

1

VI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA DE TRANSITO Y TRANSPORTE
(Popayán, Colombia, Julio 10 a 13 de 1990)

METODO PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD Y DEMORAS
EN LAS INTERSECCIONES TIPO ROTONDA DE COSTA RICA

Ing. Mario Roberto Durán Ortiz, M.Sc.
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTES
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL, UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

R E S U M E N

En Costa Rica se comenzaron a usar las rotondas o glorietas hace apenas diez años. Debido, a que se encontró que el modelo de funcionamiento por entrecruzamiento era inadecuado, se realizaron una serie de investigaciones que culminaron con la propuesta de un método para estimar la capacidad y demoras.

En este trabajo se describe en detalle el método costarricense, el cual establece que las rotondas funcionan como si estuvieran compuestas por varias intersecciones en T. Se comprobó que la capacidad depende principalmente de la habilidad de los conductores que ingresan, para aceptar los intervalos entre vehículos que ya circulan dentro de la rotonda (intervalo crítico) y de la magnitud de ese volumen que les impide ingresar (volumen opuesto). El modelo de demoras fue adoptado del manual de capacidad Sueco, y corresponde a un modelo de colas M/G/1.

El método que aquí se presenta tiene la ventaja de que el modelo de capacidad permite una fácil calibración de los parámetros que intervienen, por lo cual resulta sencillo el ajuste para las condiciones de otros países. Se considera que el método es una herramienta muy útil en la planificación, diseño y operación de este tipo de intersecciones.

INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

De acuerdo con la reseña histórica elaborada por Todd (1), la tradición europea de construir plazas y plazoletas con monumentos, fuentes y otro mobiliario arquitectónico se remonta varios siglos atrás. El tránsito de carretas y carruajes tirados por caballos alrededor de estas islas, circulaba en todas direcciones, hasta que el movimiento giratorio en un solo sentido fue propuesto. Así nació la rotonda como se le conoce hoy día, propuesta en forma independiente por William Eno en Estados Unidos y Eugène Hénard en Francia, a principios de este siglo.

Con este concepto, se construyeron las primeras rotondas: Columbus Circle, en Nueva York, 1905; Place de l' Etoile, en Paris, 1907; y Sollershot Circurs, en Gran Bretaña, 1910 (1,2).

Es claro entonces que no toda calle alrededor de una plazoleta puede considerarse como una rotonda. En términos de Ingeniería de Tránsito, una rotonda se define como un tipo de intersección a nivel en la cual el tránsito que llega por todos los accesos converge en una calle de un solo sentido. Esta calle corre continua alrededor de una isla central de forma generalmente circular u ovalada. En Costa Rica, la rotación se realiza en sentido contrario a las manecillas del reloj y la prioridad de paso la tienen los vehículos que ya circulan dentro de la rotonda (denominada "offside priority" en los países de habla inglesa). La prioridad se regula con señalamiento vertical y horizontal de "CEDA EL PASO" en cada una de las entradas de las rotondas.

Las primeras rotondas y sus sucesoras, funcionaron con la regla de prioridad al vehículo de la derecha ("nearside priority"), por lo que el paso lo cedían los vehículos dentro de la rotonda. Después de la Segunda Guerra Mundial, la congestión en las rotondas comenzó a generalizarse, por lo que comenzaron a ser sustituidas por intersecciones controladas con semáforos en muchos países, principalmente en Estados Unidos. La excepción fueron Alemania y Reino Unido, países que no descontinuaron su uso y donde se realizó investigación que permitió mejorarlas.

Es precisamente en Inglaterra donde Wardrop (3) desarrolla la primera fórmula para determinar la capacidad de una rotonda, en 1957. Esta fórmula determina la capacidad en función de la geometría y los volúmenes de la sección de entrecruzamiento. Por varias décadas se usó este modelo en muchos países y fue la causa de que se aumentara el tamaño de las rotondas para permitir mayores longitudes de entrecruzamiento. A su vez, esto motivó aun más la sustitución por intersecciones con semáforo en otros países.

En Costa Rica, la influencia de la tecnología y literatura proveniente de Estados Unidos es grande en lo que a diseño vial e Ingeniería de tránsito se refiere. Los manuales de diseño de AASHTO de 1965 (4) y de 1973 (5), aunque señalan algunas ventajas de las rotondas, en el fondo no recomiendan su uso, siendo el criterio principal la consideración de que una intersección canalizada diseñada adecuadamente, usualmente funcionará mejor que una rotonda. Similar criterio establecen otros textos estadounidenses. En cuanto a la capacidad, el HCM 65 (6) establece que la rotonda debe considerarse como una serie de secciones de entrecruzamiento. Por otra parte el prestigioso Manual de ITE de 1982 (7) recomienda la fórmula de Wardrop.

Las versiones revisadas de estos manuales, tanto el manual AASHTO de 1984 (8), como el HCM 85 (9), ni siquiera hacen mención a las rotondas. El centro de distribución de software Mc Trans, de la Universidad de Florida, tiene disponible el programa para microcomputadora CIRCAP (1987), que usa la fórmula de Wardrop. Como se verá más adelante, el enfoque estadounidense está desactualizado.

A pesar de las recomendaciones estadounidenses, en Costa

Rica se comenzaron a usar las rotondas en 1978. Ello obedeció a la exitosa operación de las rotondas españolas, que observaron ingenieros del Ministerio de Obras Públicas Y Transportes en una visita técnica realizada a ese país.

