya que no prevé que el flujo en la vía secundaria puede estancarse cuando el flujo de la vía prioritaria está saturado.

- **Modelo de Van Vliet:** En este modelo se resuelve la limitación del modelo Gordon y Miller introduciendo un parámetro  $(1-x_p)$ , siendo “ $x_p$ ” el grado de saturación de vehículos en la vía principal el cual es equivalente a  $q_p \cdot \Delta$ , teniendo la ecuación de la siguiente manera:

$$Q_s = (1 - x_p) \frac{q_p \cdot e^{-q_p \cdot \tau}}{1 - e^{-q_p \cdot \beta}}$$

De esta forma, se tiene que si el flujo en la vía principal llega a saturarse, teniendo que:  $q_p = Q_p$ , tendría que:  $x_p = 1$ , obteniendo como resultado que:  $Q_s = 0$  tal y como se espera en la realidad. A continuación se plantea un ejemplo hipotético para una intersección regulada por prioridad con los siguientes datos:

$$Q_p = 700 \text{ veh./hora}, \Delta = 2 \text{ segundos}, \beta = 5.5 \text{ segundos}$$

En este ejemplo, a la brecha crítica se le darán valores de 3 a 7 segundos y se emplearán distintos modelos para determinar la capacidad de la vía secundaria. Estos valores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de capacidades en vía subordinada con distintos modelos para valores de brecha crítica variable. Fuente: propia

Valores de brecha crítica " $\tau$ " (segundos)	Capacidad de la vía secundaria (Qs) según modelo			Máxima diferencia $\Delta\%$
	Tanner (veh./hora)	Gordon y Miller (veh./hora)	Van Vliet (veh./hora)	
3	536	594	364	47%
3.5	487	539	330	48%
4	442	490	299	48%
4.5	401	444	272	47%
5	364	403	247	47%
5.5	330	366	224	47%
6	299	332	203	47%
6.5	272	301	184	48%
7	247	273	167	48%

De los resultados obtenidos se puede destacar que se observan diferentes valores de brecha crítica con diferencias de hasta 48 %. También se observa que para un mismo modelo, las diferencias se acentúan cuando las brechas críticas asociadas son menores, como se muestra en la figura 12.

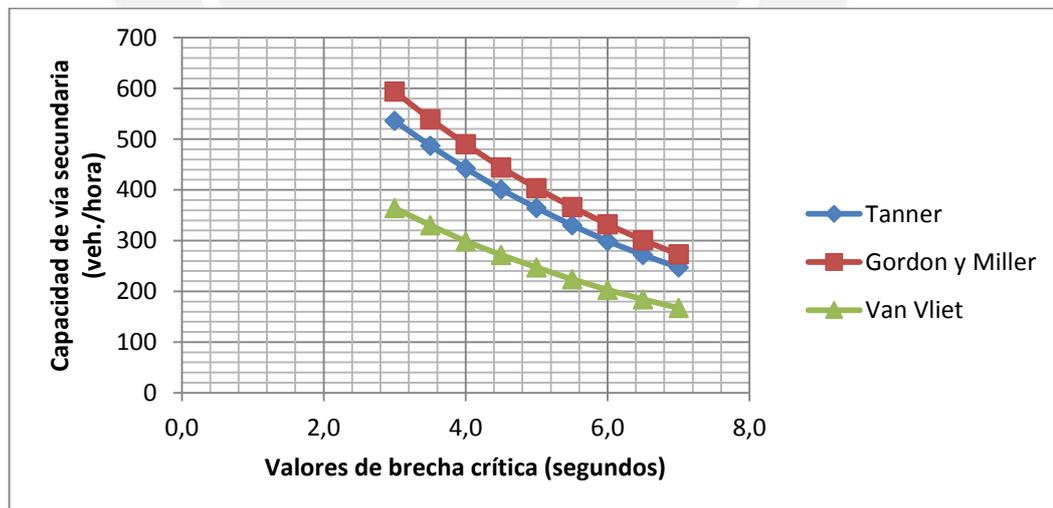


Figura 12. Distribución de cálculos capacidad de vía secundaria empleando distintos modelos para valores de brecha crítica hipotéticos. Fuente: propia

Variaciones como estas son el motivo por el cual se han desarrollado constantemente otras opciones de modelación. Se puede inferir que una de las principales fuentes de incertidumbre

es el valor que se le puede asignar la de brecha crítica ( $\tau$ ) y al tiempo de avance de cola ( $\beta$ ), ambos estimados en segundos.

Por lo tanto, es necesario determinar un valor confiable de ( $\tau$ ) y ( $\beta$ ), para determinar la capacidad de la infraestructura vial. No sería prudente tratar de definir un valor universal para estos, ya que los valores de los mismos dependen principalmente del comportamiento de los conductores, el cual varía según la ciudad o país.

#### 2.4.1 Factores que influyen en el valor de la brecha aceptada

Como se sabe, el valor de la brecha aceptada depende del tipo de conductor, por lo cual, la decisión de aceptar o rechazar está relacionada a tres tipos de factores que pueden influir en su percepción y su comportamiento: factores internos, factores externos y transitivos.

##### ➤ Factores internos

##### El conductor

El conductor es, sin duda alguna, el elemento principal del complejo sistema formado por personas, vehículos y vías que llamamos tráfico. Es un elemento activo que le imprime al tránsito características especiales y cuyo comportamiento es más difícil de predecir (Radelat, 2003).

Las acciones que toman los conductores en un camino provienen de la evaluación y de la reacción a la información que obtienen de ciertos estímulos que oyen o ven y es lo que se llama Proceso de la Respuesta Humana. Sin embargo, la evaluación y la reacción deben desarrollarse en un período muy corto, ya que la información que se recibe en pleno manejo, está en constante cambio (Nicholas, 2005)

Estos factores que influyen en la evaluación y reacción del conductor se detallan a continuación:

- **Motivación:** El conductor tiene siempre presente, aunque sea de una forma subconsciente, el objeto de su viaje. De acuerdo con la importancia que para él tenga este objeto actuará de una manera u otra.

- **Experiencia:** Para conducir un vehículo se requiere un mínimo de inteligencia, pero no basta únicamente con esto. Es preciso un aprendizaje previo para analizar las situaciones y reaccionar ante las mismas antes de que se produzca el accidente.
- **Estado de ánimo:** El miedo, la ira, las preocupaciones, la tristeza, la alegría y todos los estados fuertemente emocionales son causa de que se desorganicen la conducta y las reacciones normales de un conductor.
- **Vista:** Todos los sentidos desempeñan un papel importante mientras se conduce un automóvil. Sin embargo, de todos se podría prescindir sin grave peligro menos de la vista. Prácticamente toda la información que se da al conductor se hace por medios visuales.
- **El tiempo de espera:** El tiempo que un vehículo mantiene en la cola para entrar a la intersección, en cuanto mayor sea, provocará que el conductor será más osado a la hora de esperar una brecha para entrar en la intersección
- **Tiempo de reacción:** Lapso de tiempo que transcurre entre la percepción y el comienzo de la reacción motriz, o sea, mientras el sujeto elabora la respuesta en función de la percepción y que concluye cuando la orden cerebral resultante del proceso psíquico activa el grupo de músculos específicos que ejecutará la acción (maniobra) elegida (Dextre, 2008).

➤ **Factores externos**

**Respecto de la intersección**

El conductor también se ve influido por factores del entorno, los cuales se traducen para él en una serie de parámetros autoimpuestos que determinaran su comportamiento. Estos se detallan a continuación:

- **Uso del suelo:** Según el tipo de actividad a que esté destinado el terreno adyacente a la vía, el conductor adoptará una actitud distinta. Evidentemente, esta actitud no será la misma al atravesar una zona despejada en campo abierto, que un área residencial de alta densidad o que una zona fuertemente industrial. (Wang, 2002)

- **El clima:** Influye de forma ingente en el aspecto de la vía y en todo lo que la rodea. La estación del año o la hora del día pueden afectar las condiciones de visibilidad (Wang, 2002).
- **La vía:** El estado de la vía, el tipo de pavimentación y su trazado condicionan de una manera especial el modo de conducir. Cada conductor responde a las diferentes características de la carretera o de la calle de una manera también diferente. Por eso es muy importante presentarle dichas características en bloque. (Wang, 2002).
- **Geometría de la intersección:** Estas usualmente obedecen a la demanda en cada grupo de carriles, diseño de tiempos de semáforos y las características del tráfico en la zona.
- **Longitud del vehículo:** Los resultados preliminares indican que los vehículos largos reducen el rendimiento, como se espera. (Wang, 2002).

➤ **Factores transitivos**

### **El peatón**

La conducta del peatón en cuanto a su desplazamiento es más impredecible, y este comportamiento no está siempre circunscrito a las normas de tránsito. Pero el peatón tiene mayor capacidad de apreciar las condiciones del tránsito con mayor atención en comparación del conductor, debido entre otras cosas a: la relativa lentitud de su desplazamiento y a tener menores inconvenientes visuales. Sin embargo, muchos peatones obvian las limitaciones perceptivas de los conductores, sobre todo de los menos expeditos.

### **El tráfico en el momento de la maniobra**

La intensidad, la composición, la velocidad, la distribución y todas las características del tráfico son en cierto modo el resultado de la acción de todos los factores descritos hasta ahora sobre todos y cada uno de los conductores. Estos, por su parte, son afectados muy intensamente por todas esas características del tráfico, por lo que se crea un círculo vicioso de acciones mutuas (Valdés Gonzalez-Roldán, 2008)

### ➤ Eventualidades circunstanciales

El comportamiento del conductor también se ve influenciado por factores que no son constantes en la intersección, sino que, están relacionados con la presencia de otros vehículos y peatones en las proximidades. Este tipo de eventualidades se detallan a continuación:

- **Identificación de una colisión potencial:** Conformado por el empleo de medidas para evadir el choque, como el frenado, aceleración o cambio de carril. (Suárez Castaño, 2007).
- **Limites en la distancia de visibilidad:** Los conductores tendrán una visibilidad limitada y variable (Suárez Castaño, 2007).
- **Interacción de vehículos y peatones:** Algunos conductores reducen la velocidad o paran para dejar que otros vehículos se mezclen o incorporen al tránsito de una manera más segura. (Suárez Castaño, 2007).
- **Orígenes y destinos en intersecciones:** Algunos vehículos generan situaciones de conflicto al no girar en las intersecciones porque su origen o destino se ubica en las esquinas de dichas intersecciones (tiendas, supermercados, gasolineras, etc.) (Suárez Castaño, 2007).
- **Desaceleración de vehículos:** En algunos casos el vehículo que realiza la maniobra de acoplamiento a la vía principal asume un tiempo de brecha muy reducido o tarda demasiado en realizar la maniobra, lo que provoca que los vehículos que se aproximan en pelotón por la vía principal deban reducir su velocidad para evitar la colisión.

## 2.5 La brecha crítica

Cuando en una intersección se registran las brechas que los conductores de la vía secundaria deciden aceptar y rechazar, se puede estimar un valor de brecha mínimo requerido por los conductores para ejecutar la maniobra de incorporación al flujo de la vía principal. Este valor de brecha es conocido como la “brecha crítica”, que es determinado a partir de una distribución de brechas aceptadas y rechazadas. Representa el “valor límite”, ya que valores de brechas menores a este, son considerados como tiempos insuficientes para realizar la maniobra de acoplamiento sin interrumpir la fluidez de tránsito en la vía principal. Los valores de brechas mayores a este resultan más que suficientes para que los conductores en la vía subordinada realicen la maniobra de acoplamiento.

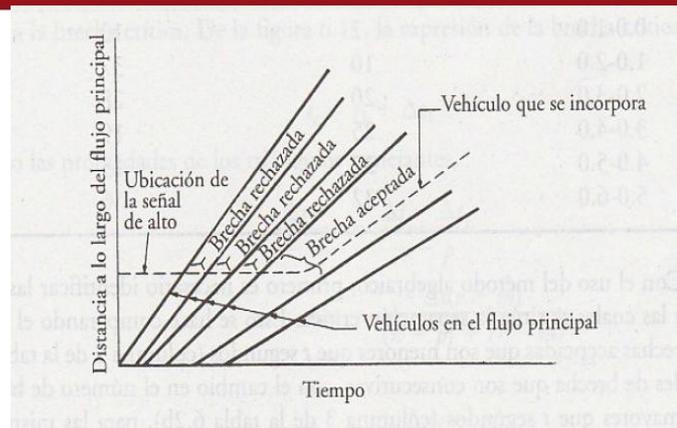


Figura 13. Diagramas espacio-tiempo para vehículos en las cercanías de una señal de alto. Fuente: Nicholas, 2005

En muchos trabajos en los que se emplean diseños geométricos y diversos tipos de análisis de circulación se ha usado el concepto de brecha crítica principalmente para poder calcular la capacidad de las intersecciones.

## 2.6 Métodos para determinar la brecha crítica

El concepto de brecha crítica ha ido cambiando a lo largo del tiempo, pero en general, como se indica en el Highway Capacity Manual 2000, este es “*el espacio de tiempo mínimo en el flujo de la vía principal en el cual se permite la entrada de los vehículos de la vía secundaria*”. Sabiendo esto, se comprende que se hayan desarrollado distintos métodos para la determinación de la misma y cabe mencionar que este valor no es universal, por lo que, en cada locación (ciudad, país, región, etc.) donde se quiera aplicar, lo óptimo es determinarla a partir de estudios que registren las distribuciones de brechas aceptadas y rechazadas por cualquiera de los métodos disponibles. Para fines de este estudio, aplicaremos los dos más usados: el método del percentil 50 y el método de Raff.

- **Método del percentil 50:** Greenshields desarrolló una referencia temprana al espacio de tiempo vacío crítico como el “*espacio promedio mínimo aceptable*”, por lo que define la brecha crítica como aquella que es aceptada por el 50% de los conductores. Su método de aceptación de brechas, como se muestra a continuación, es aún uno de los más simples y utilizados.

El método consiste en clasificar los valores de brechas en un gráfico cartesiano que dispone de las longitudes de brecha (en segundos) en el eje de las abscisas y de una distribución de recurrencia, en porcentaje, en el eje de

las ordenadas. Teniendo esta curva de distribución acumulada, se toma el punto correspondiente al percentil 50 de las brechas.

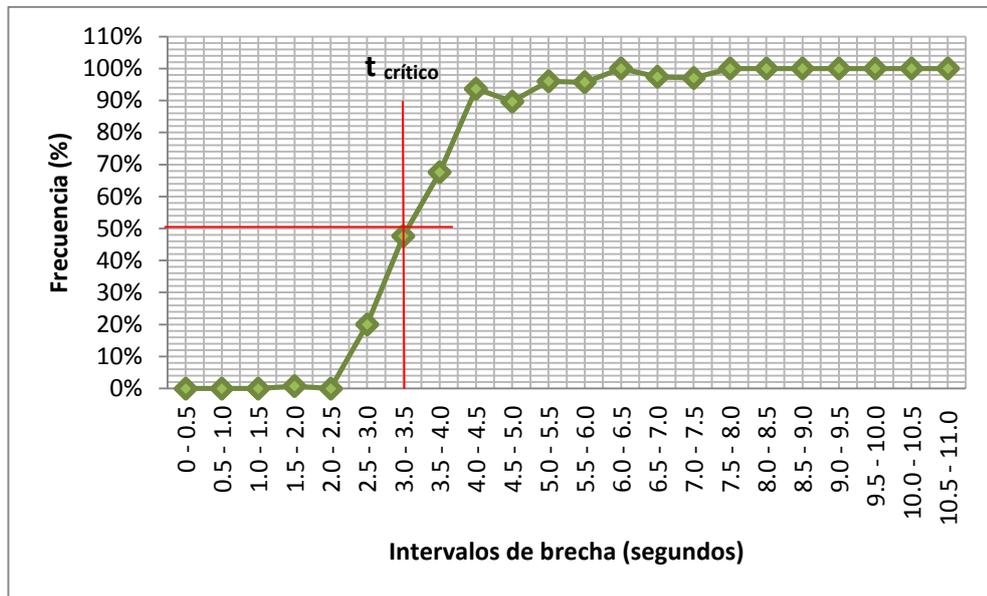


Figura 14. Distribución de brechas en curva de porcentajes acumulada para hallar el percentil 50.

Fuente: propia

- **Método de Raff:** Emplea una gráfica tiempo vs. frecuencia y halla el valor mediante interpolación en la curva de distribución de brechas. Se clasifican distintos valores de brecha según hayan sido aceptadas o rechazadas en función de intervalos de tiempo puntuales (2 segundos, 3 segundos, 4 segundos, etc.)

Tabla 2. Ejemplo hipotético de distribución de brechas aceptadas y rechazadas en intervalos de tiempo

Intervalos de brecha (segundos)	Número de brechas aceptadas	Número de brechas rechazadas
0 - 1	0	116
1 - 2	2	103
2 - 3	12	66
3 - 4	32	38
4 - 5	57	19
5 - 6	84	6
6 - 7	116	8

Luego, estos valores son acomodados en una gráfica cartesiana de distribución, definiendo la brecha crítica como el punto exacto en donde ambas curvas se intersecten.

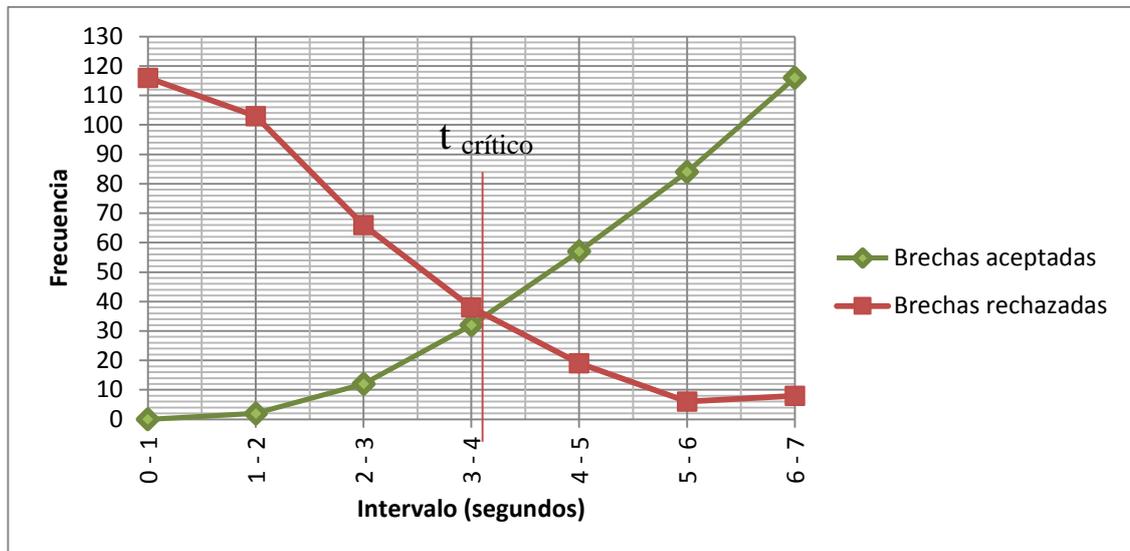


Figura 15. Valor de brecha crítica mediante interpolación por método de Raff. Fuente: propia

Otros modelos incluyendo Ashworth (1970), Siegloch (1973), Harders (1968), Hewett (1983), y Troutbeck (1992) también han sido sugeridos como métodos alternativos para el análisis de la aceptación brecha. Más recientemente, se han propuesto modelos usando muchas metodologías diferentes, tales como modelos de máxima verosimilitud y Logit. (13, 14, 5, 15, 16). De estos, Troutbeck (1992) recibió la mayor parte del uso, aunque debido a su relativa complejidad en comparación con Raff (1950), siguen siendo menos utilizados. Si bien hoy en día existen más de 20 modelos de todo el mundo para la estimación de las brechas críticas, en la práctica los modelos más comunes son la de Raff et al. (1950) y Troutbeck (1992).

Para la mayoría de los ingenieros, la brecha crítica, no se determina a través de estudios de campo, sino mediante la aplicación de fórmulas, como las que se presentan en el Highway Capacity Manual 2000. Cuando se desconocen los valores de brecha crítica de una localidad, se tiende a estimaciones según los métodos del HCM. En la Tabla 3 se presentan los valores de brecha crítica por defecto del manual de carreteras estadounidense HCM-2000.

Tabla 3. Valores de brechas equivalentes a las críticas usadas en Norteamérica. Fuente: HCM 2000

TIPO DE MANIOBRA	NÚMERO DE CARRILES EN LA VÍA PRINCIPAL	
	2	4
Giro a la izquierda desde la vía principal	4.1 seg.	4.1 seg.
Giro a la derecha desde la vía principal	6.2 seg.	6.9 seg.
Movimiento rectilíneo desde la vía secundaria	6.5 seg.	6.5 seg.
Giro a la izquierda desde la vía secundaria	7.1 seg.	7.5 seg.

Esta es la razón principal por la cual es de interés realizar investigaciones de campo, que permitan mejorar las predicciones de los modelos teóricos.

## 2.7 Antecedentes

En cuanto al panorama de los valores de brecha crítica en otros países tenemos lo siguiente:

### En otras culturas fuera de Latinoamérica

En otros países, se han realizado estudios de campo para medir principalmente las brechas, incluso clasificándolas de acuerdo con el tipo de conductor (edad, sexo, visibilidad, etc.). La brecha crítica en conductores más osados se halló en un valor de **2.25** segundos (Tupper, 2011). Entretanto, en países como Nigeria, se realizó el estudio para medir las brechas por días de semana, categorizando por un lado, aquellas tomadas en días laborables (de lunes a viernes), de los días no laborables (sábados y domingos), entre los que halló una brecha crítica de **3.2** segundos (Adbul Kareen, 2001). Mientras tanto, estudios en Oriente Medio arrojan brechas críticas de **3.5** segundos (Al-Taei, 2010), y de **3.38** segundos (Applications, 2014).

### En otros países latinoamericanos

Entre los estudios más destacados para determinar la brecha crítica, se encuentra realizado por la Universidad Nacional en Medellín, en el cual mediante distintos escenarios de microsimulaciones haciendo uso del software VISSIM, y distintos tipos de “conductas”, vistas en los conductores, se hallaron brechas que fluctúan alrededor de los **3.0** segundos (Suárez Castaño, 2007), además se debe acotar que estos resultados, al ser obtenidos

mediante simulación de software, no ofrecen valores confiables, puesto que se obtiene un resultado en base escenarios no reales, basados en datos que pretenden acercarse a la realidad de forma no tangible. En otros estudios independientes realizados en Argentina, mediante observaciones de campo, se determinaron brechas críticas entre **4.2** y **6.7** segundos (Galarraga-Herz-Albrieu, 2005) en intersecciones de características similares. Se puede observar que los valores obtenidos por ambos métodos dan resultados considerablemente diferentes.

### **En el Perú**

En el Perú, no se cuenta con estudios de parte de las autoridades zonales (gobiernos regionales y locales), ni estudios independientes. Muchos de estos valores (incluido el de la brecha) son basados en los criterios subjetivos de cada ingeniero y no existe un antecedente para poder tener una primera aproximación de este valor. Por esta razón se realiza el presente estudio.



## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION

Para el desarrollo del estudio se realizó primeramente una inspección en los mapas de la ciudad de Lima para seleccionar las posibles intersecciones en “T” y en “+” (cruz). Luego, según una serie de requisitos verificados en las visitas de campo, se fue descartando poco a poco para resultar en un grupo selecto final, las cuales fueron objeto de estudio. Este proceso se dividió en fases para asegurar principalmente cuatro aspectos:

- 1) Que el tamaño de la muestra de brechas sea adecuado.
- 2) Elegir periodos de estudio fuera de la congestión vehicular que puedan generar maniobras irregulares, prohibidas y riesgosas.
- 3) Que las maniobras realizadas por los conductores desde la vía subordinada sean determinadas por la estimación de las brechas disponibles en la vía principal. Para esto, se eligieron vías principales con máximo dos carriles, puesto que de tener más, la brecha existente en dos vehículos en la vía principal no influye en la realización de la maniobra.
- 4) Que las maniobras realizadas por los conductores desde la vía subordinada describan, en su mayoría, la trayectoria sujeta al diseño geométrico, es decir: que conste de un giro continuo que permita la inserción.

A continuación se detallan los métodos que se siguieron para el estudio: desde el proceso para seleccionar las intersecciones a partir de las cuales se registrarán las distribuciones de brechas aceptadas y rechazadas, hasta los criterios para aceptar o rechazar muestras de datos recolectadas.

#### 3.1 Metodología de selección de intersecciones

En las intersecciones seleccionadas, las vías convergentes tenían una superficie llana y una rasante horizontal, es decir, se rechazaron para el estudio, intersecciones en las que alguna de las vías subyacentes tenía una pendiente considerable. También, se seleccionó aquellas en las que, dentro de la vía principal, no existían dentro de una distancia de por lo menos 100 metros, elementos puntuales en la vía principal, que pudieran inducir a que los conductores reduzcan su velocidad, tales como baches significativos, pasos elevados para peatones, semáforos, etc. o combinaciones de estas. Esto se detalla en la figura 16.

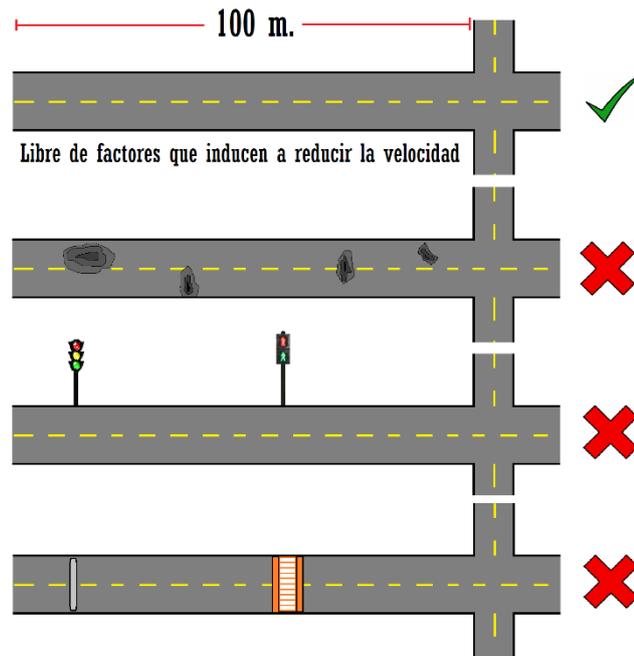


Figura 16. Características de intersecciones elegidas para el estudio. Fuente: propia

En cuanto a los flujos vehiculares en las intersecciones, estos fueron razonablemente altos: no muy pocos como para que no se originen las suficientes brechas aceptadas y rechazadas entre los vehículos de ambas vías, ni muy altos, como para que se generen colas de vehículos y congestión cambiando completamente la naturaleza de las intersecciones, puesto que el propósito de este estudio consta de medir las brechas cuando el desplazamiento de vehículos en la vía principal concuerda con los supuestos de los modelos de brechas.

Como objeto del estudio, no fueron consideradas las brechas en las vías principales, en las que los conductores en cualquiera de las vías, realizaron maniobras de giro que no sean coherentes con el diseño geométrico de la intersección, ni tampoco aquellas en las que las maniobras hayan perturbado el flujo continuo de vehículos en la vía principal. La descripción de esto se grafica en la figura 17.

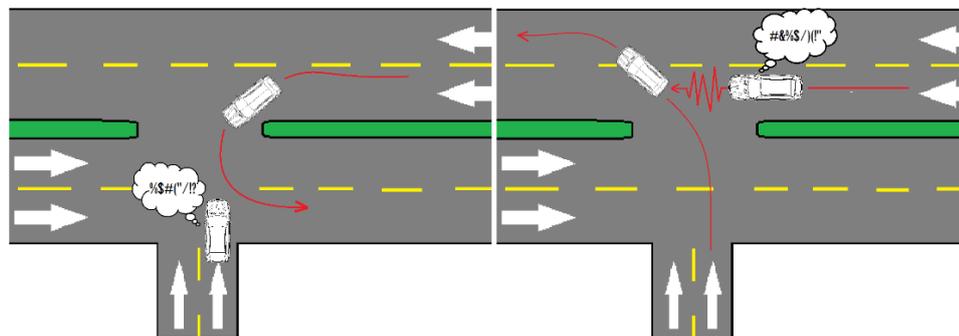


Figura 17. Descripción de maniobras en la intersección cuyas brechas no fueron consideradas para el estudio. Fuente: propia

La selección de las intersecciones se realizó mediante las siguientes fases:

- **FASE 1: Características generales**

La primera fase de la recolección de datos de campo, consistió en ir a las intersecciones preseleccionadas que tenían, a simple vista, la configuración requerida para el estudio, es decir, intersecciones en “T” y “+” (en cruz). Para la selección de este primer grupo de intersecciones, se detallaron una serie de características que sirvieron de criterio de clasificación. Estos rasgos fueron adoptados en un formato de toma de datos los cuales se describe a continuación:

- **Tipos de intersección:** Para el estudio se contempla trabajar con brechas que son resultados de maniobras de giro a la derecha y la izquierda en intersecciones cuyas vías se crucen en ángulo de  $90^\circ$  (puesto que también hay intersecciones en “Y”). Por lo cual, las intersecciones a estudiar podrán ser de tres tipos como se indica en la figura 18:



Figura 18. Tipos de intersecciones elegidas para el estudio. Fuente: propia

- **Descripción de movimientos:** Para las intersecciones preseleccionadas visitadas, se esbozaron los movimientos de vehículos que convergen en la intersección. Estos se describen en la figura 19.

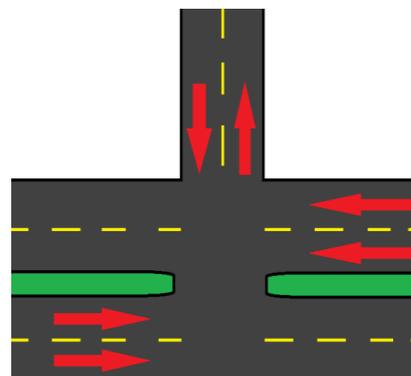


Figura 19. Ejemplo esquemático de descripción de los flujos en intersección. Fuente: propia

- **Cerca de semáforo, pasos elevados u otros elementos puntuales (100 m.):** Se eligieron intersecciones en las que no había presencia de semáforos vehiculares dentro de una distancia de 100 metros en la vía principal. De igual forma, se eligieron aquellas que no tuvieran presencia de semáforos para peatones, pases elevados para peatones, cruceros peatonales, o cualquier otro elemento puntual similar que induzca a reducir la velocidad de los conductores.
- **Estado de la vía:** Para los fines de este estudio, se analizó los valores de brechas para intersecciones cercanas a las condiciones ideales de las vías (de forma especial, baches en la zona de maniobra) para así asegurar y definir el comportamiento del mismo sin factores externos considerables que afecten la velocidad de la incorporación al flujo principal.

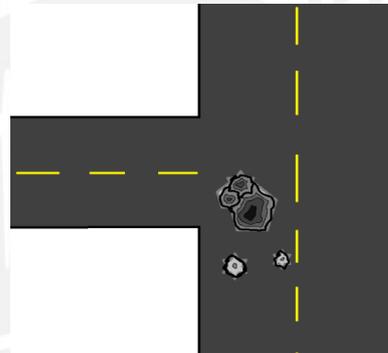


Figura 20. Intersección con presencia de baches en la zona de giro. Fuente: propia

Para fines de esta primera selección de intersecciones, se clasificó el estado del pavimento, en la zona de la intersección, como BUENA (sin presencia significativa de baches), REGULAR (presencia baches) y MALA (con presencia importante de baches). Para dar una idea más exacta de la descripción de los estados de pavimento, se presenta en la Figura 21.



Figura 21. Descripción de estados de pavimento para la fase 1. Fuente: propia

- **Cerca de rotonda, estacionamientos u otros elementos de diseño geométrico (100 m.):** Para fines del estudio y que el resultado del mismo sea representativo, la vía principal debe poder ofrecer a los conductores que se aproximan la libertad de desarrollar velocidad sin impedimentos considerables. Para esto, es necesario que es las intersecciones, dentro de una distancia de 100 metros, no haya presencia de rotondas, curvas, pendientes muy pronunciadas, etc., y de todo elemento que pueda significar un condicionante para los conductores. Asimismo, también será necesario que es las intersecciones elegidas, dentro de la misma distancia, no haya presencia de estacionamientos, paraderos, reductores de velocidad, otras intersecciones, etc., elementos que, antes o después de la vía subordinada, puedan inducir que desde antes del cruce con la vía secundaria, los vehículos en la vía principal, reduzcan su velocidad, ya que esto alteraría los valores de brecha en condiciones normales.

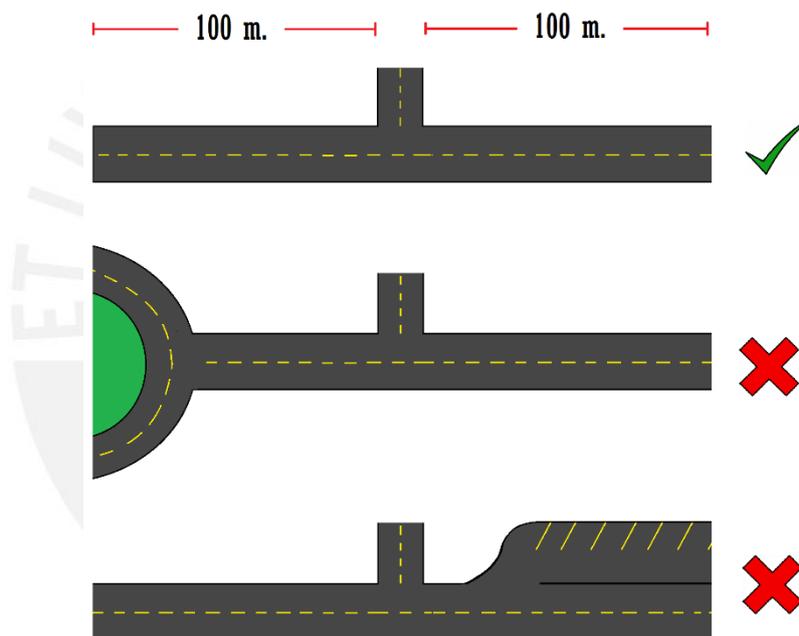


Figura 22. Condiciones de diseño geométrico cercanos para las intersecciones elegidas para el estudio. Fuente: propia

- **Visibilidad para el giro:** Las intersecciones preseleccionadas fueron calificadas cualitativamente para estimar la visibilidad. Se terminaron eliminando de la lista aquellas intersecciones que presentaban una visibilidad inadecuada, debido a la presencia de distintos factores (poco ancho de vereda, presencia de vegetación, paraderos informales en la adyacentes, uso de la vía principal como estacionamiento dificultando la visibilidad, etc.). Posteriormente para las intersecciones elegidas, se realizó una medición más específica.

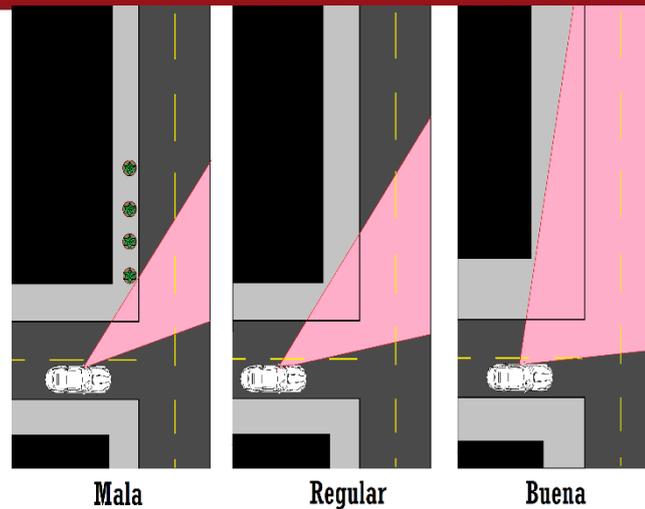


Figura 23. Descripción gráfica de los tipos de visibilidad disponibles. Fuente: propia

- **Velocidad de circulación en vía principal:** No se emplearon instrumentos para la medición inicial de los vehículos que se aproximaban por la vía principal, solo se procedió a calificar si los vehículos tendían a mantener una velocidad baja y constante a lo largo de la vía principal (calificándolo como BAJA), si los vehículos circulaban a velocidades mayores y constantes por la vía principal (calificando como REGULAR), y finalmente, si los vehículos se aproximaban con velocidad notablemente mayor tendiendo a acelerar (calificándolo como ALTA).
- **Observaciones:** En las visitas a campo del primer grupo de intersecciones preseleccionadas, se observaron además factores influyentes como la presencia de paraderos informales, presencia de reductores de velocidad en la vía principal, exceso de vegetación, carteles publicitarios y pendientes muy pronunciadas tanto en las vías principales como en las vías secundarias de cada intersección. Estos factores terminaron por descartar varias de las intersecciones inicialmente elegidas para el estudio. Además, en algunas otras, se pudo observar que si bien las condiciones de la intersección eran idóneas para el estudio, estas no presentaban el flujo vehicular adecuado, puesto que eran o muy bajos (largos ratos sin que circule vehículo alguno en la intersección) o muy altos (formando colas de vehículos en ambas vías de la intersección).

Ya que el flujo vehicular que converge en la intersección es un factor determinante para la aceptación de las brechas, los flujos que convergen en la intersección deben ser de por lo menos **400 vehículos/hora** en la vía principal y por lo menos **100 vehículos/hora** en la vía subordinada (Valdez y Rivera, 2012). Otro factor considerado en la visita de las

intersecciones, era el número de carriles en las vías principales, que llegaban a ser hasta 4 o 5 en algunos casos. Esto se consideró fuera del ámbito de este estudio, ya que lo que se busca es cuantificar mediante el valor de la brecha, el espacio de tiempo que el conductor asume entre dos vehículos. Al haber muchos carriles, los conductores en la vía principal pueden cambiar de carril y la maniobra del conductor en la vía secundaria podría ser consecuencia de un proceso complejo de interacción vehicular que escaparía al concepto básico de las brechas.

Para la efectiva recolección de todos estos datos iniciales (Fase 1), se elaboró un formato que se presenta en la Tabla 4



Tabla 4. Formato de toma de datos para FASE 1

INTERSECCIÓN	Tipos de intersección			Descripción de flujos	Cerca de semáforo, pasos elevados u otros elementos puntuales (100 m)		Estado de la vía			Cerca a rotonda, estac. u otros elementos de diseño geométrico (100 m)		Visibilidad para el giro			Velocidad de circulación en la vía principal			Observaciones
	en "T" con un sentido en vía principal	"T" con dos sentidos en vía principal	en cruz "+"		SI	NO	MALO	REGULAR	BUENO	SI	NO	MALA	REGULAR	BUENA	BAJA	MEDIA	ALTA	
Av. Sucre con Jr. Ayacucho			X	Doble sentido vía secundaria. Doble sentido vía principal	X			X		X		X			X			Uso de intersección como paradero informal
Av. Separadora Industrial con Cueto Fernandini	X			Doble sentido vía secundaria. Un sentido vía principal		X		X		X			X			X		

Finalmente, tomando en cuenta estas observaciones y habiendo descartado las intersecciones que presentaban factores ajenos a los objetivos de la investigación, se procedió a una segunda fase en la cual se recolectaron los diferentes datos de campo.

- **FASE 2: Geometría de las intersecciones y visibilidad**

En esta segunda fase se procedió a recolectar datos geométricos de las mismas. A continuación se presentan las descripciones de las mediciones tomadas. Los datos recolectados en campo de las intersecciones se presentan en la parte de anexos. Las mediciones específicas que se tomaron para cada intersección se describen en la figura 24.

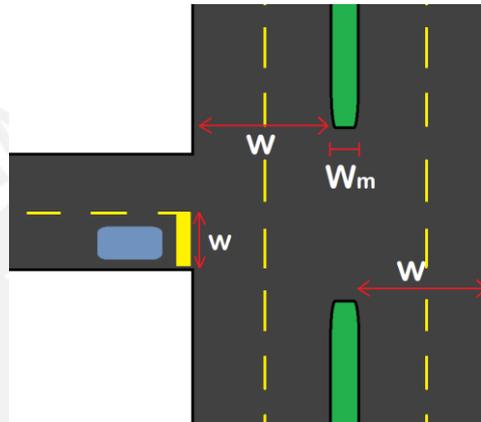


Figura 24. Descripción de la geometría en intersección regulada por prioridad.

Fuente: propia

$W_m$	:	Ancho de la media en la vía prioritaria (si es que existe)
$W$	:	Ancho de la vía prioritaria
$w$	:	ancho del carril del movimiento secundario

Además de las mediciones geométricas, se procedió a determinar los rangos de visión que existen desde la vía secundaria, los cuales se muestran en la figura 25.

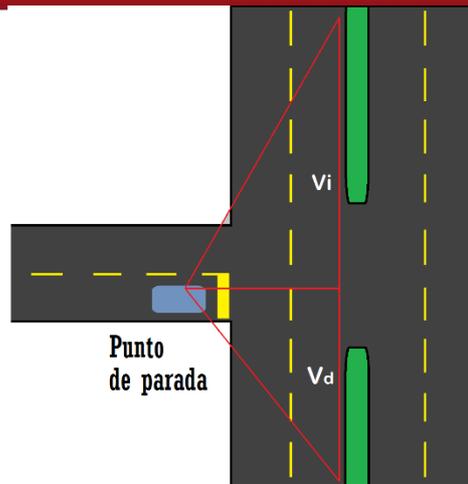


Figura 25. Esquema de visibilidad desde el acceso secundario. Fuente: propia

- Vi : Visibilidad hacia la izquierda desde el acceso secundario  
 Vd : Visibilidad hacia la derecha desde el acceso secundario

Para la medición de la distancia de visibilidad a la izquierda ( $V_i$ ) y de la distancia de visibilidad a la derecha ( $V_d$ ), se definió en la vía secundaria el denominado punto de parada, el cual es el punto en la vía secundaria desde donde los conductores observan a los vehículos que se aproximan por la vía principal para tazar la brecha disponible y realizar posteriormente la maniobra de incorporación a la vía principal.

En muchos casos el punto de parada no era el mismo, así que en campo, se optó por definir un punto de referencia en donde los conductores podrían observar los vehículos aproximándose por la vía principal. Es a partir de ese punto referencial en la vía secundaria de donde se evaluó la visibilidad a ambos lados, considerando todo obstáculo inamovible en la vereda o en la misma vía principal. El detalle de la determinación del punto de parada se expone en la figura 26.