Los primeros estudios de funcionamiento de las rotondas fueron realizados por Durán en 1982 (10) y Vargas en 1983 (11). En ambos estudios se usó la fórmula de Wardrop y se determinó que las rotondas funcionarían bien hasta el año 2.000. En 1984, entran en operación las rotondas por las que transitan mayores volúmenes (actualmente entre 40.000 y 50.000 vehículos diarios) y resultó evidente que el modelo de entrecruzamiento no coincide con la realidad.

Esto motivó en 1987, el inicio de varios estudios de investigación sobre el funcionamiento de las rotondas, a través de una serie de tesis dirigidas por el autor, como parte del Programa de Investigación del Departamento de Ingeniería del Transporte, de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Para los trabajos de campo, se contó con la colaboración del Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

El autor propuso la hipótesis de que las rotondas funcionan como si estuvieran compuestas por varias intersecciones en T. En 1987, Flores y Picado (12) evalúan preliminarmente esta hipótesis y concluyen que las rotondas no funcionan por entrecruzamiento.

En 1988, Durán (13) profundiza en la definición y análisis de la hipótesis, logra comprobar su validez y establece un marco teórico para continuar la investigación. En ese trabajo la identificación de los modelos existentes para estimar la capacidad de una intersección en T, se realizó con la ayuda de dos recopilaciones del "estado del arte" en ese tema, realizadas por la OECD europea (14) y Durán (15). De total de trece modelos identificados, once corresponden a modelos para intersecciones en T y solo dos estimaban la capacidad propiamente de cada entrada de una rotonda. Un método fue desarrollado en el Reino Unido y el otro en la Unión Soviética, y ambos son del tipo empírico. Por otra parte, la revisión de literatura permitió conocer la existencia de otros dos modelos desarrollados en Suecia y Australia. Los cuatro modelos se basan en esquemas similares al propuesto para Costa Rica, pero no se contaba con información sobre el marco teórico y detalles del desarrollo de esos modelos.

En ese mismo año, Bolaños (16), Chaves (17) y Salamanca (18) profundizan la investigación, amplían la base de datos, estudian posibles modelos de demoras y el efecto de los vehículos pesados en la capacidad. De esta forma se establece un procedimiento preliminar para estimar la capacidad, demoras y niveles de servicio. Finalmente, en 1989, Elizondo (19) realiza un estudio comparativo con métodos de otros países y propone algunos ajustes al método costarricense.

Para el estudio de Elizondo, se contó con una revisión del "estado del arte" en el tema de capacidad de rotondas, realizado por Durán a inicios de 1989, en la biblioteca especializada del Instituto de Estudios de Transporte (ITS) de la Universidad de California Berkeley. La literatura revisada permitió conocer que desde mediados de la década de los setenta se inició el

desarrollo de métodos basados en la teoría de aceptación de intervalos. El primer método publicado fue desarrollado por Hansen en 1977, como parte del Manual de Capacidad Sueco (20), patrocinado por Administración Nacional de Caminos de Suecia. El siguiente método, en su versión final, fue desarrollado por Kimber en 1980 (21), bajo el auspicio del TRRL del Reino Unido. El método de la Unión Soviética fue publicado en 1982 (22) y es el único del que no se conocen detalles sobre su desarrollo, pero el método es similar al de Kimber. El último método, es el Australiano, que originalmente fue desarrollado por Horman y Turnbull en 1974, y es el que aparece en la Guía para el Diseño de Rotondas (23) publicada por NAASRA en 1980.

Esta revisión permitió determinar que la base teórica del método costarricense era la misma que la de los métodos Británico, Sueco, Australiano y Soviético. Por otro lado, se tuvo conocimiento de que en 1966, en el Reino Unido se cambió la regla de prioridad de modo que ahora deben ceder los vehículos que quieren ingresar a la rotonda. Esta medida permitió descongestionar muchas rotondas, y a pesar de que se varió el esquema funcional, por muchos años se continuó usando la fórmula de Wardrop (mismo error que se cometió en Costa Rica en los estudios efectuados en 1982 y 1983, y que contienen los manuales estadounidenses). El cambio de regla de prioridad también permitió reducir considerablemente el tamaño de las rotondas.

Para concluir, cabe mencionar que de la investigación realizada en Costa Rica, se obtuvieron varios productos. En primer término, y quizás el principal, es el método para estimar capacidad. Esta es una herramienta útil para planificar, diseñar y operar las rotondas, y por ende, permite determinar técnicamente cuando es conveniente usar este tipo de intersección. La última versión del método es la que se describe en este trabajo y cuyo sustento experimental se presentará con mayor detalle en el Tercer Congreso Nacional de Ingeniería de Transporte de Costa Rica, a celebrarse en Julio de 1990 (24).

Otras aplicaciones de la investigación fueron el determinar la manera correcta de conducir en una rotonda (25,26); la definición del señalamiento vial adecuado (26); criterios para el diseño y la propuesta de dispositivos de control para aumentar la vida útil de las rotondas existentes (esta dos aplicaciones aún no están documentadas). El MOPT ya ha puesto en práctica varias de estas aplicaciones.

DESCRIPCION DEL METODO

El estudio detallado del funcionamiento de intersecciones es indispensable para garantizar la movilidad del sistema vial, en especial en zonas urbanas. Ello obedece a que normalmente las intersecciones son los puntos de menor capacidad del sistema.