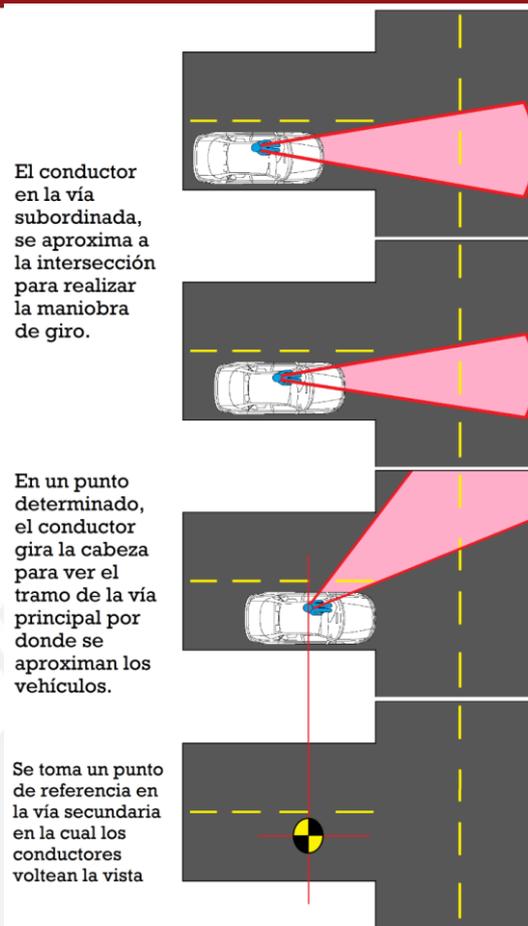


Figura 26. Determinación del punto de parada en vía secundaria. Fuente: propia

### - FASE 3: Medición de flujos vehiculares

Una vez que se seleccionaron las intersecciones, se procedió a medir los flujos vehiculares en las mismas, haciendo conteos para cada maniobra por espacio de tiempo de una hora. Una vez obtenidos esos datos de flujo, se procedió a descartar para el estudio aquellas en las que el flujo vehicular en la vía principal era menor a **400 vehículos/hora** para que exista una medición estimable de las brechas, de lo contrario, una vez realizada la toma de datos en video, no habría suficientes muestras de brechas obtenidas para determinar con suficiente confiabilidad el valor de la brecha crítica.

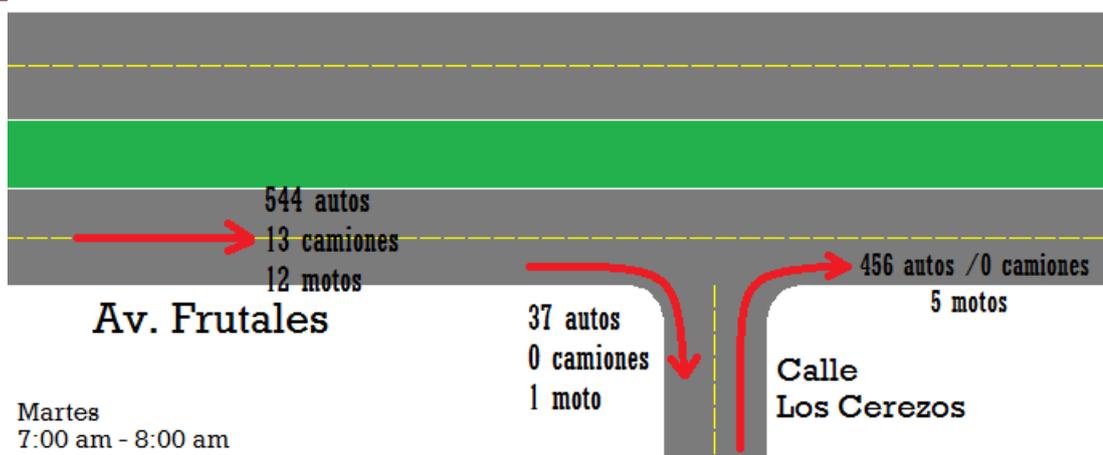


Figura 27. Ejemplo de flujograma en intersección

Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina. Fuente: propia

Los flujos en las intersecciones se plasmaron en diagramas similares al de la figura 27. Los flujogramas correspondientes a las otras intersecciones se muestran desde el Anexo 1 hasta el Anexo 3.

Con los flujogramas, se determinó donde habría más interacciones entre vehículos en la vía principal y la secundaria, lo que determinó la ubicación de la cámara de grabación (filmadora).

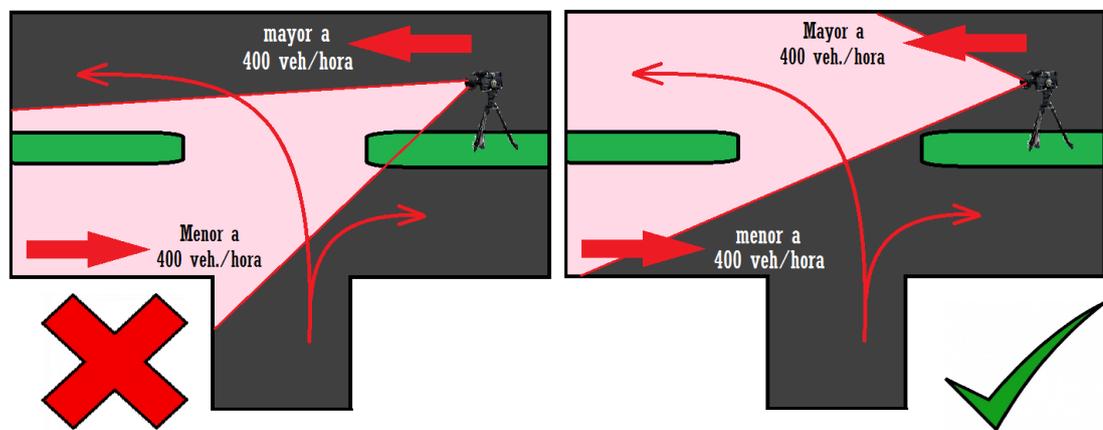


Figura 28. Descripción de elección de punto de grabación. Fuente: propia

### 3.2 Intersecciones elegidas para el estudio

Los distritos en los cuales se realizó el estudio fueron los siguientes: Pueblo Libre, La Molina y Ate-Vitarte.



Figura 29. Distribución en Lima Metropolitana donde se realizaron las recolecciones de datos.

Fuente: propia

Como se aprecia en la figura 29, los distritos en los cuales se decidió tomar los datos, están ubicados en la parte central de la ciudad, que es en donde la concurrencia de vehículos es mayor, y en la periferia de la ciudad, donde la concurrencia de vehículos suele ser menor. Esto es para que la muestra de datos a obtener, nos brinde una idea del tránsito en la ciudad de Lima.

Las intersecciones elegidas, para el estudio de las brechas se detalla en la Tabla 5, mientras que las intersecciones elegidas para el estudio de los tiempos de avance de cola se detallan en a Tabla 6.

Tabla 5. Detalle de las muestras tomadas para el estudio para la determinación de la brecha crítica

Intersección	Distrito	Número de carriles		Tipo de maniobra a estudiar	
		Vía principal	Vía secundaria	Giro a la derecha	Giro a la izquierda
Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra	Pueblo Libre	4	2	X	
Av. Del Río con Calle General Borgoño	Pueblo Libre	4	2		X
Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini	Ate-Vitarte	2	2		X
Av. Los Frutales con Calle Los Cerezos	La Molina	2	2	X	

Tabla 6. Detalle de las muestras tomadas para el estudio para la determinación del tiempo de avance de cola

Intersección	Distrito	Número de carriles	
		Vía principal	Vía secundaria
Av. Los Frutales con Calle Los Cerezos	La Molina	2	2

La primera intersección elegida fue la perteneciente al cruce de la Avenida Frutales con la Calle Los Cerezos, en el distrito de La Molina, cuya ubicación se presente en la figura 30.



Figura 30. Fotografía y ubicación Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina.

Fuente: propia

Esta primera intersección fue elegida debido a que la Av. Frutales consta de una vía de cerca 1.2 Km. de largo sin semáforos, desde la Av. Javier Prado Este hasta la Av. Separadora Industrial, lo que proporciona a los conductores longitudes suficientes para poder desarrollar velocidad. Sin embargo, en esta avenida existe presencia de reductores de velocidad ubicados cada 200 m. o 300 m. los que inducen a los conductores a desacelerar cada cierta distancia. La Calle Los Cerezos es la que tiene más distancia de separación entre dos reductores de velocidad consecutivos, por lo que dispone de un tramo suficientemente largo, para que los vehículos en la vía principal, puedan desarrollar libremente su velocidad. Las ubicaciones de las otras tres intersecciones se detallan desde el Anexo 4 hasta el Anexo 6.

Además, se tomaron medidas en campo para determinar la geometría de las intersecciones, incluyendo además la determinación de la Vista Izquierda y la Vista Derecha de los

conductores que provienen de la vía subordinada. El detalle de la geometría de la primera intersección se detalla en la figura 31.

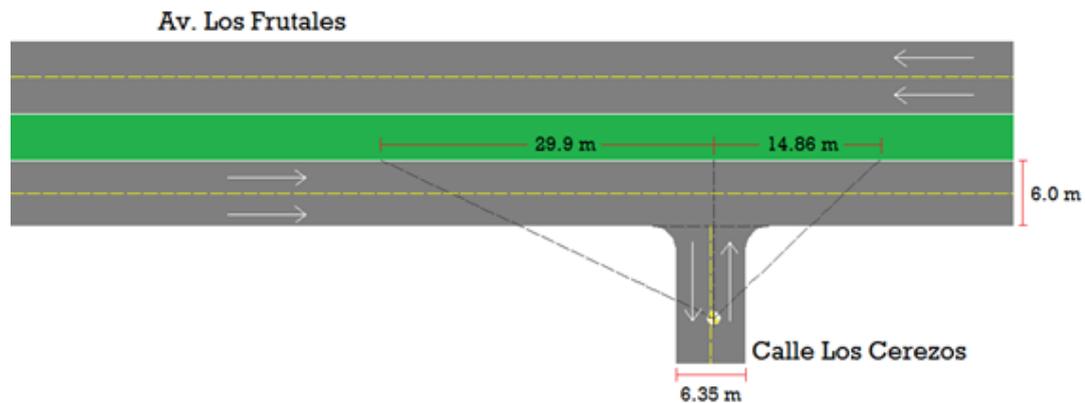


Figura 31. Descripción geométrica de intersección: Ancho de vías, vista izquierda y vista derecha. Intersección Av. Los Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina. Fuente: propia

La descripción geométrica de las demás intersecciones se muestra desde el Anexo 7 hasta el Anexo 9. Luego de recolectar los datos geométricos de las intersecciones, se procedió a recolectar los datos respectivos de brechas y de tiempos de avance de cola.

### 3.3 Metodología de recolección de muestras

Para esta etapa se siguieron las recomendaciones de (Sai Abhishek, 2014) con algunas adaptaciones, que a continuación se presentan:

- Las brechas serán registradas en una filmación continua a lo largo de las horas de estudio en la misma intersección (con una resolución de 30 fotogramas por segundo)
- Angulo entre las vías de  $90^\circ (\pm 10)$
- Intersecciones sin presencia considerable de vehículos no motorizados

Para la recolección de datos, se tomaron grabaciones continuas, permitiendo de esta forma contemplar un espacio de tiempo suficiente en el cual se puedan apreciar períodos picos y valles en días de semana, ya que en estos, el tránsito es típico. Los periodos de grabación para cada una de las intersecciones se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7. Detalle de periodos de grabación para cada intersección

Intersección	Distrito	Periodo de grabación
Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra	Pueblo Libre	8:00 - 4:00
Av. Del Río con Calle General Borgoño	Pueblo Libre	8:00 - 4:30
Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini	Ate-Vitarte	8:00 - 4:30
Av. Los Frutales con Calle Los Cerezos	La Molina	7:30 - 4:30

Para lograr las filmaciones, se usó una filmadora con un trípode, colocado en posiciones estratégicas para así poder captar en lo posible todas las maniobras alrededor de la intersección. En algunas intersecciones los vecinos permitieron el acceso a sus azoteas para poder lograr un ángulo de filmación adecuado.



Figura 32. Filmadora colocada en azotea en edificio adyacente a intersección Av. Del Río con Calle General Borgoño. Fuente: propia

En algunas otras intersecciones esto no fue posible debido a la negativa de los vecinos o porque no había edificios con altura suficiente adyacente a las intersecciones, por lo que la grabación se realizó desde dentro de un vehículo que tuviera una vista perpendicular a la vía principal para así poder medir las brechas existentes.



Figura 33. Filmación realizada desde dentro de vehículo particular conectada a la batería. Fuente: propia

En cuanto a la primera intersección elegida, la perteneciente al cruce de la Av. Frutales con la Calle Los Cerezos, el punto de ubicación de la cámara se detalla en la figura 34.

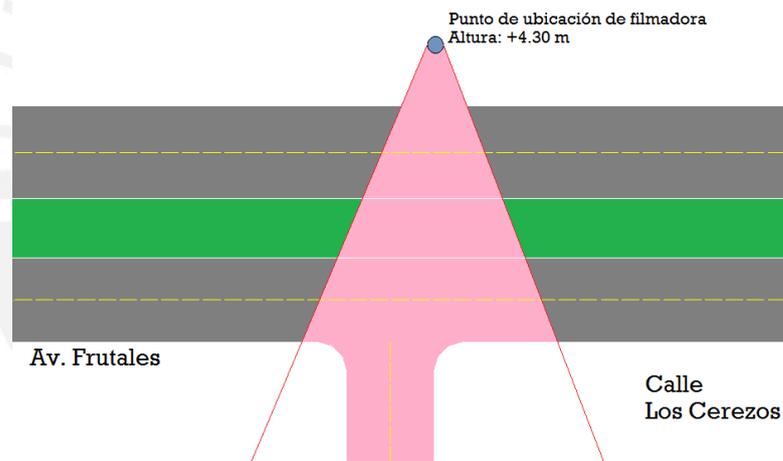


Figura 34. Detalle de ubicación de filmadora en intersección Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina. Fuente: propia

El detalle de los puntos de ubicación y la altura respecto del nivel del pavimento, de las otras intersecciones se detalla desde el Anexo 10 hasta el Anexo 12. En cuanto al tamaño de muestras a recolectar, se empleó la expresión siguiente:

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{E} \right)^2$$

Con un margen de error (E) igual a 0.5. Un valor de desviación estándar ( $\sigma$ ) teórica de 3 y “ $Z_{\alpha/2}$ ” de 1.96 (de un 95% de confiabilidad). Con esto se determinó que 138 es el tamaño de muestra suficiente para asegurar el grado de precisión expresado por la ecuación en los periodos de análisis respectivos

de cada intersección.

A lo largo de las horas de filmación en cada intersección, se lograron recolectar tamaños de muestras que iban entre 400 a 500 (de brechas aceptadas) y tamaños de muestras de 500 a 600 (de brechas rechazadas), por lo que, para la determinación de la brecha crítica, se pudo dividir en intervalos de horas relacionados a las concurrencias vehiculares (veh./hora) pertenecientes a períodos pico (donde el tránsito es mayor) y períodos valle (donde el tránsito es mucho menor).

Luego de haberse recolectado los datos, se efectuó el trabajo de gabinete, en el cual, se extrajeron los datos puntuales de los videos capturados, así como también las anotaciones manuales de las hojas de campo. Los valores de brechas recolectadas se clasificaron de dos formas distintas para la determinación de las brechas críticas:

- En intervalos de **medio segundo** (entre 0.5 – 1.0 segundos, entre 1.0 – 1.5 segundos, entre 1.5 – 2.0 segundos, etc.) para la determinación de las brechas críticas empleando todos los valores de brechas a lo largo de todo el día de estudio.
- En intervalos de **un segundo** (entre 0 – 1 segundos, entre 1 – 2 segundos, entre 2 – 3 segundos, etc.) para la determinación de las brechas críticas empleando valores de brecha registrados dentro de los periodos de análisis variables.

Debido a la gran cantidad de muestras recolectadas, se pudo determinar, para una misma intersección, no solo un valor único de brecha crítica, sino además valores de brecha crítica considerando periodos de tiempo más cortos, determinados por la concurrencia vehicular. A lo largo de las horas de estudio para cada intersección, se determinaron además los flujogramas por intervalos de horas (de 8:00 a 9:00, de 9:00 a 10:00, de 10:00 a 11:00, etc.). Con ellos se determinaron los períodos pico y valle, que se emplean para analizar las brechas críticas. El comportamiento del tránsito vehicular no es constante a lo largo del día, por lo que con esto se logra conocer el comportamiento de los conductores a un grado de precisión mayor.

Una vez obtenidos los resultados, se procedió a extraer las conclusiones acerca de los comportamientos de los conductores en las zonas analizadas en la ciudad de Lima. Cabe aclarar que para lograr la efectiva extracción de los datos de intervalos, se tomó en consideración no solo a los autos particulares, sino también a las unidades de transporte público pequeñas y medias pero exceptuando a los vehículos pesados que llegaran desde la vía subordinada, puesto que el estudiar el comportamiento de estos y de su interacción con los otros conductores es materia de un estudio independiente adicional a este trabajo.

Dentro de la extracción de datos a partir de los videos, no se consideraron aquellas brechas con valores mayores o iguales a **11 segundos**. Este tiempo se determinó puesto que es el tiempo máximo que tarda un vehículo en la vía principal, en llegar a la intersección y ser visible por un conductor en la vía subordinada. Este tiempo fue determinado por observaciones en campo. Se desprende que para las brechas registradas en video, cuyos valores fueron iguales o mayores a los 11 segundos ( $t_{\text{máx}}$ ), los conductores que realizan la maniobra de acoplamiento desde la vía subordinada, no ven ningún vehículo e inmediatamente después, ejecutan la maniobra de giro.

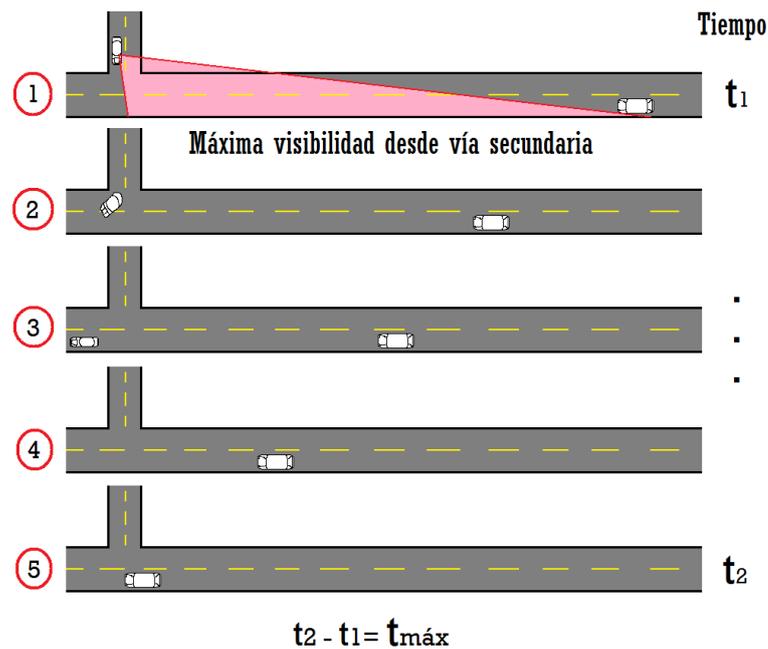


Figura 35. Determinación del tiempo máximo de brecha analizable. Fuente: propia

Este valor de  $t_{\text{máx}}$  fue aplicado como criterio para todas las intersecciones analizadas, puesto que fue el tiempo máximo que tardaban los vehículos (dentro de la visibilidad de los conductores en la vía subordinada) en llegar a la intersección elegida con el mayor valor de visibilidad (más de 200 metros), correspondiente a la Av. Separadora Industrial con la Calle Cueto Fernandini – Ate (detallado en el Anexo 7).

### 3.4 Criterios para la clasificación de las brechas

En las grabaciones tomadas, se evidencia que los movimientos y comportamientos de los vehículos no son como se predicen en los diseños geométricos. Se puede apreciar que las trayectorias de los vehículos no son siempre como se detallan en estudios realizados por otros autores, puesto que se basan en idealizaciones de los mismos. Por ello es que para el presente estudio, se definió una serie de parámetros los cuales se emplearon para decidir los

valores de brecha que se iban a aceptar para el estudio y aquellas que iban a ser ignoradas. Estos criterios se detallan a continuación:

- El criterio para definir que una brecha es aceptada, es cuando el vehículo en la vía secundaria logra incorporarse en la vía principal (Akcelik, 2011) sin frenar durante la realización de dicho acoplamiento. No se consideraron aquellas brechas que fueron aceptadas pero en las que los vehículos, durante la maniobra de giro, frenaron durante la trayectoria curva, para luego retomar la marcha y terminar la maniobra de acoplamiento a la vía principal.
- No se consideraron aquellas brechas, en las cuales los vehículos que realizaron la maniobra de giro desde la vía subordinada, demoraron un tiempo exagerado para la realización del acoplamiento.
- No se consideró aquellas brechas en las cuales, la interferencia de peatones, ciclistas u otros, generaron zonas de conflicto adicionales a los aforos vehiculares de la intersección.