Es por esta razón, que, a diferencia de las autopistas, calles y carreteras, no es suficiente conocer la capacidad de cada acceso de una intersección. Se requiere conocer de otras medidas de eficiencia, tales como demoras, longitud de colas, proporción de vehículos detenidos, etc.

Estas medidas de eficiencia adicionales son importantes para

propositos de diseño y planeamiento, ya que proveen de información indispensable para realizar evaluación de alternativas, diseño de carriles de giro, determinación de posibles interferencias con otras facilidades viales, etc. Por otra parte, es bien conocido que en condiciones de flujo discontinuo, como es el caso de las intersecciones, la relación volumen/capacidad no siempre describe de manera fidedigna la calidad de la operación o nivel de servicio.

De esta forma, la investigación realizada en Costa Rica sobre las rotondas, se propuso obtener un método que además de estimar la capacidad, permitiera estimar las demoras y longitud de colas. En la actualidad y debido al gran avance que ha tenido la computación, usualmente el objetivo propuesto se logra a través de modelos de simulación. Sin embargo, ese enfoque no se consideró apropiado, porque primero era necesario comprender mejor el esquema real de operación de las rotondas, fundamentados en verificación experimental.

Por ese motivo, la investigación se limitó a modelos de tipo matemático-probabilísticos (analíticos), empíricos y semiempíricos. El modelo de capacidad seleccionado es del tipo analítico, mientras que el modelo de demoras es semiempírico. El procedimiento del método, que a continuación se describe, se divide en dos módulos: el primero permite estimar la capacidad de cada acceso de una rotonda, mientras que el segundo módulo estima la demora media total y la longitud de cola media en función del grado de congestión (V/C) obtenido en el primer módulo.

Otra razón para separar el procedimiento en dos módulos, es que el modelo de capacidad cuenta con un respaldo experimental mucho más amplio que el modelo de demoras.

MODULO 1: METODO PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD

Como ya se indicó, inicialmente se identificaron trece modelos y métodos para estimar la capacidad de una intersección en T. Durán (13), concluyó que los modelos más prometedores eran: el método Sueco para intersecciones controladas con ALTO y CEDA (15,20); el modelo analítico propuesto en el Reino Unido por Tanner (27,28); y el modelo de Harders (14), que fácilmente puede demostrarse es un caso particular del modelo de Tanner.

Bolaños (16) revisa el ajuste de los modelos para dos sitios y para condiciones extremas. Luego Salamanca (18) amplía el estudio de condiciones extremas y hace mediciones adicionales para comprobar los supuestos hechos por Durán y Bolaños sobre el efecto de los vehículos pesados. Concluye que el modelo de Harders es el que mejor representa las condiciones de operación de las rotondas de Costa Rica. A este punto de la investigación, ya se contaba con una versión preliminar del método.

Con base en toda la información recolectada por Elizondo (19), que cubre 12 accesos de tres de las rotondas más congestionadas, más 2 accesos adicionales estudiados por Salamanca (18), se completó una base de datos que cubre un 33% de los accesos de rotondas actualmente en operación. Analizando esta información, e integrado las cuatro tesis realizadas sobre el tema, Durán (24) propuso el procedimiento aquí descrito.

El grado de confianza que puede esperarse de este método, se

ilustra a continuación. La Figura 1 muestra las capacidades observadas en el acceso San Pedro de la rotonda del mismo nombre. La línea a trazos corresponde a la curva de regresión (lineal simple con transformación logarítmica) obtenida inicialmente, solo con los datos de la rotonda San Pedro. Al agregar información de otros dos sitios con parámetros similares, pero obtenidos para un volumen opuesto más bajos (condición de extremo), se aprecia como la curva de regresión se mueve un poco hacia arriba.

En la Figura 2 se muestra esa última curva de regresión con sus respectivas bandas de confianza (al 95%) tanto para el error estándar de la muestra, como para el error estándar de la estimación promedio. Obsérvese el excelente ajuste de la capacidad estimada con el procedimiento que aquí se propone. Sobreestima ligeramente en el extremo derecho y posteriormente siempre queda encerrada por las bandas de confianza de la estimación promedio.

En la Figura 3 se muestra la capacidad observada en el acceso Sabanilla de la rotonda San Pedro, que tiene características geométricas diferentes (nótese que el intervalo crítico, t_c , es más pequeño que en el primer caso). Al comparar en la Figura 4 con la capacidad estimada por el método, también se observa un buen ajuste, aunque la variabilidad de la muestra ahora es mayor. La sobreestimación también es mayor, pero debe considerarse que no fue posible medir capacidades en el extremo. Con base en el comportamiento observado en el primer sitio (Figura 1) al incluir volúmenes opuestos bajos, es de esperar que la curva de regresión observada suba, por lo que la sobreestimación detectada en el acceso Sabanilla disminuye. De todas maneras, se aprecia que la capacidad estimada, siempre queda encerrada por las bandas de confianza del error estándar de la estimación promedio de la línea de regresión.

Una vez mostrada la confiabilidad del método, a continuación se describe el procedimiento de cálculo.