### 3.5 Extracción de datos recolectados

Luego de tener registrados los movimientos de los vehículos en filmaciones continuas, se tomó, para cada intersección, un punto de referencia fijo en la vía principal, para tomar los tiempos. Para esto se empleó un software (llamado *Videopad Video Editor*) el cual dio a precisión de **centésimas de segundo** la ubicación de cada fotograma a lo largo del video. Se registraron los instantes precisos en los cuales los parachoques traseros de los vehículos delanteros, llegaban al punto de referencia determinado, luego se registraron los instantes en los que, los parachoques delanteros de los vehículos posteriores, llegaban al mismo punto de referencia fijo en la vía principal, y por medio de una simple resta se obtuvieron los diferentes valores de brechas aceptadas y rechazadas.

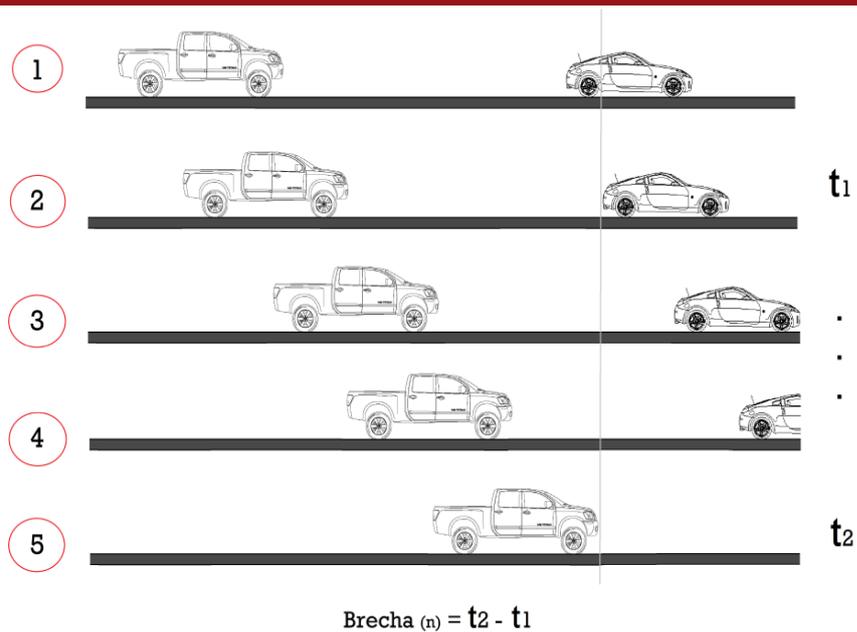


Figura 36. Forma de extracción de valores de brecha a partir de filmación. Fuente: propia

De igual forma, para la determinación de las velocidades, se determinaron puntos de referencia en la vía principal. Luego de tener la cantidad de metros recorridos en un tiempo medido en segundos, se procedió dividir esas cantidades para obtener la velocidad en metros sobre segundos, y finalmente convertirlos en kilómetros por hora (de m/s a Km/h).

### 3.6 Metodología para extracción de tiempos de avance de cola

Debido a que en los modelos teóricos, también se emplea el valor del tiempo de avance de cola ( $\beta$ ), el cual es obtenido de la localidad en donde se emplean dichos modelos, se hizo la medición del mismo a partir de la intersección en donde se logró posicionar la filmadora en un ángulo que permitió extraer esta información. La metodología para la medición precisa se detalla a continuación.

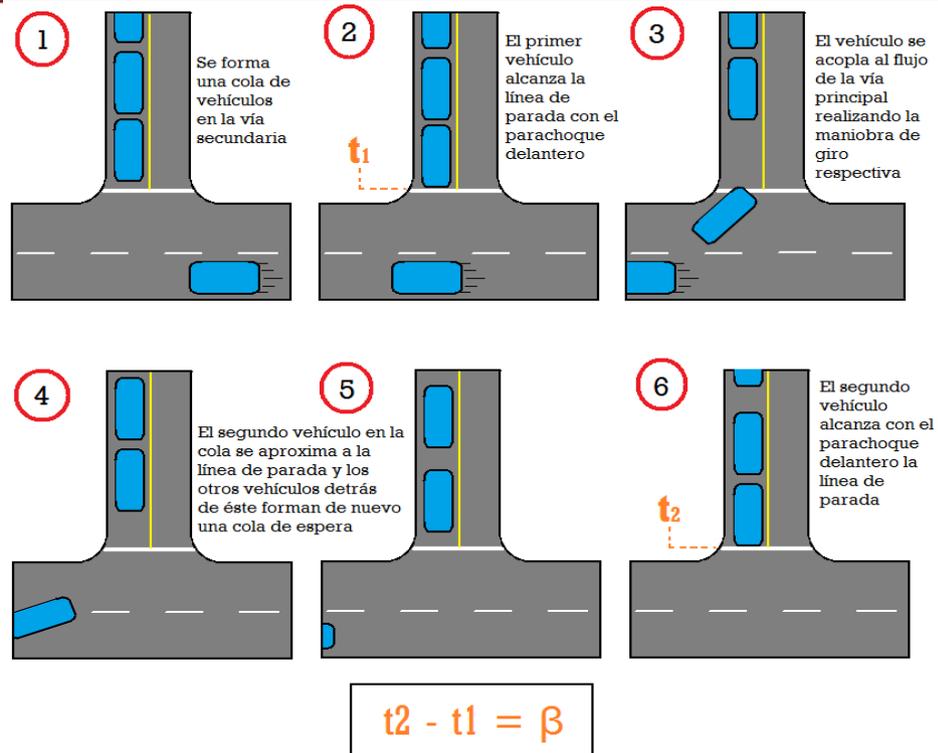


Figura 37. Metodología para medición de tiempo de avance de cola. Fuente: propia

La intersección en donde se logró realizar esta medición es en la perteneciente al cruce de la Av. Frutales con la calle Los Cerezos – La Molina. Las muestras se extrajeron en la hora pico, puesto es que dentro de este periodo, donde se formó la gran mayoría de colas de vehículos.

### 3.7 Eventualidades presentadas en la toma de datos de campo

En cada intersección hubo dificultades particulares para lograr la toma de datos, por lo que no en todas se logró realizar la recolección de ellos desde una posición idónea. Las principales dificultades encontradas fueron las siguientes:

- Imposibilidad de acceder a un punto elevado para capturar las maniobras.
- Vista obstaculizada por vegetación, carteles, peatones, paradas informales de unidades de transporte público, etc.
- Negativa de los vecinos para que se realice una grabación prolongada cerca de sus domicilios por razones de seguridad.

## CAPÍTULO 4.

### RESULTADOS

Luego de procesar la información de campo recolectada, se realizó el análisis de las distribuciones de brechas (s) por intervalos de hora, porcentajes de aceptación de brechas, tiempos de espera (s), flujos de tránsito (vehículos/hora), etc. Así mismo, los resultados extraídos fueron contrastados entre sí para poder comprobar relaciones encontradas en estudios precedentes en la ingeniería del tránsito.

#### 4.1 Distribución de vehículos por intervalos de hora

A partir de los videos registrados se hizo un conteo de vehículos separándolos en los de la vía principal y de la vía subordinada. Los resultados obtenidos de esta cuantificación en intervalos se detallan a continuación. Cabe mencionar que los intervalos de tiempo de 30 min, que en algunas intersecciones lograron ser filmados, no serán considerados más que para la determinación de la brecha crítica total a lo largo del día de estudio para cada intersección, debido a que, al no tener una longitud de tiempo similar a otros intervalos de hora de 60 minutos de duración (de 8:00 a 9:00, de 9:00 a 10:00, etc.), no pueden usarse para diferenciar periodos pico o periodos valle y distinguir, a lo largo de las horas de estudio, intervalos de tiempo discretos de análisis.

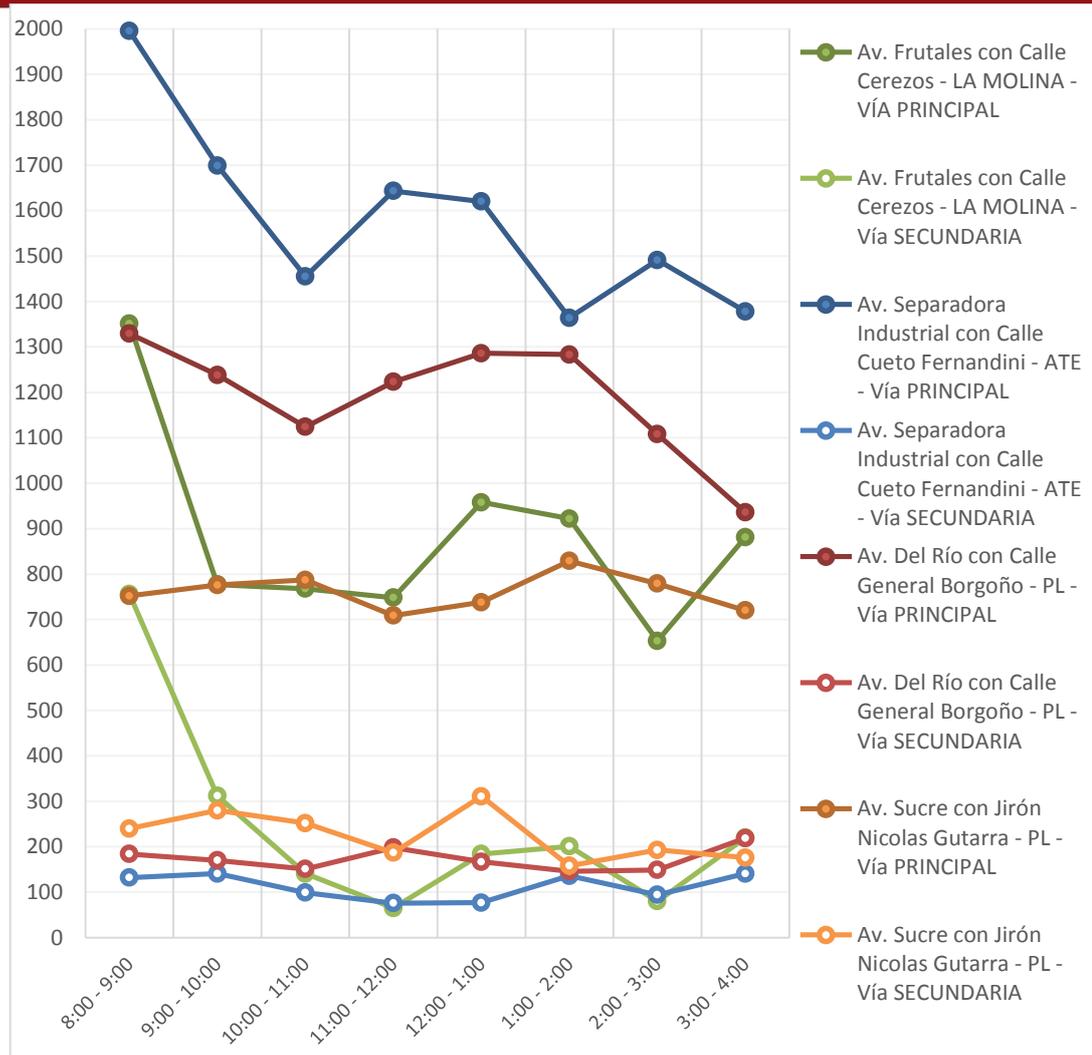


Figura 38. Distribución de flujos vehiculares en intersecciones a lo largo de horas de estudio

De estas distribuciones de flujos, se logró diferenciar para cada intersección, periodos de análisis según dos tipos: PICO y VALLE, en relación con la similitud de la cantidad del aforo vehicular, los cuales pudieron agruparse para analizarlos de forma individual. Los periodos de tiempo para el análisis segmentado de las intersecciones, se detalla de forma tabulada en la Tabla 8. Los detalles de los flujos vehiculares de las intersecciones se indican desde el Anexo 13 hasta el Anexo 16.

Tabla 8. Periodos de análisis para cada intersección

Intersección		Periodos de análisis		
Dirección	Distrito	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Av. Frutales con Calle Los Cerezos	La Molina	8:00 - 9:00	9:00 - 1:00	1:00 - 4:00
Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini	Ate	8:00 - 10:00	10:00 - 2:00	2:00 - 4:00
Av. Del Río con Calle General Borgoño	Pueblo Libre	8:00 - 11:00	11:00 - 2:00	2:00 - 4:00
Av. Sucre con Calle Nicolás Gutarra	Pueblo Libre	8:00 - 11:00	11:00 - 1:00	1:00 - 4:00
<b>Tipo de periodo</b>		PICO	VALLE	VALLE

#### 4.2 Distribución de brechas aceptadas y rechazadas por intervalos de hora

A lo largo de todas las horas de filmación, se tomaron los tiempos de todas las brechas aceptadas y rechazadas. Estas se clasificaron en intervalos de medio segundo y se sumaron los subtotales resultantes dentro de cada intervalo. Es a partir de estas tablas de distribución de las cuales se desprendió posteriormente los datos relevantes para hallar las brechas críticas a lo largo de todo el día de estudio o por periodos discretos de horas, por el método de Raff y por el método de Percentil 50.

##### 4.2.1 Brechas aceptadas

Se contabilizaron las brechas aceptadas de la intersección correspondiente al distrito de La Molina y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Distribución de brechas aceptadas por intervalos de hora.  
Intersección Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina

Intervalos de hora	Intervalos de brechas aceptadas (segundos)																				FRECUENCIA		
	0 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	5.0 - 5.5	5.5 - 6.0	6.0 - 6.5	6.5 - 7.0	7.0 - 7.5	7.5 - 8.0	8.0 - 8.5	8.5 - 9.0	9.0 - 9.5	9.5 - 10.0		10.0 - 10.5	10.5 - 11.0
7:30 - 8:00	0	0	0	0	0	0	0	4	9	8	3	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8:00 - 9:00	0	0	0	0	1	8	12	11	21	15	21	14	14	8	6	2	5	3	1	0	1	0	0
9:00 - 10:00	0	0	0	0	2	3	1	6	5	9	3	5	8	4	2	7	5	0	1	2	1	0	0
10:00-11:00	0	0	0	0	0	1	3	2	6	4	5	8	0	1	4	2	2	3	1	0	0	0	0
11:00-12:00	0	0	0	0	0	1	4	2	4	1	6	2	3	1	1	2	2	2	0	1	1	0	0
12:00-1:00	0	0	0	0	0	1	0	5	10	6	4	0	2	2	1	1	1	0	0	1	0	0	0
1:00 - 2:00	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	1	2	0	0	0	1	4	1	2	0	0	0	0
2:00 - 3:00	0	0	0	0	1	1	0	1	0	3	6	4	3	3	1	1	0	2	0	1	0	0	0
3:00 - 4:00	0	0	0	0	1	1	4	5	4	5	5	7	6	9	6	3	3	1	1	2	0	0	0
4:00 - 4:30	0	0	0	0	1	0	3	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>16</b>	<b>29</b>	<b>38</b>	<b>63</b>	<b>54</b>	<b>56</b>	<b>48</b>	<b>39</b>	<b>30</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>23</b>	<b>13</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	

Se puede observar que los valores mínimos de brechas aceptadas están comprendidos apenas entre los 2 segundos a 2.5 segundos, para los casos en los que los conductores de la vía subordinada entraron con velocidad considerable a la intersección y sin frenar realizaron la maniobra de acoplamiento a la vía principal. Estos valores mínimos también corresponden a aquellas brechas aceptadas en las cuales, los conductores en la vía subordinada, realizaron la maniobra y provocaron una leve desaceleración los vehículos provenientes de la vía principal.

En la Tabla 9 además se puede ver que la mayor cantidad de brechas aceptadas está comprendida entre los 4.0 y 4.5 segundos, e intervalo a partir del cual, para brechas mayores, se va reduciendo hasta llegar a apenas 3 vehículos. Finalmente, se puede apreciar una concentración importante de brechas aceptadas, que van desde los 3 segundos hasta los 6.5 segundos, en el intervalo comprendido entre las 8:00 y 9:00, que refleja la concentración particular de vehículos en esa intersección y se decidió analizar por separado del resto de intervalos de horas.

Las distribuciones de brechas aceptadas de las intersecciones correspondientes a la del distrito de Ate y el distrito de Pueblo Libre, se muestran desde el Anexo 17 hasta el Anexo 19.

**4.2.2 Brechas rechazadas**

De forma similar a las brechas aceptadas, se contabilizaron las brechas rechazadas de la intersección correspondiente al distrito de La Molina y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 10.

*Tabla 10. Distribución de brechas rechazadas a por intervalos de hora.  
Intersección Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina*

Intervalos de hora	Intervalos de brechas rechazadas (segundos)																FRECUENCIA						
	0 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	5.0 - 5.5	5.5 - 6.0	6.0 - 6.5	6.5 - 7.0	7.0 - 7.5	7.5 - 8.0		8.0 - 8.5	8.5 - 9.0	9.0 - 9.5	9.5 - 10.0	10.0 - 10.5	10.5 - 11.0
7:30 - 8:00	2	7	2	6	9	7	1	1															
8:00 - 9:00	0	17	41	45	33	15	14	4	1	2	4	1											
9:00 - 10:00	3	4	21	12	11	5	5	5	3	0	2	0											
10:00 - 11:00		5	13	11	7	7	5	2	3	3	2	3		1	1	2							
11:00 - 12:00		3	7	6	10	6	2	0	2	1	1	1											
12:00 - 1:00	1	5	7	9	6	1	3	2	2	0													
1:00 - 2:00		3	7	6	10	6	2	0	2	1	1	1											
2:00 - 3:00	0	4	6	7	10	5	3	2	3	0	0	1											
3:00 - 4:00	2	3	4	11	12	7	5	3	1	4	1	0				1	0						
4:00 - 4:30			2	7	4	4	1	0	1	0	1	0											
<b>TOTAL</b>	<b>8</b>	<b>51</b>	<b>110</b>	<b>120</b>	<b>112</b>	<b>63</b>	<b>41</b>	<b>19</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Se puede observar que, a partir de 1.5 segundos hasta los 8.5 segundos, la cantidad de brechas rechazadas se reduce gradualmente, y que a partir de los 2.5 segundos, en contraste con los valores de brechas aceptadas mostrados en la Tabla 9, la cantidad de brechas rechazadas a medida que para esos mismos valores, se registran valores de brechas aceptadas.

Se ve además que entre 1.5 y 2.0 segundos, se da la mayor cantidad de brechas rechazadas, y que en contraste con la Tabla 9, no hay registro alguno de brechas que hayan sido aceptadas. Esto se debe a que para valores de brecha de 2.0 segundos y menores, al menos para esta intersección, no hay posibilidad de que estas brechas puedan ser aceptadas. Las distribuciones de brechas rechazadas de las intersecciones correspondientes a la del distrito de Ate y el distrito de Pueblo Libre, se muestran desde el Anexo 20 hasta el Anexo 22.

### 4.3 Distribuciones totales de las brechas registradas en cada intersección

Para cada intersección, se ordenaron las brechas registradas a lo largo de todas las horas de filmación indicadas en la Tabla 8, en intervalos de medio segundo.

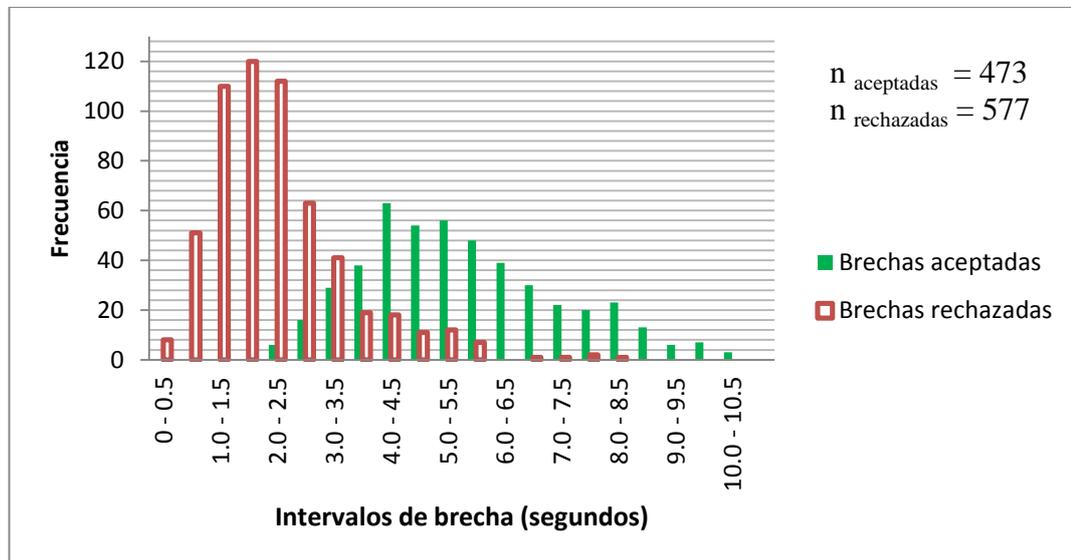


Figura 39. Distribución de brechas aceptadas y rechazadas registradas a lo largo de todas las horas de filmación. Intersección Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina

En la figura 39, se muestra la distribución de brechas aceptadas y rechazadas de la brecha perteneciente al distrito de La Molina, en la cual se puede observar, que la cantidad de brechas rechazadas es mayor que las aceptadas, lo que indica que la mayoría de veces, los vehículos que provienen de la vía subordinada, rechazan uno o dos brechas antes de asumir la que terminan aceptando para realizar la maniobra. Se observa también que las brechas mínimas aceptadas son de 2.0 segundos. Finalmente, se observa la tendencia central de las brechas aceptadas, está entre 4 y 5.5 segundos.

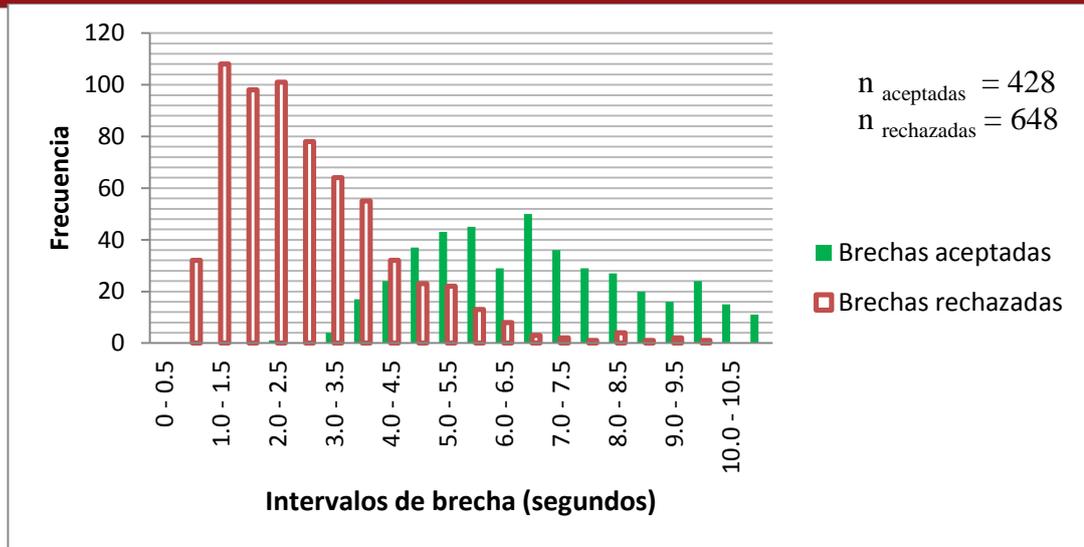


Figura 40. Distribución de brechas aceptadas y rechazadas registradas a lo largo de todas las horas de filmación. Intersección Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate

En la figura 40, se muestra la distribución de brechas aceptadas y rechazadas de la brecha perteneciente al distrito de Ate. Se observa que, las brechas aceptadas mínimas son de 3.0 segundos (salvo una brecha aceptada entre 2.0 y 2.5 segundos, que se considera un caso puntual no representativo), valor de brecha mínima aceptada en comparación de la intersección anterior. Se observa además que la tendencia central de brechas aceptadas, está comprendido entre 5 y 7 segundos. Se ve también que el rango de brechas rechazadas (valores de brecha para los cuales no hay registro de brechas aceptadas), es más amplio en comparación de las otras intersecciones, comprendido entre 0 y 3.0 segundos.

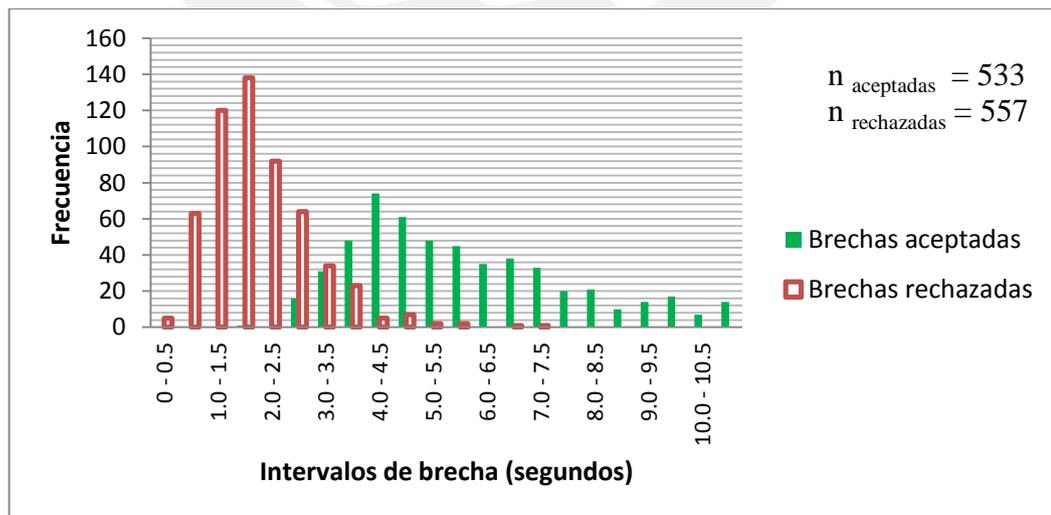


Figura 41. Distribución de brechas aceptadas y rechazadas registradas a lo largo de todas las horas de filmación. Intersección Av. Del Río con Calle General Borgoño – Pueblo Libre

En la figura 41, se presenta la distribución de brechas de la primera intersección correspondiente al distrito de Pueblo Libre. En primer lugar, se observa que las brechas mínimas aceptadas están comprendidas entre 2.5 y 3.0 segundos. Se puede ver que las brechas rechazadas están entre 5.5 y 6.0 segundos como máximo. Se observa que los valores de brechas rechazadas en todos los casos, está comprendido entre 0 y 2.5 (valores de brecha para los cuales no hay registro de brechas aceptadas).

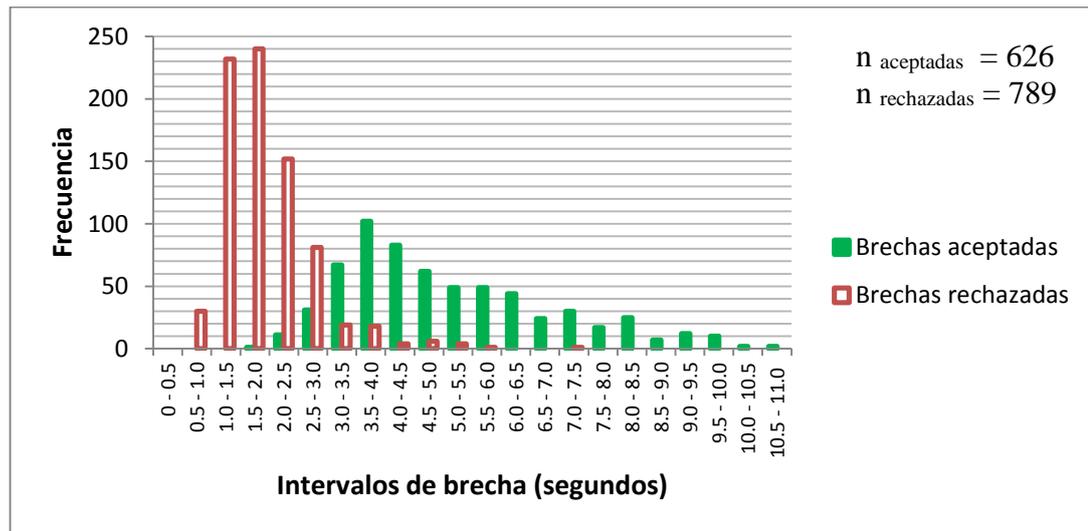


Figura 42. Distribución de brechas aceptadas y rechazadas registradas a lo largo de todas las horas de filmación. Intersección Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra – Pueblo Libre

En la figura 42, se presenta la distribución de brechas de la segunda intersección correspondiente al distrito de Pueblo Libre. Se observa que las brechas mínimas aceptadas están comprendidas desde el intervalo entre 1.5 y 2.0 segundos. Se puede ver que las brechas rechazadas están entre 5.5 y 6.0 segundos como máximo igual que en la anterior intersección del mismo distrito. Se observa además que, los valores de brechas rechazadas en todos los casos, está comprendido entre 0 y 1.5 segundos (valores de brecha para los cuales no hay registro de brechas aceptadas).

#### 4.4 Distribución de velocidades en cada intersección por intervalos de horas

Para cada intersección, se midieron las velocidades de los vehículos en la vía principal en tres distintos periodos de tiempo determinados a partir del análisis de los flujos vehiculares. Se hizo también un estudio de las velocidades debido a que, como se planteó en la parte de hipótesis, los valores de brecha crítica y la velocidad de los vehículos en la vía principal están relacionados. Al analizar las distribuciones de velocidad dentro de intervalos discretos

de tiempo, se alista un panorama que permite ver detalladamente esta relación. La distribución de las velocidades registradas fueron los siguientes.

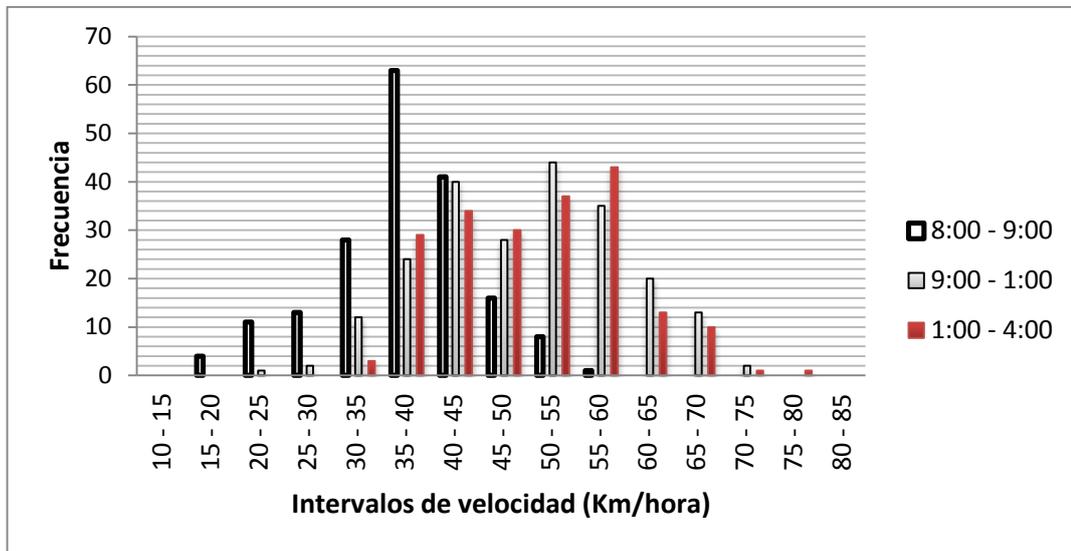


Figura 43. Distribución de velocidades en la vía principal registradas por intervalos de hora.  
Intersección Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina

En la figura 43, se muestra la distribución de velocidades de la intersección perteneciente al distrito de La Molina. Se observa que en el intervalo de 8:00 a 9:00 la velocidad de vehículos en la vía principal está más acentuada entre 35 y 40 Km/hora. En los otros periodos de tiempo, la velocidad está repartida de 40 a 60 Km/hora. Asimismo, en esos intervalos se ve que hay una tendencia central entre 50 y 60 Km/hora, que refleja el desarrollo de velocidad máxima para esa intersección cuando los flujos vehiculares son menores. Además, no se ve una tendencia general mayoritaria. Finalmente, se observa que en el primer intervalo, de 8:00 a 9:00, la velocidad hay una importante cantidad de vehículos que circulan con una velocidad comprendida entre 15 y 30 Km/hora, velocidades que prácticamente no se repiten en los otros intervalos de hora. El detalle de los análisis estadísticos de las velocidades para esta intersección, se encuentra desde el Anexo 23 hasta el Anexo 26.

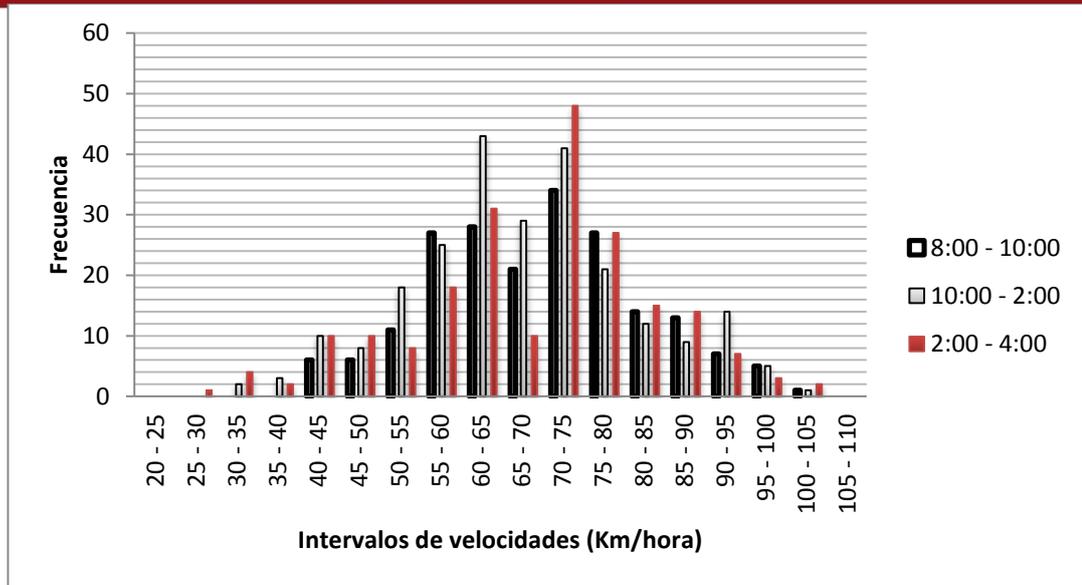


Figura 44. Distribución de velocidades en la vía principal registradas por intervalos de hora.  
Intersección Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate

En la figura 44, se muestra la distribución de velocidades de la intersección perteneciente al distrito de Ate. Para esta intersección, se observa que existe una tendencia mayoritaria de la velocidad amplia, comprendida entre 55 y 80 Km/hora. El detalle de los análisis estadísticos de las velocidades para esta intersección, se encuentra desde el Anexo 27 hasta el Anexo 30.

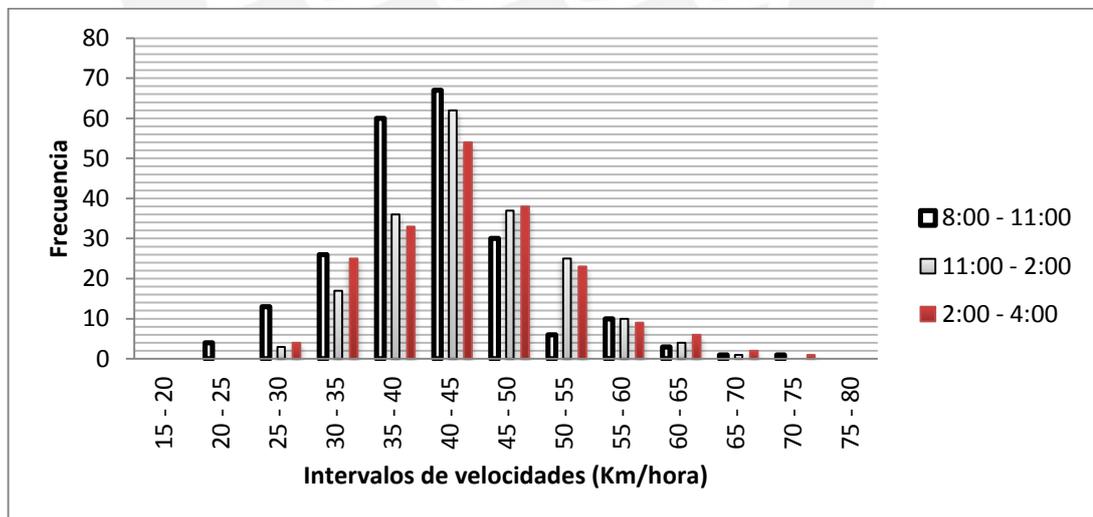


Figura 45. Distribución de velocidades en la vía principal registradas por intervalos de hora.  
Intersección Av. Del Río con Calle General Borgoño - Pueblo Libre

En la figura 45, se muestra la distribución de velocidades perteneciente a la primera intersección en Pueblo Libre. En ella se puede observar que la tendencia mayoritaria está en un intervalo menos amplio que en la intersección anterior, que está comprendido entre 35 y 40 Km/hora. Se observa además que, en el intervalo de 8:00 a 11:00, hay un descenso

notorio en la velocidad, puesto que, no existieron cantidades considerables de vehículos que circularon a más de 50 Km/hora en ese periodo de tiempo. El detalle de los análisis estadísticos de las velocidades para esta intersección, se encuentra desde el Anexo 31 hasta el Anexo 34.

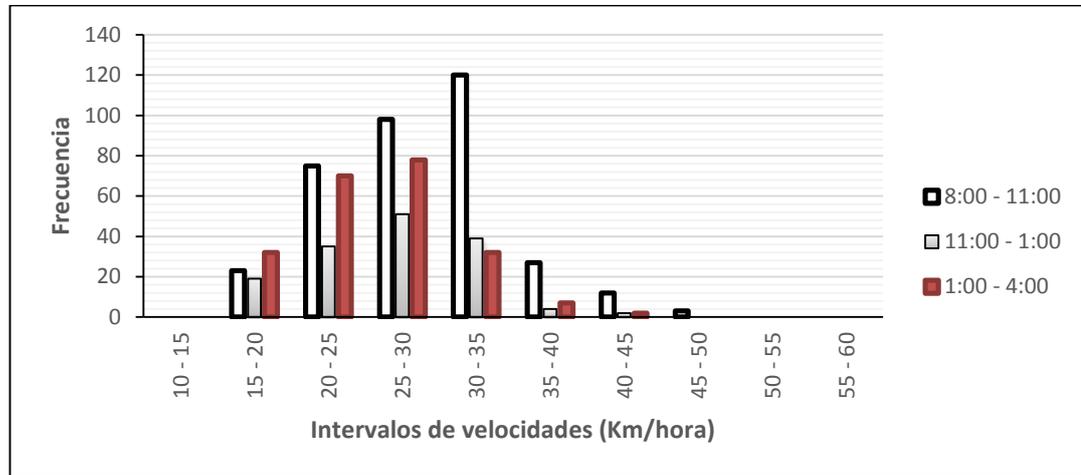


Figura 46. Distribución de velocidades en la vía principal registradas por intervalos de hora.  
Intersección Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra – Pueblo Libre

En la figura 46, se muestra la distribución de velocidades perteneciente a la segunda intersección elegida en Pueblo Libre. En ella se puede observar una tendencia más acentuada entre 30 Km/hora y 35 Km/hora. Se observa además que, en las velocidades que presentan mayor frecuencia, hay un descenso notable de las horas pico a las horas valle. El detalle de los análisis estadísticos de las velocidades para esta intersección, se encuentra desde el Anexo 35 hasta el Anexo 38.

#### 4.5 Obtención de brecha crítica para cada intersección a lo largo todas las horas de estudio

Para cada intersección, se clasificaron todas las brechas aceptadas y rechazadas registradas a lo largo de las horas de filmación, para luego clasificarlos en intervalos de brecha de medio segundo. Una vez obtenidas estas distribuciones, se procedió a emplear los dos métodos principales usados para la determinación de la brecha crítica, y se obtuvieron los siguientes resultados.

##### 4.5.1 Método de Raff

Se ordenaron los valores de brechas aceptadas y rechazadas de cada intersección, en una misma gráfica, para poder hallar el punto en donde estas distribuciones se intersectan, y por

medio de una interpolación, se determinó el valor de la brecha crítica. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

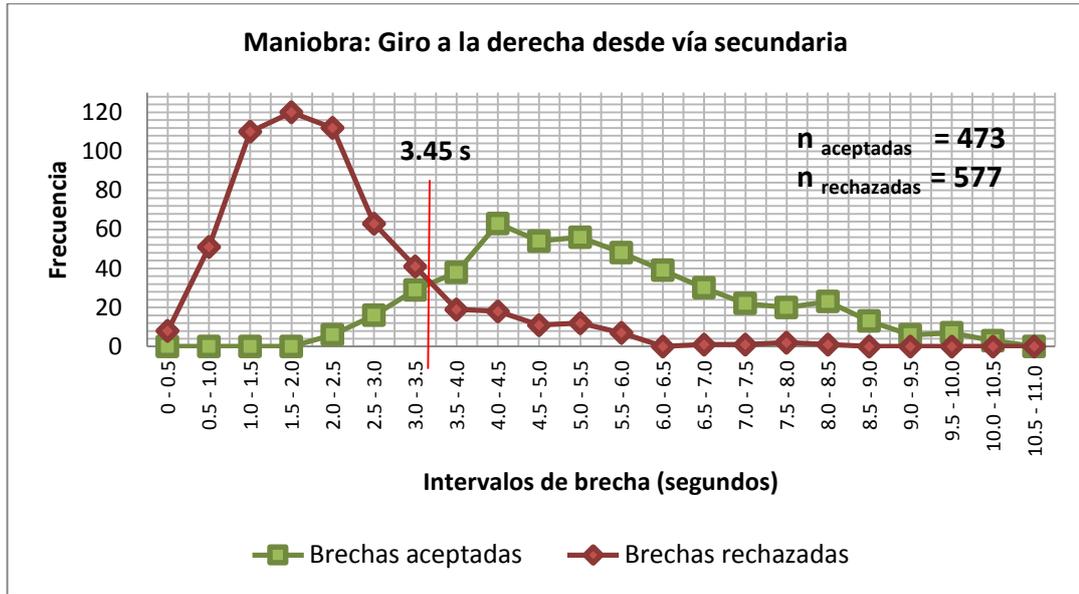


Figura 47. Curvas de distribución de brechas aceptadas y rechazadas intersectadas para determinar brecha crítica por el Método de Raff. Intersección Avenida Frutales con Calle Los Cerezos - La Molina

Para esta intersección, para maniobra de giro a la derecha desde la vía secundaria, con un total de 1050 brechas registradas, intersectando gráficamente la distribución de brechas aceptadas y rechazadas, se logra determinar una brecha crítica de 3.45 segundos.