1- Información básica

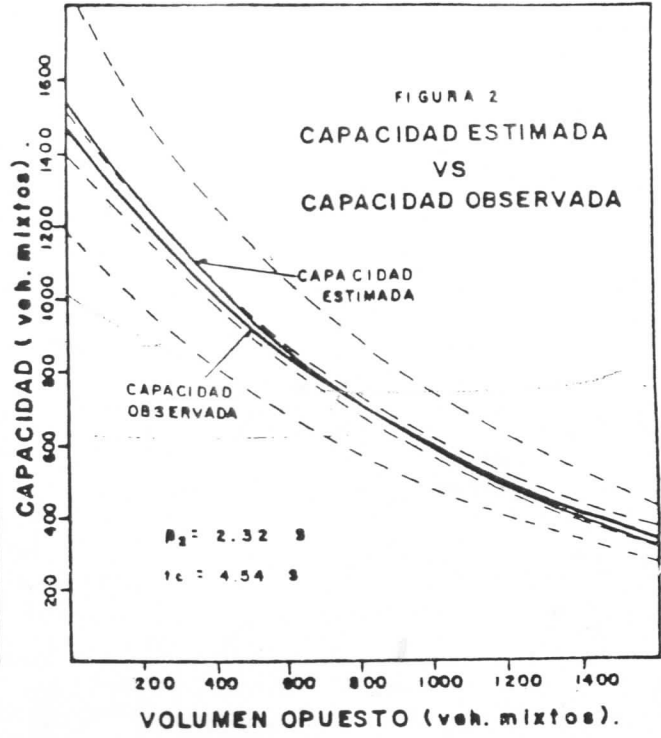
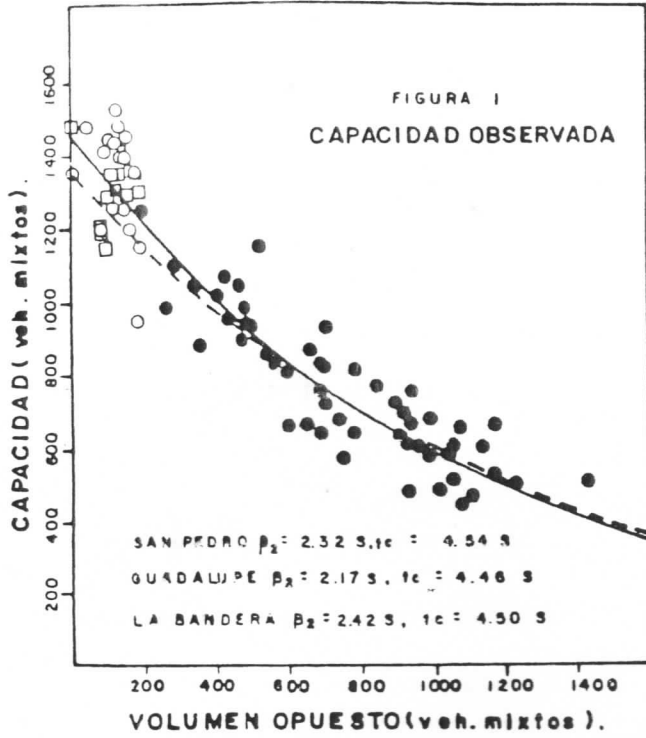
Se deben medir en el campo o proyectar los volúmenes, porcentajes de vehículos pesados y factor de hora pico para cada acceso de la rotonda. También se debe recopilar la información geométrica de la rotonda: número de carriles de circulación y en el acceso, ángulos de entrada de cada carril, radio central de la rotonda y separación entre salidas y entradas (ancho máximo de la isla separadora).

Se recomienda obtener los volúmenes por origen y destino, aún en rotondas existentes. Esto, para facilitar el cálculo del volumen opuesto a cada acceso y además es indispensable en el caso de análisis comparativo con otro tipo de intersección, que normalmente requiere de una redistribución de los flujos.

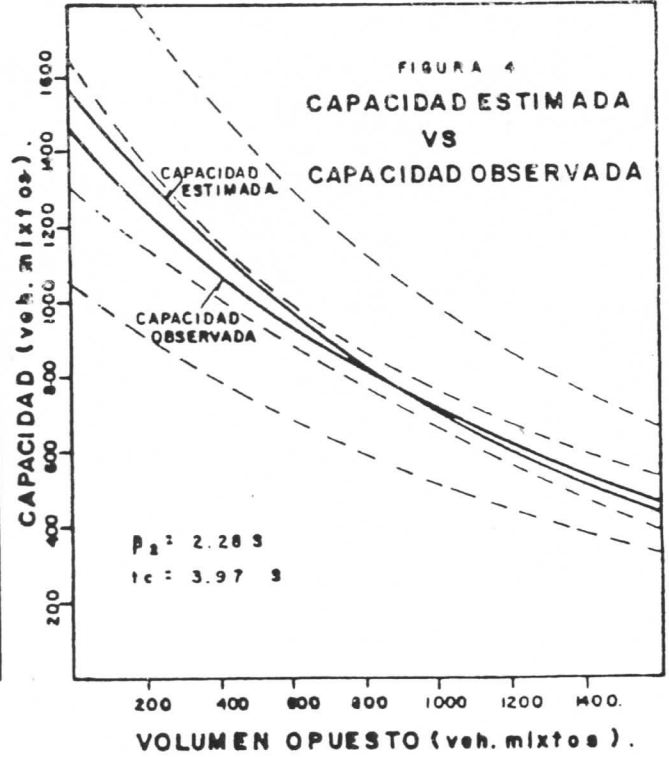
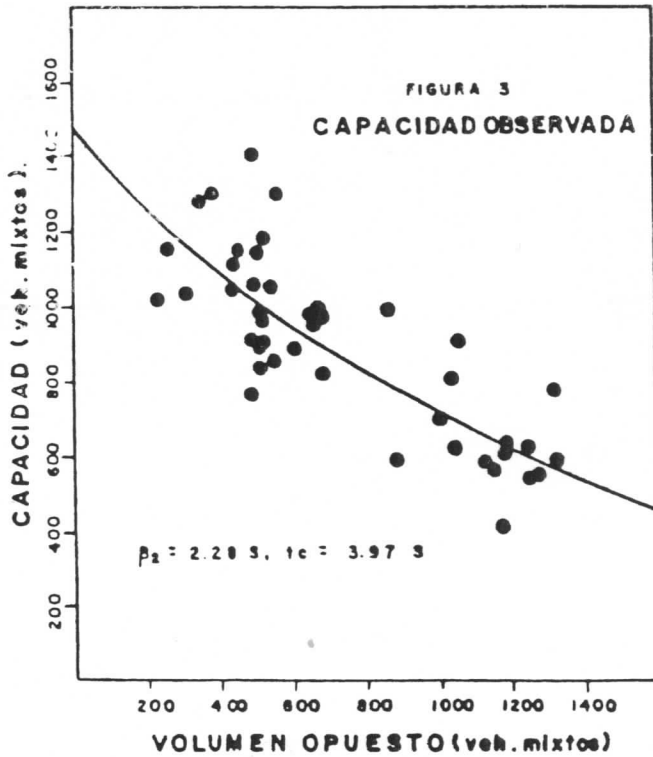
En cuanto al factor de hora pico se recomienda medirlo para intervalos de 15 minutos, y luego deben transformarse los volúmenes horarios a tasas de flujo horario:

$$FHP_{15} = \frac{\text{Volumen total en una hora}}{4 * \text{Volumen máximo en 15 min}}$$

CURVAS DE CAPACIDAD ROTONDA SAN PEDRO - ACCESO SAN PEDRO



CURVAS DE CAPACIDAD ROTONDA SAN PEDRO - ACCESO SABANILLA.



$$\text{Tasa de Flujo Horario} = \frac{\text{Volumen horario}}{\text{FHP 15}}$$

Estos valores y transformaciones son similares a las que recomienda el HCM 85 (9), y son necesarias para uniformizar las fluctuaciones que ocurren durante la hora pico.

Debe tenerse presente, sin embargo, que al aplicar este factor de alguna forma se está sobrediseñando. Dadas las limitaciones económicas de los países latinoamericanos, para Costa Rica se recomienda aplicar el factor, siempre y cuando sea igual o mayor a 0.8 (que ya implica una sobreestimación máxima del 25% para los restantes 45 minutos). Entre más alto sea el valor, menor será la sobreestimación, porque ello implica que las fluctuaciones son menores.

En caso de que el factor sea menor a 0.8, se recomienda no aplicarlo y en su lugar evaluar los posibles impactos de que la congestión se disipe en un tiempo superior a 15 minutos. Por ejemplo, si un acceso corresponde a una vía alimentadora de un barrio residencial, en la cual la demanda es muy concentrada, podría aceptarse la congestión en un periodo corto.

Los otros cuatro métodos que estiman la capacidad de rotondas no usan el factor de hora pico, pero tres de ellos dan una recomendación que es equivalente. El método Soviético (22) establece que la razón V/C debe ser menor o igual a 0.85. Los métodos Sueco (20) y Australiano (23) recomiendan que no debe diseñarse para valores de V/C superiores a 0.80.

En cuanto a la información geométrica, la misma puede obtenerse de los planos de diseño de la rotonda. En el caso de diseños nuevos debe hacerse un esquema preliminar a escala y trabajar con valores aproximados.

2- Distribución de los flujos por carril

Debido a que se observaron diferencias en la operación de los carriles de un acceso dado, se hace necesario conocer la demanda por carril.

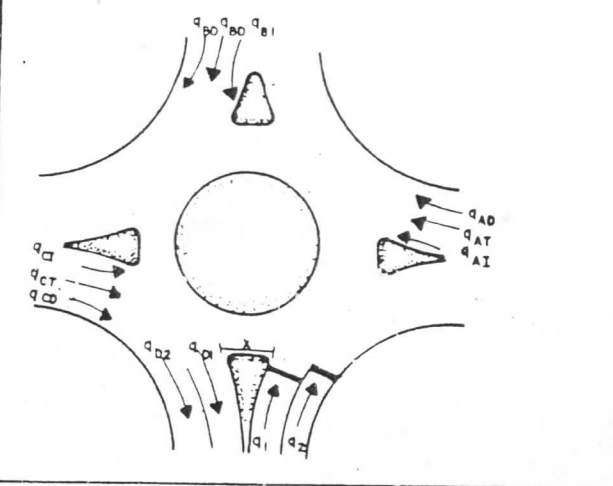
De acuerdo con reglas para conducir en una rotonda vigentes en Costa Rica (25,26), no se permite el entrecruzamiento dentro de la rotonda. Entonces, los conductores deben ubicarse en cada carril según su destino. Esto hace que teóricamente la distribución por carril pueda obtenerse de la medición de volúmenes por origen-destino (del paso anterior). Sin embargo, estudios de la Dirección de Ingeniería de Tránsito han mostrado que solo un 58% de los conductores se ubican correctamente, por lo que no se puede aplicar ese procedimiento.