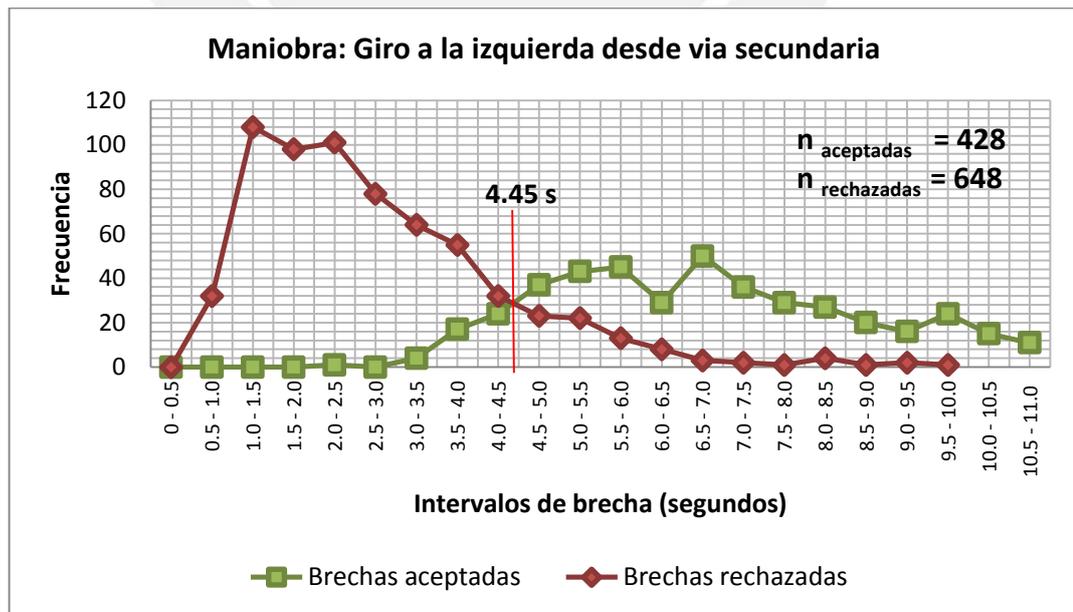


Figura 48. Curvas de distribución de brechas aceptadas y rechazadas intersectadas para determinar brecha crítica por el Método de Raff. Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate

Para esta intersección, para maniobra de giro a la izquierda desde la vía secundaria, con un total de 1076 brechas registradas, intersectando gráficamente la distribución de brechas aceptadas y rechazadas se logra determinar una brecha crítica de **4.45** segundos.

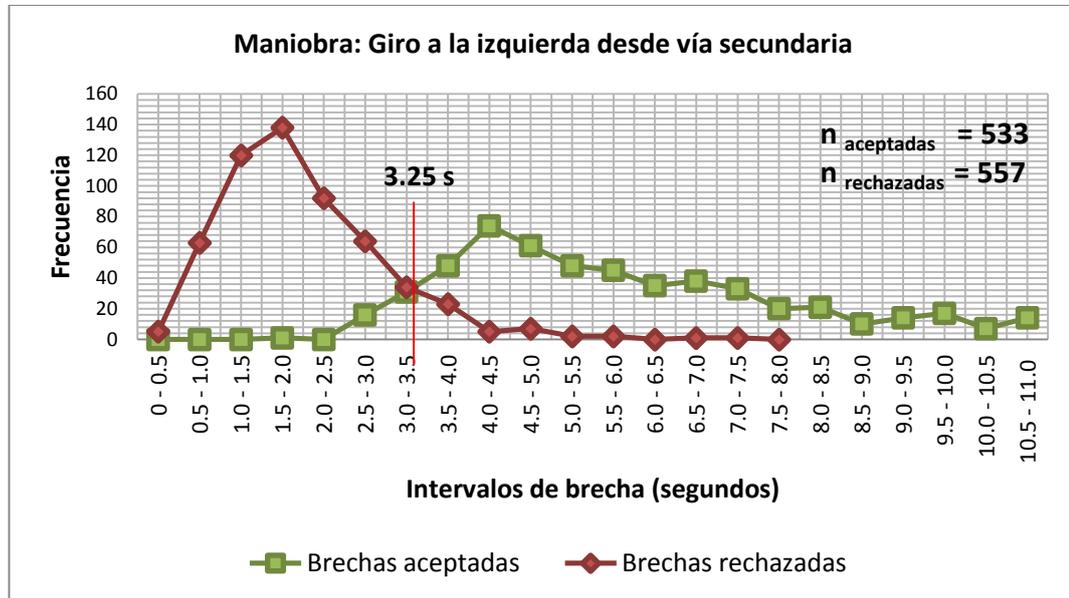


Figura 49. Curvas de distribución de brechas aceptadas y rechazadas intersectadas para determinar brecha crítica según Raff. Av. Del Rio con Calle General Borgoño – Pueblo Libre

Para esta intersección, para maniobra de giro a la izquierda desde la vía secundaria, con un total de 1090 brechas registradas, intersectando gráficamente la distribución de brechas aceptadas y rechazadas, se logra determinar una brecha crítica de **3.25** segundos.

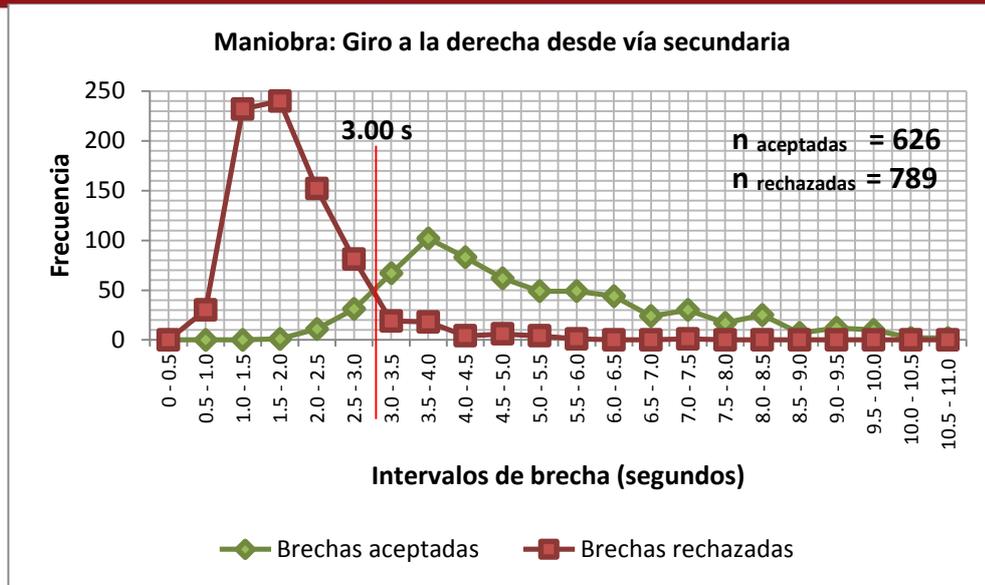


Figura 50. Curvas de distribución de brechas aceptadas y rechazadas intersectadas para determinar brecha crítica según Raff. Intersección Avenida Sucre con Jirón Nicolás Gutarrra – Pueblo Libre

Para esta intersección, para maniobra de giro a la derecha desde la vía secundaria, con un total de 1415 brechas registradas, intersectando gráficamente la distribución de brechas aceptadas y rechazadas, se logra determinar una brecha crítica de **3.00** segundos.

#### 4.5.2 Método del Percentil 50

Para la determinación de las brechas por el método del percentil 50, se clasificaron las brechas registradas por intervalos de tiempo de medio segundo de forma similar que en el método de Raff. Para cada intervalo de medio segundo, se sumó la cantidad de brechas aceptadas y rechazadas y se calculó, el porcentaje que representaban las brechas aceptadas de esos totales, obteniendo porcentajes de aceptación para cada intervalo de brecha. Luego, se distribuyeron estos porcentajes en gráficas para poder determinar gráficamente donde la curva intersecta con el 50 % de frecuencia.

Netamente, el método del Percentil 50, determina un valor específico de brecha, el cual tiene un 50 % de probabilidades de ser aceptado y un 50 % de probabilidades de ser rechazado. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

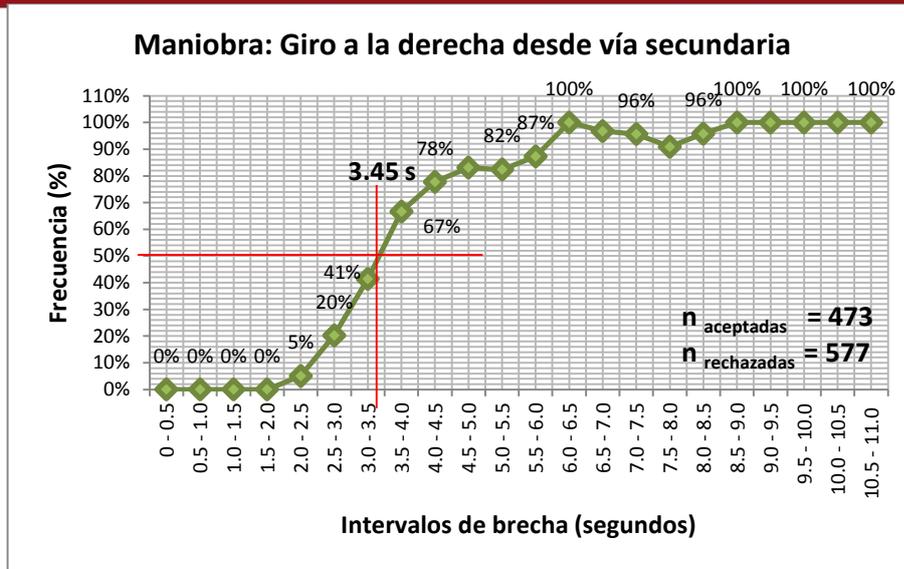


Figura 51. Distribución de brechas aceptadas separado por intervalos de medio segundo para la determinación de la brecha crítica por el método de Percentil 50. Av. Frutales con Calle Los Cerezos - La Molina

Para esta intersección, para maniobra de giro a la derecha desde vía secundaria, con un total de 1150 brechas registradas, intersectando gráficamente la distribución de brechas aceptadas en porcentaje con el 50 % de aceptación, se logra determinar una brecha crítica de **3.45** segundos.

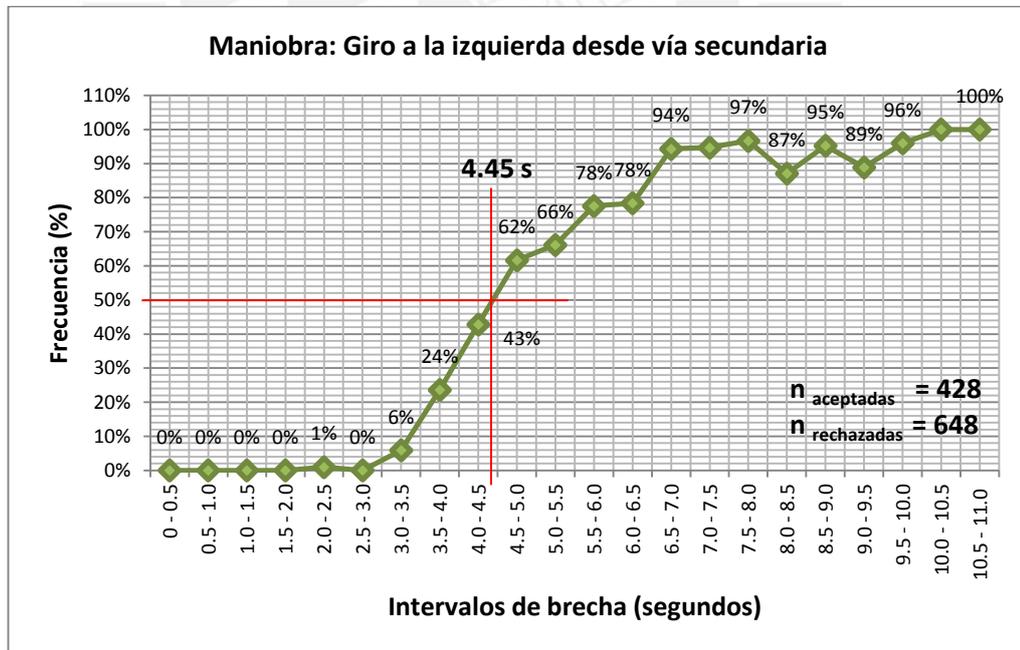


Figura 52. Distribución de brechas aceptadas separado por intervalos de medio segundo para la determinación de la brecha crítica por el método de Percentil 50. Av. Separadora Industrial con Cueto Fernandini - Ate

Para esta intersección, para maniobra de giro a la izquierda desde vía secundaria, con un total de 1076 brechas registradas, intersectando gráficamente la distribución de brechas aceptadas en porcentaje con el 50 % de aceptación, se logra determinar una brecha crítica de **4.45** segundos.

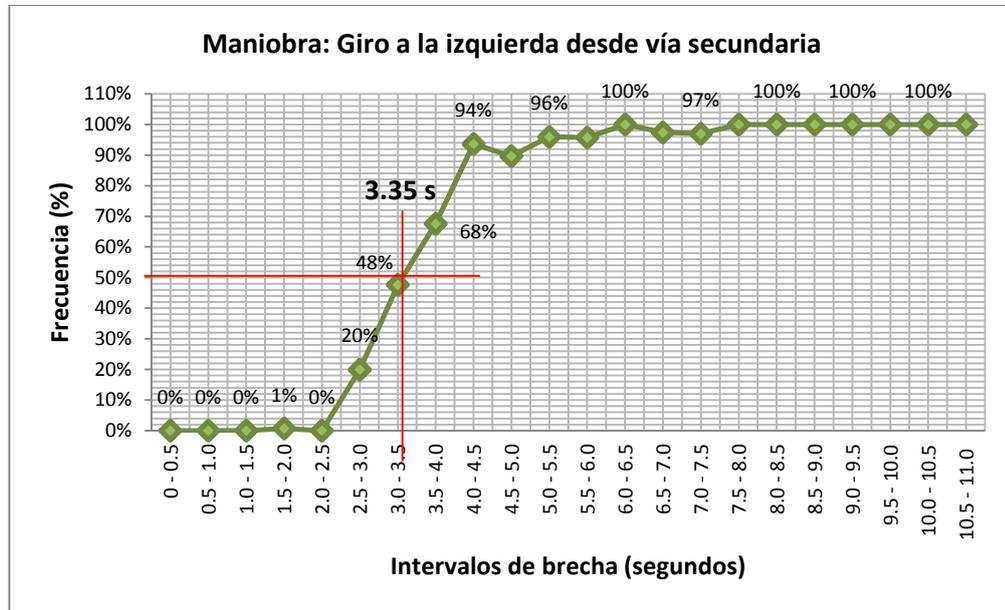


Figura 53. Distribución de brechas aceptadas separado por intervalos de medio segundo para la determinación de la brecha crítica por el método de Percentil 50. Av. Del Rio con Calle General Borgoño – Pueblo Libre

Para esta intersección, para maniobra de giro a la izquierda desde vía secundaria, con un total de 1090 brechas registradas, intersectando gráficamente la distribución de brechas aceptadas en porcentaje con el 50 % de aceptación, se logra determinar una brecha crítica de **3.35** segundos.

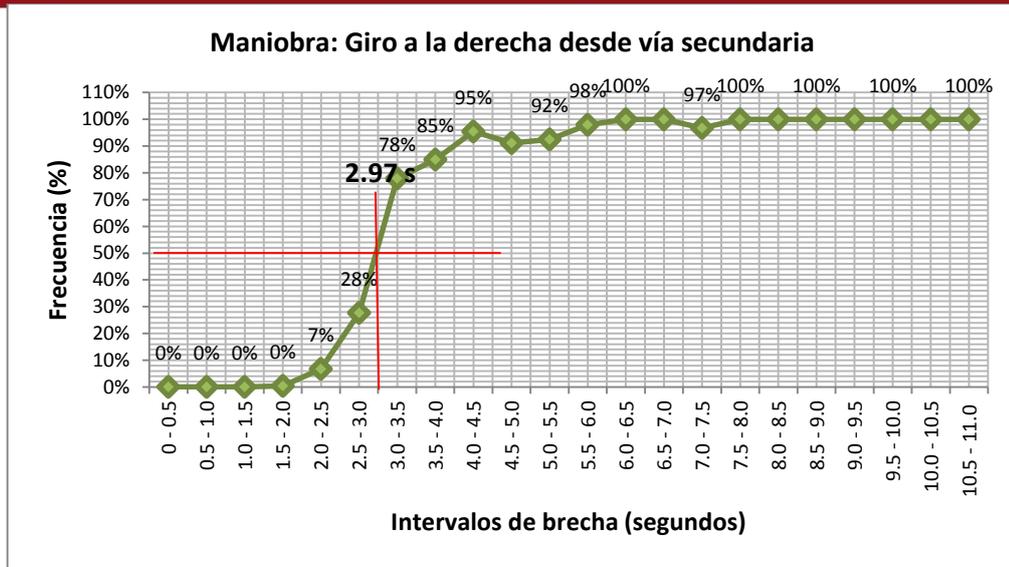


Figura 54. Distribución de brechas aceptadas separado por intervalos de medio segundo para la determinación de la brecha crítica por el método de Percentil 50. Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra – Pueblo Libre

Para esta intersección, para maniobra de giro a la derecha desde vía secundaria, con un total de 1090 brechas registradas, intersectando gráficamente la distribución de brechas aceptadas en porcentaje con el 50 % de aceptación, se logra determinar una brecha crítica de **2.97** segundos.

#### 4.6 Obtención de brecha crítica para cada intersección por intervalos de horas

Como se mostró en la Tabla 9 y Tabla 10, se clasificaron las brechas registradas en intervalos de medio segundo. Para obtener un análisis segmentado de las brechas registradas en intervalos de horas determinados (periodos pico y periodos valle) teniendo un tamaño de muestras suficiente, se clasificaron las brechas en intervalos de un segundo (de 0 a 1 segundos, de 1 a 2 segundos, de 2 a 3 segundos, etc.) y se obtuvieron las siguientes distribuciones.

Tabla 11. Clasificación de brechas aceptadas en intervalos de un segundo. Intersección Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina

Intervalo	INTERVALOS DE BRECHAS ACEPTADAS (segundos)											Frecuencia
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	
8:00 - 9:00	0	0	9	23	36	35	22	8	8	1	1	Frecuencia
9:00 - 1:00	0	0	8	23	45	33	21	20	15	6	2	
1:00 - 4:00	0	0	4	12	16	25	21	12	11	6	0	

Tabla 12. Clasificación de brechas rechazadas en intervalos de un segundo.

Intersección Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina

Intervalo	INTERVALOS DE BRECHAS RECHAZADAS (segundos)											Frecuencia
	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	
8:00 - 9:00	17	86	48	18	3	5	0	0	0	0	0	0
9:00 - 1:00	21	86	53	24	14	9	1	3	0	0	0	0
1:00 - 4:00	12	41	50	15	11	4	0	0	1	0	0	0

Las tablas de distribuciones de las intersecciones pertenecientes a los distritos de Ate y Pueblo Libre, se muestran desde el Anexo 39 hasta el Anexo 44.

A partir de estos datos tabulados para cada intersección, se procedió a colocar estas distribuciones en gráficos, para poder determinar los valores de brecha crítica correspondientes dentro de los periodos de tiempo detallados en la Tabla 8. Se procedió de forma similar con los métodos de determinación de brecha crítica para los periodos de análisis pico y valle. Estos resultados de esto se muestran desde el Anexo 45 hasta el Anexo 68.

#### 4.7 Determinación de tiempo de avance de cola

En cuanto a los tiempos de avances de cola, se procuró tomar la grabación desde posiciones en las cuales pudiera captarse el mayor detalle posible de las maniobras de los autos en cada intersección. Sin embargo, de las intersecciones elegidas solo se logró esto en la perteneciente al distrito de la Molina donde se pudo tomar los tiempos que tomaba un vehículo en una cola para avanzar hasta la línea de parada. Se tomó los tiempos de avance de cola pertenecientes al período pico puesto que fue en este intervalo de hora que se formaron colas de vehículos en la vía secundaria. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 55.

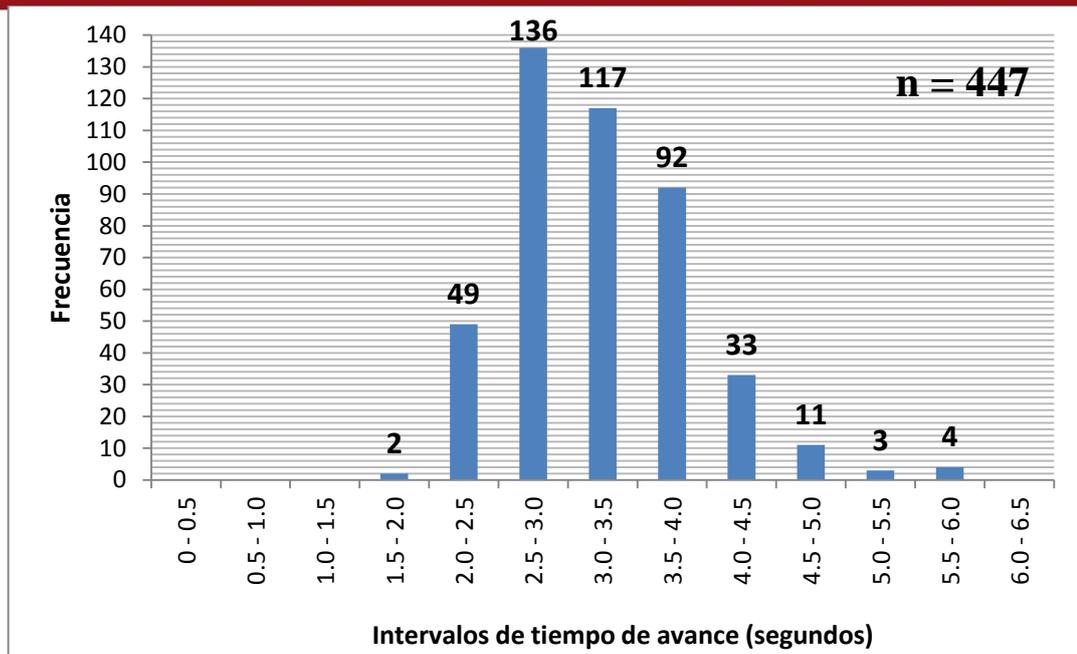


Figura 55. Distribución de tiempos de avances de cola en hora pico. Intersección Av. Frutales con Calle Los Cerezos – La Molina

Para un tamaño de muestra de 447, se observa que los tiempos de avance de cola están más acentuados entre los 2.5 y 3.0 segundos con valores de frecuencia muy cercanas entre sí. Se determinó que la media de toda la distribución es **3.24 segundos**. El detalle de los análisis estadísticos de la distribución de los tiempos de avance de cola registrados se muestra en el Anexo 69.

#### 4.8 Comparación de resultados

Habiendo obtenido ya la brecha crítica para cada intersección a lo largo de todas las horas de estudio y por periodos segmentados de tiempo, se esclarecieron las relaciones planteadas desde el inicio del presente estudio. Los resultados más relevantes, respecto a los resultados obtenidos se muestran a continuación. En referencia a las distribuciones de las brechas aceptadas, se analizaron las dispersiones de las mismas dentro de periodos de hora pico y valle, así como también a lo largo de todas las horas de estudio. Estos se muestran en la Tabla 13. Los respectivos análisis estadísticos de brechas aceptadas se muestran desde el Anexo 70 hasta el Anexo 86.

Tabla 13. Análisis estadístico de distribución de brechas aceptadas en intersecciones

		Media	Desv. Estandar	n	AD	P	Tipo de Distribución
Av. Frutales con Calle Los Cerezos - La Molina	8:00 - 9:00	5.025	1.565	143	0.965	0.015	Normal
	9:00 - 1:00	5.645	1.828	173	2.186	<0.005	NO Normal
	1:00 - 4:00	5.999	1.739	113	0.196	0.888	Normal
	total 7:30-4:30	5.55	1.74	483	3.664	<0.005	NO Normal
Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate	8:00 - 10:00	7.118	2.663	166	3.571	<0.005	NO Normal
	10:00 - 2:00	7.706	2.770	211	4.152	<0.005	NO Normal
	2:00 - 4:00	7.935	2.972	113	1.336	<0.005	NO Normal
	total 8:00-4:00	7.560	2.796	490	8.286	<0.005	NO Normal
Av. Del Río con Calle General Borgoño - Pueblo Libre	8:00 - 11:00	5.649	2.295	251	9.139	<0.005	NO Normal
	11:00 - 2:00	6.747	2.460	181	2.153	<0.005	NO Normal
	2:00 - 4:00	6.989	2.802	104	3.589	<0.005	NO Normal
	total 8:00-4:30	6.193	2.538	566	14.567	<0.005	NO Normal
Av. Sucre con Jiron Nicolas Gutarra - Pueblo Libre	8:00 - 11:00	5.257	1.931	285	7.602	<0.005	NO Normal
	11:00 - 1:00	5.127	1.687	157	1.346	<0.005	NO Normal
	1:00 - 4:00	4.824	1.612	184	4.974	<0.005	NO Normal
	total 8:00-4:00	5.097	1.789	626	12.52	<0.005	NO Normal

- n : número de muestras consideradas para el análisis
- AD : coeficiente Anderson-Darling, para definir cuantificar la no-normalidad
- P : valor de significación, para la determinación de la normalidad o no-normalidad

Se observa que las brechas aceptadas en la mayoría de casos no muestran una distribución normal. Además, se observa que los valores de desviación estándar están más acentuados en la intersección donde la media de la brecha aceptada es mayor. En la Tabla 14 se muestran las relaciones entre los valores de brecha crítica y la visibilidad de los conductores desde la vía secundaria.

Tabla 14. Relación de visibilidad y brechas críticas totales

Intersección	Tipo de maniobra		Visibilidad (metros)	Brecha crítica por método	
	Giro a la derecha	Giro a la izquierda		Raff	Percentil 50
	Av. Frutales con Calle Los Cerezos - La Molina	X			29.9
Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate		X	mayor a 200 m.	4.45	4.45
Av. Del Río con Calle General Borgoño - Pueblo Libre		X	no determinable	3.25	3.35
Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra - Pueblo Libre	X		58.6	3.00	2.97

A pesar que pudo definirse en la vía secundaria un punto de referencia en cada intersección, no se observa una relación importante como para poder aseverar que la visibilidad sea un factor influyente en cuanto al valor de brecha crítica, puesto que la conducta de los conductores en Lima no se rige por ceñir sus maniobras por parámetros geométricos en la intersección. Sin embargo, se reconoce que se necesitaría analizar un mayor número de intersecciones.

En referencia a las velocidades de los vehículos en la vía principal, se obtuvieron los siguientes análisis.

Tabla 15. Análisis estadístico de distribuciones de velocidades registradas en intersecciones

		Media	Desv. Estandar	n	AD	P	Tipo de Distribución
Av. Frutales con Calle Los Cerezos - La Molina	8:00 - 9:00	39.740	7.647	185	0.975	0.014	Normal
	9:00 - 1:00	49.840	9.506	221	1.203	<0.005	NO Normal
	1:00 - 4:00	50.390	8.743	201	1.167	<0.005	NO Normal
	total 7:30-4:30	46.33	10.41	607	1.941	<0.005	NO Normal
Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate	8:00 - 10:00	69.650	12.950	200	0.359	0.447	Normal
	10:00 - 2:00	67.630	13.860	241	0.926	0.018	Normal
	2:00 - 4:00	68.480	14.400	210	1.843	<0.005	NO Normal
	total 8:00-4:00	68.490	13.770	650	1.507	<0.005	NO Normal
Av. Del Río con Calle General Borgoño - Pueblo Libre	8:00 - 11:00	40.760	7.966	221	2.905	<0.005	NO Normal
	11:00 - 2:00	44.070	7.318	195	0.622	0.104	Normal
	2:00 - 4:00	44.090	8.215	195	0.728	0.057	Normal
	total 8:00-4:30	42.88	7.996	611	2.246	<0.005	NO Normal
Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra - Pueblo Libre	8:00 - 11:00	28.330	5.970	358	1.641	<0.005	NO Normal
	11:00 - 1:00	26.710	5.407	150	0.978	0.014	Normal
	1:00 - 4:00	25.440	5.103	221	2.567	<0.005	NO Normal
	total 8:00-4:00	27.37	5.797	729	4.599	<0.005	NO Normal

- n : número de muestras consideradas para el análisis
- AD : coeficiente Anderson-Darling, para definir cuantificar la no-normalidad
- P : valor de significación, para la determinación de la normalidad o no-normalidad

En estas distribuciones, se puede observar que no hay una relación clara que pueda determinar la normalidad de los datos en cada periodo de análisis. En referencia a las brechas

críticas obtenidas a partir de periodos de análisis se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16. Comparación de datos finales obtenidos

Intersección	Periodo	Tipo de Período	Brecha crítica (segundos)		Velocidad media (Km/hora)	Brecha crítica total (segundos)		Maniobra analizada desde vía secundaria
			Método de Raff	Método del P <sub>50</sub>		Método de Raff	Método del P <sub>50</sub>	
Av. Frutales con Calle Los Cerezos - La Molina	8:00 - 9:00	PICO	3.39	3.35	37.74	3.45	3.45	giro a la derecha
	9:00 - 1:00	VALLE	3.50	3.51	49.84			
	1:00 - 4:00	VALLE	3.88	3.90	50.39			
Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate	8:00 - 10:00	PICO	4.32	4.33	69.65	4.45	4.45	giro a la izquierda
	10:00 - 2:00	VALLE	4.50	4.50	67.63			
	2:00 - 4:00	VALLE	4.50	4.50	68.77			
Av. Del Río con Calle General Borgoño - Pueblo Libre	8:00 - 11:00	PICO	3.26	3.20	40.76	3.25	3.35	giro a la izquierda
	11:00 - 2:00	VALLE	3.64	3.63	44.07			
	2:00 - 4:00	VALLE	3.44	3.41	44.09			
Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra - Pueblo Libre	8:00 - 11:00	PICO	3.50	3.50	28.83	3.00	2.97	giro a la derecha
	11:00 - 1:00	VALLE	3.28	3.14	26.71			
	1:00 - 4:00	VALLE	3.10	3.02	25.44			

Se puede observar que los valores de brecha crítica obtenidos, varían dependiendo del aforo vehicular, reflejado en los intervalos de hora de estudio seleccionados para realizar un análisis segmentado por periodos pico y valle. Sin embargo, se puede ver que esta variación no excede a 0.49 segundos. Se observa también que, la máxima diferencia que existe entre los valores de brecha crítica obtenidos por periodos de hora con las brechas críticas totales, no exceden a 0.43 segundos.

En cuanto a las brechas críticas obtenida de forma distinta en cada intersección, en distintos periodos, se presentan las siguientes distribuciones.

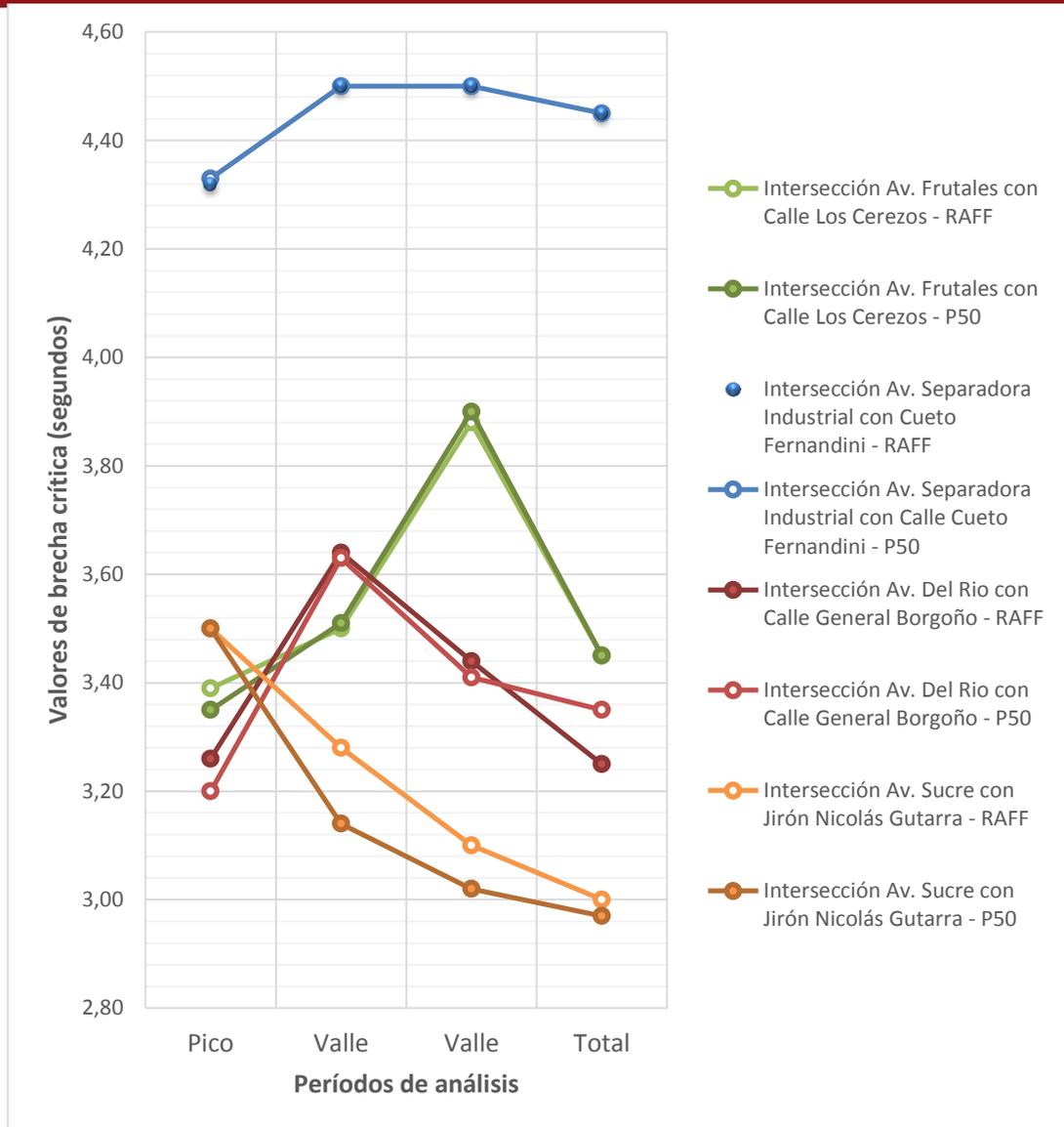


Figura 56. Distribución de valores de brecha crítica en intersecciones por métodos de Raff y P50

Se observa que los valores de brecha crítica hallados por ambos métodos ofrecen valores prácticamente similares, teniendo un máximo de 4.45 % en la intersección perteneciente a la Av. Sucre con el Jirón Nicolás Gutarra en el primer período valle de análisis. Se puede observar además que, en la intersección que presentó un mayor valor de velocidad media en la avenida principal (distrito de Ate), presenta valores de brecha crítica no solo similares entre sí por ambos métodos, sino que presenta menor variación a lo largo de los diferentes períodos de análisis, variando un máximo de 0.18 segundos (4.16 %).

De la figura 56 se desprende además que, en las intersecciones que presentaron valores menores de velocidad media en la avenida principal, el valor de la brecha crítica no siempre tiende a subir cuando se pasa de un periodo pico a un periodo valle, puesto que si bien, en dos de las intersecciones, el valor de la brecha crítica aumenta hasta en 0.43 segundos (13.43

%), en la intersección en la que sucede lo contrario, el valor de la brecha crítica decrece hasta en 0.36 segundos (10.28 %). Por esto, no se puede suponer necesariamente que el valor de la brecha crítica siempre tiende a aumentar al pasar de un periodo con un aforo vehicular menor. Sin embargo, cabe señalar que en la intersección donde sucede esto (Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra), es la que presentó una velocidad media menor en comparación de las demás intersecciones, lo que podría dar a suponer que, cuando la velocidad de los vehículos en la avenida principal es menor, el desenvolvimiento de las maniobras de los conductores dentro de la misma intersección es más errático y menos predecible. Esta suposición se refuerza además con el hecho de que, es en esta intersección en donde los valores de brechas críticas, hallados por ambos métodos (Raff y  $P_{50}$ ), presentan las mayores variaciones entre sí en los periodos valle en contraste con la intersección perteneciente al distrito de Ate, que presento una velocidad media mayor en la vía principal, y resulto en un aumento en el valor de la brecha crítica al pasar de un período pico a un período valle, y que además presento menores variaciones en cuanto a la determinación de la brecha crítica por ambos métodos. Por lo tanto, se reconoce que hace falta tomar más datos de otras intersecciones para poder determinar de forma confiable esta suposición.

Finalmente, en la Tabla 17 se muestran los tipos de vehículos en las intersecciones estudiadas, que definen los análisis y resultados del presente estudio.

Tabla 17. Composición del aforo vehicular en intersecciones

Vehículos	Intersección			
	Av. Frutales con Calle Los Cerezos - La Molina	Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate	Av. Del Río con Calle General Borgoño - Pueblo Libre	Av. Sucre con Jirón Nicolas Gutarra - Pueblo Libre
Autos Livianos	91%	82%	96%	91%
Vehículos pesados	7%	<b>11%</b>	1%	4%
Motocicletas	1%	1%	3%	<b>5%</b>

Se observa que el estudio de las intersecciones se realizó con un porcentaje de hasta 11 % de vehículos pesados y un porcentaje de hasta 5 % de motocicletas.

#### 4.9 Ecuación para la determinación de brecha crítica

Como se planteó en las hipótesis, se parte de la suposición de que existe una relación entre los valores de brecha crítica para cada intersección y la velocidad de los vehículos que se aproximan por la vía principal. Se procedió a comparar los valores de brecha crítica

obtenidos mediante el método de Raff y el método del  $P_{50}$ , condensándolos en una media de brecha crítica denominada *brecha crítica promedio*, junto con las medias resultantes de la distribución de velocidades, y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 18. Relaciones de velocidad media de vehículos en vía principal y valor de brecha crítica promedio

Intersección	Periodo	Tipo de periodo	Brecha crítica ponderada (segundos)	Velocidad media (Km/hora)	Maniobra analizada desde vía secundaria
Av. Frutales con Calle Los Cerezos - La Molina	8:00 - 9:00	pico	3.37	37.74	giro a la derecha
	9:00 - 1:00	valle	3.51	49.84	
	1:00 - 4:00	valle	3.89	50.39	
Av. Separadora Industrial con Calle Cueto Fernandini - Ate	8:00 - 10:00	pico	4.33	69.65	giro a la izquierda
	10:00 - 2:00	valle	4.50	67.63	
	2:00 - 4:00	valle	4.50	68.77	
Av. Del Río con Calle General Borgoño - Pueblo Libre	8:00 - 11:00	pico	3.23	40.76	giro a la izquierda
	11:00 - 2:00	valle	3.64	44.07	
	2:00 - 4:00	valle	3.43	44.09	
Av. Sucre con Jirón Nicolás Gutarra - Pueblo Libre	8:00 - 11:00	pico	3.50	28.83	giro a la derecha
	11:00 - 1:00	valle	3.21	26.71	
	1:00 - 4:00	valle	3.06	25.44	

A simple vista se puede observar que la relación entre ambos tipos de datos guarda una proporcionalidad directa. Por esto, se procedió a ordenar estas parejas de datos en coordenadas dentro de un plano cartesiano, teniendo la media de la velocidad de vehículos en la vía principal como el eje X y la brecha crítica promedio en el eje Y.

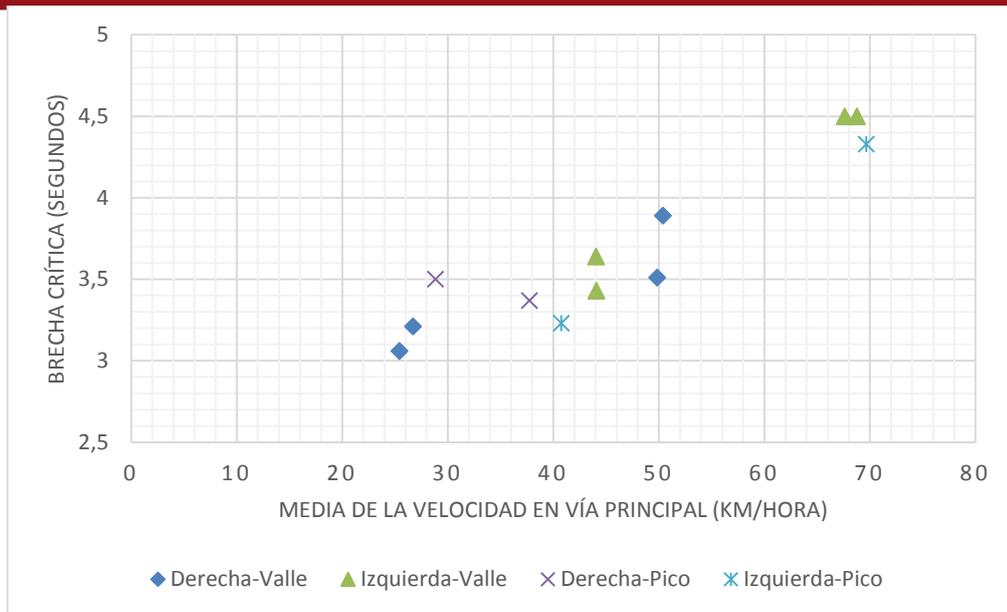
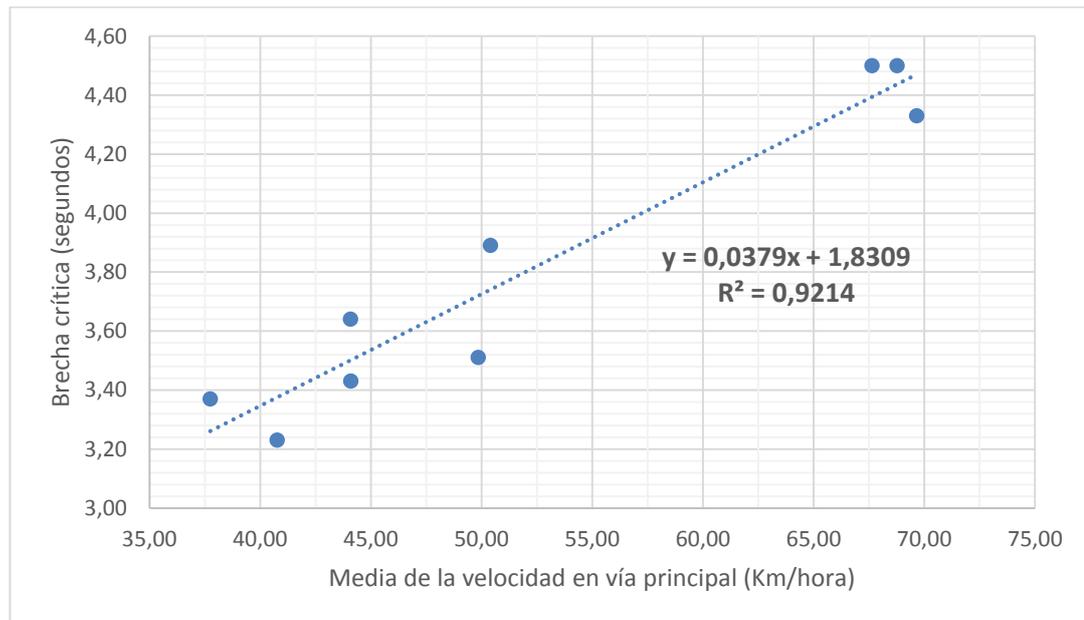


Figura 57. Relación de velocidades en vía principal y brechas críticas para giros derecha e izquierda desde vía principal en periodos pico y valle.