Se recomienda entonces, medir en el campo la distribución por carril en cada acceso. En el caso de nuevos diseños, se recomiendan las distribuciones mostradas en la parte superior de la Tabla 1. Estas distribuciones se fundamentan en datos obtenidos de varios estudios que cubren un total de 36 accesos (en Costa Rica existen 10 rotondas, con un total de 42 accesos).

A inicio de 1990 se inició una campaña educativa, que va acompañada de la implementación un nuevo señalamiento que fomenta la ubicación correcta en el acceso (26). Cuando se determine que por lo menos el 85% de los conductores conduzcan correctamente, se aplicará la distribución teórica.

VALORES RECOMENDADOS PARA EL METODO DE CAPACIDAD.

DISTRIBUCION DEL VOLUMEN SECUNDARIO POR CARRIL							
IZQ	DER	ACCESO DE DOS CARRILES		IZQ	ADIC.	ACCESO DE UN CARRIL.	
55%	45%	HORA PICO, SIN SOBREAÑOCHO		70%	30%	HORA PICO, CON CARRIL CORTO	
45%	55%	FUERA PICO, CON/SIN SOBREAÑOCHO		ACCESO DE TRES CARRILES			
55%	45%	HORA PICO CON	POSIC. ADIC. IZQ: 5%	IZQ		CEN DER.	
45%	55%	SOBREAÑOCHO	POSIC. ADIC. DER: 10%	25%	45%	30%	FUERA PICO
				40%	35%	25%	HORA PICO
							POSIC. ADIC. 10 - 15%



DEFINICION DE VOLUMEN OPUESTO PARA CADA CARRIL DE ACCESO

$$Vop - q_2 = q_{CT} + q_{B1}$$

$$Vop - q_1 = K_1 q_{D1} + q_{C1} + q_{CT} + q_{E2}$$

$$= K_1 q_{D1} + q_{C1} + Vop - q_2$$

con $K_1 = 0$ si $X > 5m$
 $K_1 = 0.1$ si $X < 5m$

VALOR DE INTERVALO DE SEGUIMIENTO, β_1 , CORRIENTE PRINCIPAL. ROTONDA DE UN CARRIL
 $\beta_1 = 1.7 \text{ seg.}$

VALORES DE INTERVALO DE SEGUIMIENTO (0% PESADOS), β_2

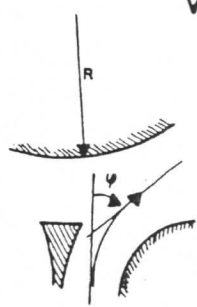
$\beta_2 = 2.1 \text{ seg.}$	RADIO ROTONDA $< 15m$
$\beta_2 = 2.3 \text{ seg.}$	RADIO ROTONDA $> 15m$, ENTRADA NORMAL $\phi \leq 60^\circ$
$\beta_2 = 2.5 \text{ seg.}$	RADIO ROTONDA $> 15m$, ENTRADA FORZADA $\phi > 60^\circ$

FACTOR DE CORRECCION + 0.1 seg. POR CADA 10% PESADOS.

VALORES DE INTERVALO CRITICO (0% PESADOS), t_c

$t_c = 4.0 \text{ seg.}$	RADIO ROTONDA $> 15m$, ENTRADA TANGENCIAL, $\phi < 40^\circ$
$t_c = 4.2 \text{ seg.}$	RADIO ROTONDA $> 15m$, ENTRADA NORMAL, $40^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$
$t_c = 4.5 \text{ seg.}$	RADIO ROTONDA $> 15m$, ENTRADA FORZADA, $\phi > 60^\circ$
$t_c = 4.0 \text{ seg.}$	RADIO ROTONDA $< 15m$.

FACTORES DE CORRECCION + 0.3 seg. POR CADA 10% PESADOS
 - 0.2 seg. PARA CORRIENTE CARRIL DERECHO.



Sobre este aspecto, el método Sueco (20) hace uso de una distribución teórica similar a la aquí descrita. El método Australiano propone una distribución en partes iguales (23). El método Soviético (22) trabaja con la capacidad global del acceso. El método Británico (21) también considera la capacidad global del acceso, pero en función directa del ancho.

Por otra parte, al realizar los estudios de uso de carril se observó que durante la hora pico, en accesos con sobreaancho se generan posiciones de servicio adicionales (19). Esto hace que la capacidad del acceso aumente. Este efecto también lo consideran los métodos Sueco (20) y Británico (21), aunque este último lo sobreestima (24). Este aspecto podría corregirse usando un modelo de colas tipo M/G/2. Sin embargo, no todos los vehículos usan la posición adicional. Aunque el modelo Sueco tiene un procedimiento detallado para considerar este efecto, no ha sido validado para Costa Rica.

Se prefiere entonces, usar una simplificación. Se recomienda cuantificar en campo el volumen que usa la posición de servicio adicional. Si el porcentaje es menor del 30%, se debe restar ese volumen de la corriente y calcular con el restante la relación V/C del carril. El máximo que se ha observado es del 15%. En caso de que la posición sea usada por más del 30% de los conductores, si se forma otra cola y por tanto puede calcularse como si fuera otro carril (carril corto). En la Tabla 1, además de la distribución por carril se dan los valores típicos de uso de la posición adicional, para el caso en que no sea posible medirlos en sitio.

3- Determinación de los Volúmenes Opuestos

El cálculo del volumen opuesto es similar al de un giro a la derecha en una intersección en T. Se debe cuantificar todo el volumen que impide o inhibe el acceso a la rotonda, para las corrientes de cada carril.