En la figura 57 se observa a simple vista que, los valores de brecha crítica parecen guardar cierta linealidad, de forma indiferente respecto al tipo de maniobra de giro realizada, en el intervalo de velocidad media mayor a los 35 Km/hora, mientras que los valores de brecha crítica donde la velocidad media en la vía principal fue menor a 30 Km/hora, parece tener una distribución propia. Coincidentemente, y al haber un comportamiento distinto en cuanto al valor de la brecha crítica, al pasar de un periodo de análisis a otro, se supuso que para valores de velocidad media en la vía principal menores a 30 Km/hora, el comportamiento de los vehículos tiende a ser más errático. Esto se refuerza además con el hecho de que, en los análisis estadísticos de las velocidades medias, el coeficiente de Anderson-Darling (AD) del total de horas de estudio, resulto el más elevado, lo que nos puede indicar una mayor lejanía a una distribución normal, además del hecho de que es en esta intersección en la que hubo mayor variación en cuanto a los valores de la brecha crítica determinados por ambos métodos.

Por lo tanto, para la determinación de una relación entre la velocidad media y el valor de la brecha crítica para cada intersección, se excluyeron las coordenadas pertenecientes a una velocidad media en la vía principal, menor a 30 Km/hora, ya que para analizar a detalle alguna relación por debajo de esa velocidad, se requieren más muestras tomadas de campo y además para determinar a partir de que velocidad media en el rango de 30 Km/hora y 35 Km/hora es que cambia el comportamiento de los vehículos.

En cuanto a los valores de velocidad media, mayores a 35 Km/hora, a diferencia de lo que indica el HCM, los valores de brecha crítica en la ciudad de Lima parecen ser indiferentes con relación al tipo de maniobra de giro realizada desde la vía secundaria. Debido a esto, se procedió a superponer en una sola gráfica los pares de valores de periodos pico y valle indistintamente del tipo de maniobra de giro, para observar si puede describir una ecuación que defina la tendencia de esta distribución.



*Figura 58. Relación de velocidades en vía principal y brechas críticas.  
Intervalos de periodos pico y valle.*

En la figura 58 se muestra la distribución de horas pico y valle de las intersecciones estudiadas, de cuya dispersión puede desprenderse la siguiente ecuación:

$$\tau(s) = 0.0379v + 1.8309 \dots (1)$$

Siendo “v” la media de la velocidad de los vehículos en la vía principal medido en kilómetros por hora, teniendo un coeficiente de determinación “R<sup>2</sup>” de 0.92. Con la ecuación (1), bastaría con medir una cierta cantidad de velocidades de vehículos que circulan por la vía principal para determinar la brecha crítica.

Hay que indicar que esta relación se basa en que bajo los alcances de la tesis, el giro a la derecha e izquierda son semejantes y que además de haber diferentes geometrías involucradas, esta ecuación puede ser representativa de los modelos teóricos de brechas usados para determinar la capacidad del acceso completo. Se debe recalcar que la aplicación

de esta ecuación, se debe tener presente que está circunscrita dentro de los alcances del presente estudio. Además, se puede aplicar en intersecciones en las cuales el aforo vehicular este compuesto de hasta un 3 % de motocicletas y un máximo de 11 % de vehículos pesados, en intersecciones cuyos vehículos en la vía principal tengan medias de velocidad entre 35 Km/h hasta 70 km/h, puesto que fuera de este rango de velocidades, el comportamiento de los conductores puede ser diferente, de forma especial para intersecciones con velocidad media menor como se explicó de forma previa.

#### 4.10 Comparación de capacidades empleando HCM y resultados del estudio

A continuación se plantea nuevamente el ejemplo hipotético visto en la revisión de literatura, para una intersección regulada por prioridad. Hay que indicar que se emplearan los modelos de Tanner, Gordon y Van Vliet con dos paquetes de datos, el primero empleando valores sugeridos por el HCM y el segundo empleando valores determinados mediante el presente estudio, a excepción del valor de intervalo mínimo de vehículos en la vía principal ( $\Delta$ ), el cual para ambos paquetes de datos será el sugerido por el HCM de 2.0 segundos.

Tabla 19. Paquetes de datos paralelos para análisis de escenario hipotético

Parámetro	Sugeridos por el HCM		Sugeridos por el presente estudio para vía principal con velocidad media de		
	Para giro a la derecha desde vía secundaria	Para giro a la izquierda desde vía secundaria	45 Km/hora	40 Km/hora	35 Km/hora
$\tau$ (segundos)	6.20	7.10	3.54	3.35	3.16
$\beta$ (segundos)	3.30	3.50	3.24		

Para tratar de establecer circunstancias similares de intersección vehicular, se optó por suponer intersecciones en donde la media de la vía principal fluctúe entre 35 Km/hora y 45 Km/hora, que es un rango característico de velocidades para vías urbanas. Se procesaron los datos, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 20. Capacidades de intersecciones usando modelos teóricos empleando en paralelo valores sugeridos del HCM y los determinados por el estudio

Procedencia	$\tau$	$\beta$	Capacidad de intersección empleando modelo		
			Tanner (Veh/hora)	Gordon y Miller (Veh/hora)	Van Vliet (Veh/hora)
HCM - giro izquierda	7.10	3.50	322	356	218
HCM - giro derecha	6.20	3.30	400	444	272
Ecuación para vía de 45 Km/h	3.54	3.24	680	754	461
Ecuación para vía de 40 Km/h	3.35		706	783	479
Ecuación para vía de 35 Km/h	3.16		733	813	498

Los valores presentados en la Tabla 20, se presentan de forma gráfica en la figura 59.

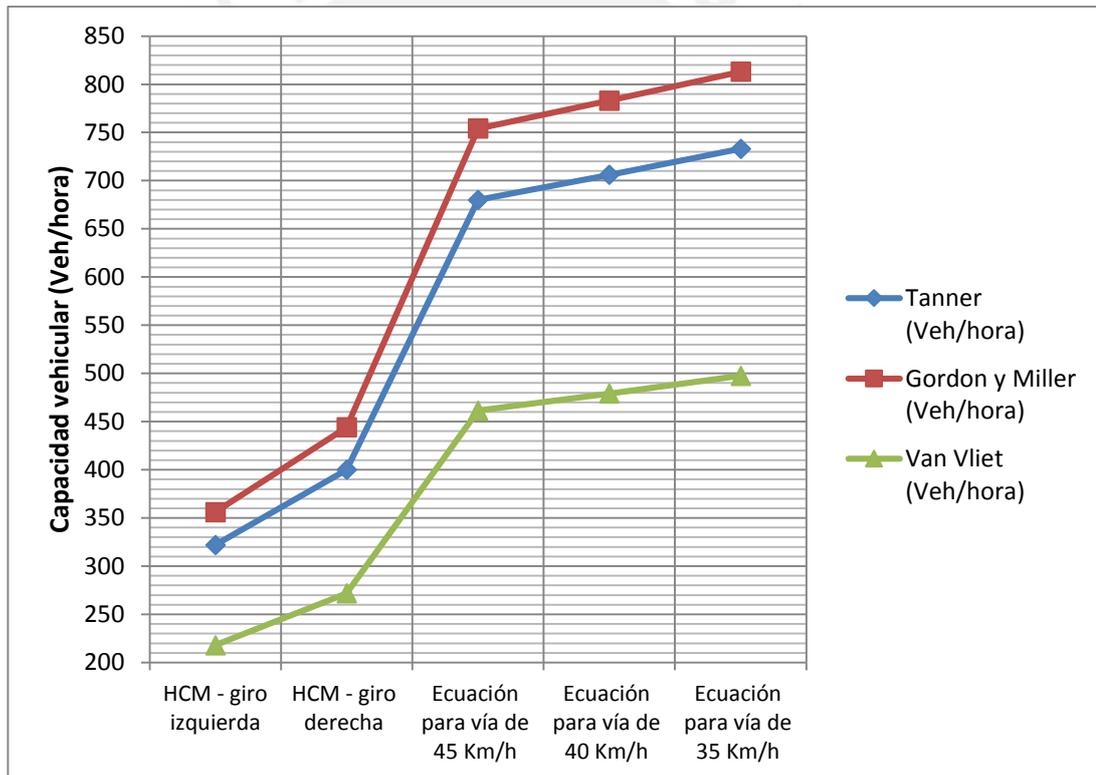


Figura 59. Comparación de brecha crítica empleando valores sugeridos por el HCM y sugeridos por la presente investigación

Como se ve en la figura 59, al emplear los valores de brecha crítica para giros a la derecha y a la izquierda desde la vía secundaria, se obtienen capacidades vehiculares mucho menores en comparación de aquellas capacidades empleando el valor de brecha crítica según la ecuación. Se observa además que las capacidades vehiculares calculadas por los modelos de Tanner en comparación con los de Gordon y Miller, arrojan resultados cercanos entre sí,

variando como máximo un 10.91 %. Esto puede deberse a que las suposiciones de ambos manejan un valor de  $\Delta$  relativamente cercano entre sí (de 2.0 segundos y 0 segundos respectivamente) mientras que el modelo de Van Vliet contempla además la disminución de la capacidad desde la vía secundaria en tanto sea mayor el grado de saturación en la vía principal, por lo que la capacidad calculada por este modelo es considerablemente menor.

Se ve que aplicando valores de brecha crítica ajenos a la ciudad de Lima, se tiene márgenes altos de diferencia. Con la ecuación determinada por este estudio, aun a pesar de que estudios posteriores podrían profundizar más en el análisis de estos factores, se tiene una mayor certeza en cuanto a la fiabilidad de los resultados obtenidos en comparación de adoptar valores sugeridos por el HCM o cualquier otro determinado por estudios en países y ciudades extranjeras.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo de la recolección de datos, se observaron eventualidades en el tránsito de vehículos que muchas veces son ajenas a lo que en los diseños geométricos se prevé, como por ejemplo: el hecho de que los conductores no respeten las líneas de parada, el hecho de que las trayectorias que siguen los vehículos dentro de las intersecciones no son las que se estima en los diseños, etc.

Por ese motivo, el enfoque de este estudio se fundamentó en una recolección generosa de datos de campo, los cuales progresivamente fueron resumidos de tal forma que representen el comportamiento de los conductores de la ciudad de Lima.

Se recomienda principalmente, para estudios similares, posicionar un punto de filmación lo más elevado posible, para poder captar mejor los movimientos y tener una vista cercana a dos dimensiones de los desplazamientos de los vehículos, lo que facilitaría la medición de las velocidades, captar los ángulos de incidencia de los vehículos provenientes de la vía secundaria hacia la vía principal. Además, se evitaría que los vehículos altos (como buses u otros vehículos pesados) interfieran con el área que se intenta grabar de forma continua, puesto que así se imposibilita recolectar la totalidad de los datos. Finalmente, se sugiere disponer de otras cámaras que filmen de forma sincronizada los fenómenos cercanos a la intersección, sobre de los vehículos provenientes de la vía principal.

En cuanto a los resultados del presente estudio, cabe mencionar que se sugiere una ecuación, que determina el valor de la brecha crítica en función de la media de la velocidad en la vía principal, lo que facilitaría la determinación de la capacidad de la vía secundaria en los modelos teóricos de brechas.

Las conclusiones del presente estudio en contraste con las hipótesis iniciales se detallan a continuación.

**Brecha crítica local y brechas críticas foráneas:** Los valores de brecha crítica vistos en otros países latinoamericanos, para intersecciones de características similares a las analizadas en el presente estudio, varían entre 3.0 segundos (Colombia) y 4.2 segundos (Argentina), mientras en que países fuera de Latinoamérica, se observan valores de brecha crítica que varían entre 3.2 segundos (Nigeria), 3.5 segundos (India e Irak), hasta valores comprendidos entre 4.5 y 7.0 segundos (EE.UU.).

El estudio determinó valores de brecha crítica en intersecciones urbanas comprendido entre 3.2 segundos como mínimo y 4.5 segundos como máximo. Por lo que, se puede ver que estos valores son similares a los hallados en otros países en Latinoamérica, aunque también en algunos fuera de ella (como India e Irak). Sin embargo, los valores hallados, para condiciones similares, en EE.UU. resulto ser considerablemente menor.

**Relación brecha crítica y velocidad de vehículos en vía principal:** Se pudo comprobar que existe una relación entre la media de la velocidad de los vehículos que transitan por la vía principal y la brecha crítica, pero además se pudo comprobar que esta relación puede describirse mediante una ecuación que se desprende de estos pares de valores. La ecuación elaborada fue:

$$\tau(s) = 0.0379v + 1.8309$$

$\tau$  : brecha crítica (segundos),  $v$  : velocidad media (Km/h)

Asimismo, se pudo determinar que esta relación es válida a partir de intersecciones reguladas por prioridad de paso en cuyas vías principales se obtuvo una velocidad media mayor a 35 Km/hora. Para vías principales que presentan una velocidad media menor a 30 o 35 Km/hora, no existe la seguridad de que esta misma linealidad conserve su integridad matemática. Por lo que se concluye que esta ecuación lineal es válida en un rango de velocidades medias en la vía principal entre 35 Km/hora y 70 km/hora, con un porcentaje máximo de 11 % de vehículos pesados y de 5 % de motocicletas.

**Brecha crítica y visibilidad desde la vía secundaria:** Se pudo determinar por medio del presente estudio que no existe una relación entre ambos. Esto debido que si bien puede definirse un punto de referencia en el que los conductores deben detenerse para observar los vehículos que se aproximan por la vía principal, este punto no les resulta relevante. Se reconoce que se necesitaría más analizar un mayor número de intersecciones.

**Brecha crítica y aforo vehicular en intersección:** En cuanto a esto, se puede determinar que los valores de brecha crítica tienden a aumentar hasta en 13.4 % pasando de un periodo pico a un periodo valle. Sin embargo, cabe señalar que este aumento en el valor de la misma es válido para intersecciones donde la velocidad media de vehículos en la vía principal es mayor a 35 Km/hora.

**Brecha crítica y tipo de maniobra de giro:** No se pudo determinar que existe una diferencia de la brecha crítica y el tipo de giro. Si bien, en intersecciones de condiciones similares analizadas dentro del estudio, se halló una diferencia en la brecha crítica entre

ambos tipos de maniobra, de 0.15 segundos, este único valor para dos intersecciones analizadas, no es de por sí suficiente para hacer tal aseveración, puesto que tampoco es una diferencia considerable. Se reconoce que se necesitaría más analizar un mayor número de intersecciones.

**Valores de brecha crítica por distintos métodos de determinación:** Se pudo comprobar que la determinación de la brecha crítica en una intersección por el método de Raff y por el Método del Percentil 50 ofrecen prácticamente los mismos resultados, con una variación máxima de valores entre 4.45 % en las intersecciones cuya velocidad media en la vía principal fue mayor a 35 Km/hora. Además, los valores de brecha crítica hallados por ambos métodos presentaron menores variaciones (apenas 0.3 %) entre sí en la intersección que presentó la mayor velocidad media en la vía principal.

**Valor de tiempo de avance de cola medido de campo y el valor sugerido por el HCM:** El valor obtenido mediante observaciones de campo (3.24 segundos) en comparación de los sugeridos por el HCM (3.3 segundos para giro a la derecha y 3.5 segundos para giro a la izquierda) resultaron ser muy cercanos, variando como máximo un 8.35 %. Esta similitud puede deberse a que depende principalmente del tiempo de reacción del conductor y de la capacidad de aceleración desde el reposo del vehículo, que en muchos países es similar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abhishek C.S. y Mukti A. (2014). An assessment of the gap measurement phenomenon at typical three armed intersections on indian inter-urban roads. **IRJSSE**, 35(9), 1-2.
- Adbul Kareen, Y. (2001). **A comparative study of gap acceptance at priority intersections**. Ilorin, Nigeria.
- Akcelik, R. (2011). **A review of gap-acceptance capacity models**. Adelaide, Australia.
- Al-Taei, A. K. (2010). **Gap acceptance and traffic safety analysis on U-TURN median openings of arterial roads**. Duhok, Irak.
- Applications, I. J. (2014). **Critical Gap Comparison Between Hardest and "INAFOGA" Methods for U-Turns median openings**. Odisha.
- Cerquera Escobar, F. (2007). **Capacidad y niveles de servicio de la infraestructura vial**. 1ra Ed. Tunja, Colombia.
- Cowan, R. (1975). **Useful Headway Models**. Transportation Research 9(6), pp.371-375
- Dextre, J. (2001). **Curso de ingeniería de tráfico: la planificación y las políticas de transporte**. Colegio de Ingenieros del Perú. Lima, Perú
- Dextre, J. (2001). **Curso de ingeniería de tráfico: seguridad vial**. Colegio de Ingenieros del Peru. Lima, Perú
- Dextre, J. (2008). **Vías Humanas: Un enfoque multidisciplinario y humano de la seguridad vial**. Fondo Editorial PUCP. Lima, Perú
- Fernandez, A. (2011). **Elementos de la teoría del tráfico vehicular**. Fondo Editorial PUCP. Lima, Perú.
- Kraemer, C. **Ingeniería de carreteras**. Volumen I. McGraw-Hill. Interamericana de España.
- López A. y López J. (2006). **Evaluacion de los intervalos de aceptacion de los conductores que esperan en una interseccion con señal de pare en forma de "T" o "Y" en tres intersecciones en Manzinales**. Manzinales, Colombia.

- Nicholas, J. (2005). **Ingeniería de tránsito y de carreteras**. 3ª Ed. Thomson, Mexico D.F.
- Plank, A. W. (1984). **A general capacity formula for an uncontrolled intersection**. *Traffic Engineering Control*. Vol. 25 (60) (1984) 327-329
- Radelat, G. (2003). **Principios de ingeniería del tránsito**. Instituto de ingenieros de transportes. 3ra Ed. Washington D.C.
- Raff, M. S.; Hart, J. W. (1950). **A Volume Warrant For Urban Stop Sign**. *Traffic Engineering and Control*, 5/1983, pp.255-258.
- Sai, A. C. (2014). **An assessment of the Gap Measurement Phenomenon at Typical Three Armed Intersections on Indian Inter-Urban Roads**. *International Research Journal Of*, 1-2.
- Schwar, J. (s.f.). **Statistical Methods in Traffic Engineering**. 1967.
- Suárez, C.L. (2007). **Análisis y evaluación operacional de intersecciones urbanas mediante microsimulación**. Medellín, Colombia.
- Tanner, J. (1962). **A theoretical analysis of delay at an uncontrolled intersection**. *Biometrika* (1962).
- Tindiwensi, G. M. (2011). **Estimating the critical GAP and FOLLOW-UP headway at roundabouts in Uganda**. Assistant lecturer, Faculty of technology, Makerere University.
- Transportation Research Board. **Highway Capacity Manual**. Transportation. National Research Council.
- Transporte, C. P. (2011). **Glosario de términos de transporte y tránsito**. Lima, Perú.
- Tupper, S. M. (2011). **Safety and operational assesment of gap acceptance through large-scale field evaluation**. Massachusetts, USA.
- Valdez D. y Rivera J. (2012). **Gap acceptance studies and critical gap times for two-way stop controlled intersections in Mayagüez**. Mayaguez, Puerto Rico

Valdés Gonzalez-Roldán, A. (2008). **Ingeniería de tráfico**. Bellisco. Madrid, España

Wagner, F. A. (1965). **An Evaluation of Fundamental Driver Decisions and Reactions at an Intersection**. 1965, 44ª Reunión del Highway Research Board, Washintong D.C.

Wang, R. y Ruskin, H. (2002). **Modeling traffic flow at an urban unisgnalized intersection**. School of Computer Applications, Dublin City University, Dublin, Ireland