En la Tabla 1, se muestra el procedimiento para calcular el volumen opuesto de cada carril. Si el acceso tiene más de dos carriles, los carriles centrales se considerarán como si fueran un carril izquierdo. De la definición de volúmenes opuestos se observa que el carril derecho tiene un menor volumen opuesto, y por ende su capacidad es mayor.

En cuanto a la corriente del carril izquierdo se debe mencionar que es inhibido por los vehículos que abandonan la rotonda. A mayor separación entre la salida y la entrada, X, el efecto de los giros a la derecha tiende a disminuir y desaparece cuando $X > 5m$. El valor de $K_1 = 0.1$ para $X < 5m$, es el promedio obtenido de un estudio de observación realizado en dos sitios (19). Debe aclararse que en las rotondas costarricenses no es frecuente que la isla separadora entre salidas y entradas sea tan pequeña. Por otra parte, para $X > 5m$, con base en estudios de observación en cinco sitios (19) y para 4017 vehículos, se obtuvo $K_1 = 2.7\%$, que se consideró despreciable.

Sobre este aspecto, solo el método Sueco (20) hace diferencia entre el volumen que se opone a cada carril y ninguno de ellos considera el efecto de giros a la derecha. Como referencia, cabe mencionar que el método Alemán que aparece en el HCM 85 (9) usa un valor de $K_1 = 0.5$.

Por otra parte, se debe indicar que el metodo preliminar proponia que solo se analizara el carril critico, que en hora pico usualmente es el izquierdo. Ello debido a que tiene un mayor volumen opuesto y un mayor intervalo critico (como se vera mas adelante). Aunque esta recomendacion es valida para efectos de diseño y análisis operacional, en evaluación de alternativas si se hace necesario calcular la capacidad y demoras para todos los carriles.

4- Determinación de Intervalos de Seguimiento

Uno de los parámetros importantes en los modelos de Tanner y Harders es el intervalo minimo de tiempo requerido para que un vehiculo en la corriente secundaria siga a otro vehiculo que esta ingresando a la rotonda, denominado intervalo de seguimiento de la corriente secundaria, β_2 .

Este parámetro debe medirse directamente en sitio y para efectos de análisis, sigue una distribución normal. Se recomienda programar una calculadora de bolsillo de modo que permita registrar intervalos y las mediciones se toman para pelotones que ingresan a la rotonda. Al tomar las mediciones para bloques de vehiculos, el valor medio incluye los tiempos perdidos.

Para el caso de nuevos diseños, en la Tabla 1 se recomiendan valores de β_2 en función de la geometria de la rotonda y el respectivo factor de corrección para considerar el efecto de vehiculos pesados.

Para el caso de rotondas con un solo carril de circulación, aunque no existen en Costa Rica, se midió en uno de los carriles de la rotonda San Pedro, el intervalo de seguimiento de la corriente principal, β_1 . Como se indica la Tabla 1, se recomienda un valor de 1.7 seg.

Sobre estos dos parámetros, solo el método Australiano (23) los utiliza y recomienda $\beta_1 = \beta_2 = 2$ seg. Obsérvese que para corrientes de vehiculos livianos, el método costarricense recomienda un valor de β_1 más bajo y de β_2 más alto. En la referencia (24) se amplía sobre las razones para ello.

5- Determinación del Intervalo Critico

Otro parámetro muy importante en el modelo de capacidad seleccionado es el intervalo critico, t_c , que refleja la habilidad de los conductores en la corriente secundaria (acceso de la rotonda) para aceptar los intervalos disponibles en la corriente principal.

Sobre las características de este parámetro y la forma de medirlo, existen numerosos estudios (14,15). En Costa Rica se seleccionó el método de Bissel, que recomienda una distribución log-normal y se aplica la corrección de Ashworth para disminuir el sesgo en la estimación de la media (13,16,18,19). Para medir la aceptación y rechazo de intervalos de la corriente principal se programó una calculadora de bolsillo para ese fin específico, la cual era accionada por un observador adiestrado.

Para la aplicación en este método, se recomienda la medición directa del intervalo critico para cada carril. Por aspectos geométricos y el tipo de maniobra, el carril derecho normalmente tiene un intervalo critico menor.

De no ser posible la medición en sitio o en el caso de

diseños nuevos, en la parte inferior de la Tabla 1 se recomiendan valores de t_c , para el carril izquierdo de acuerdo a la geometría de la rotonda. También se muestran los factores de corrección para considerar el efecto de los vehículos pesados y para disminuir la magnitud de t_c para el carril derecho. Estas mediciones se fundamentan en una base de datos obtenida en 14 sitios, para un total de 23 mediciones independientes.

b. Estimación de la Capacidad

Para el caso de rotondas con dos o más carriles la capacidad de cada carril, C_2 , se obtiene en vehículos mixtos con el modelo de Harders:

$$C_2 = \frac{Vop * e}{e - 1} \frac{(Vop * (\beta_2 - t_c) / 3600)}{(Vop * \beta_2 / 3600)} \quad (1)$$

con β_2 , t_c en seg, corregido por vehículos mixtos.

Vop en vehículos mixtos por hora (ver Tabla 1).

Para simplificar el cálculo se han desarrollado una serie de gráficos (24) que permiten obtener C_2 dados β_2 , Vop y t_c . En las Figuras 5 y 6 se muestran dos de estos gráficos para valores típicos de los parámetros.

En el caso de rotondas con solo un carril de circulación, la capacidad, C_2 , se obtiene en vehículos mixtos con el modelo de Tanner:

$$C_2 = \frac{Vop * (1 - Vop * \beta_1 / 3600) * e}{1 - e} \frac{-Vop * (t_c - \beta_1 / 3600)}{-Vop * \beta_2 / 3600} \quad (2)$$

con β_1 , β_2 , t_c y Vop como se definieron anteriormente.

Obsérvese que si $\beta_1 = 0$, con un poco de álgebra fácilmente se puede obtener la fórmula de Harders.

MODULO 2: METODO PARA ESTIMAR DEMORAS

Para seleccionar el método de estimación de demoras, únicamente se identificaron dos modelos: el método Sueco (20) para intersecciones controladas con ALTO o CEDA, que es del tipo M/G/1 (semiempírico) y el modelo matemático probabilístico de Tanner (27).

Chaves (17) estudió la validez de estos modelos alimentándolos con las capacidades estimadas con el modelo de Harders y comparándolos con demoras medidas en el acceso San Pedro de la Rotonda San Pedro. Se reguló los arribos de tal forma que se obtuvieron demoras para V/C entre 0.2 y 1.1. En la Figura 7 se muestran los valores medidos con su respectiva curva de regresión, en comparación con las demoras estimadas por el método Sueco (20), que es el que se comportó mejor. El ajuste se considera bueno hasta valores de V/C menores de 0.70. De ahí en adelante la dispersión es grande y el mismo Hansen (20) recomienda que el modelo se use con cuidado para valores V/C mayores que 0.80.

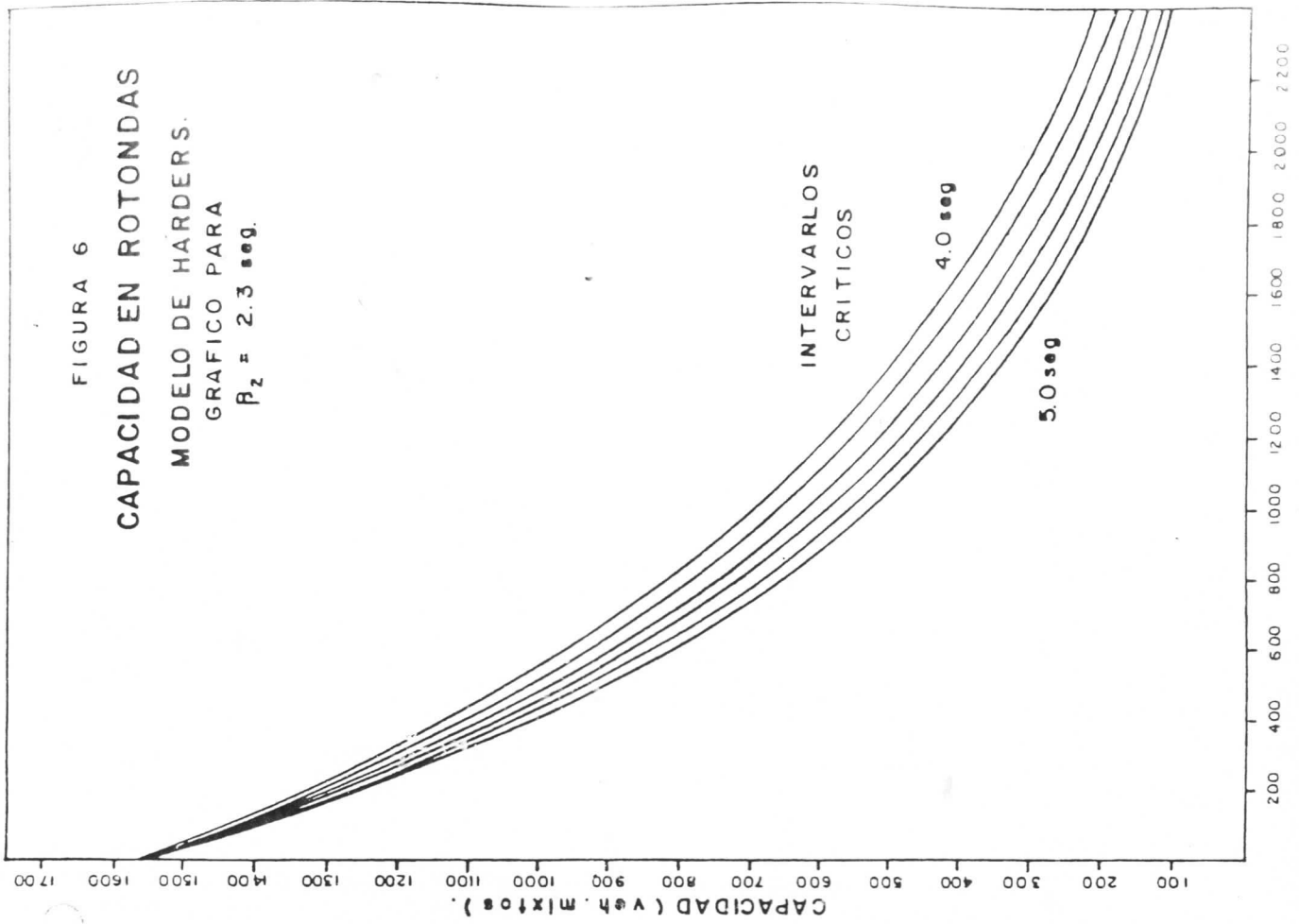
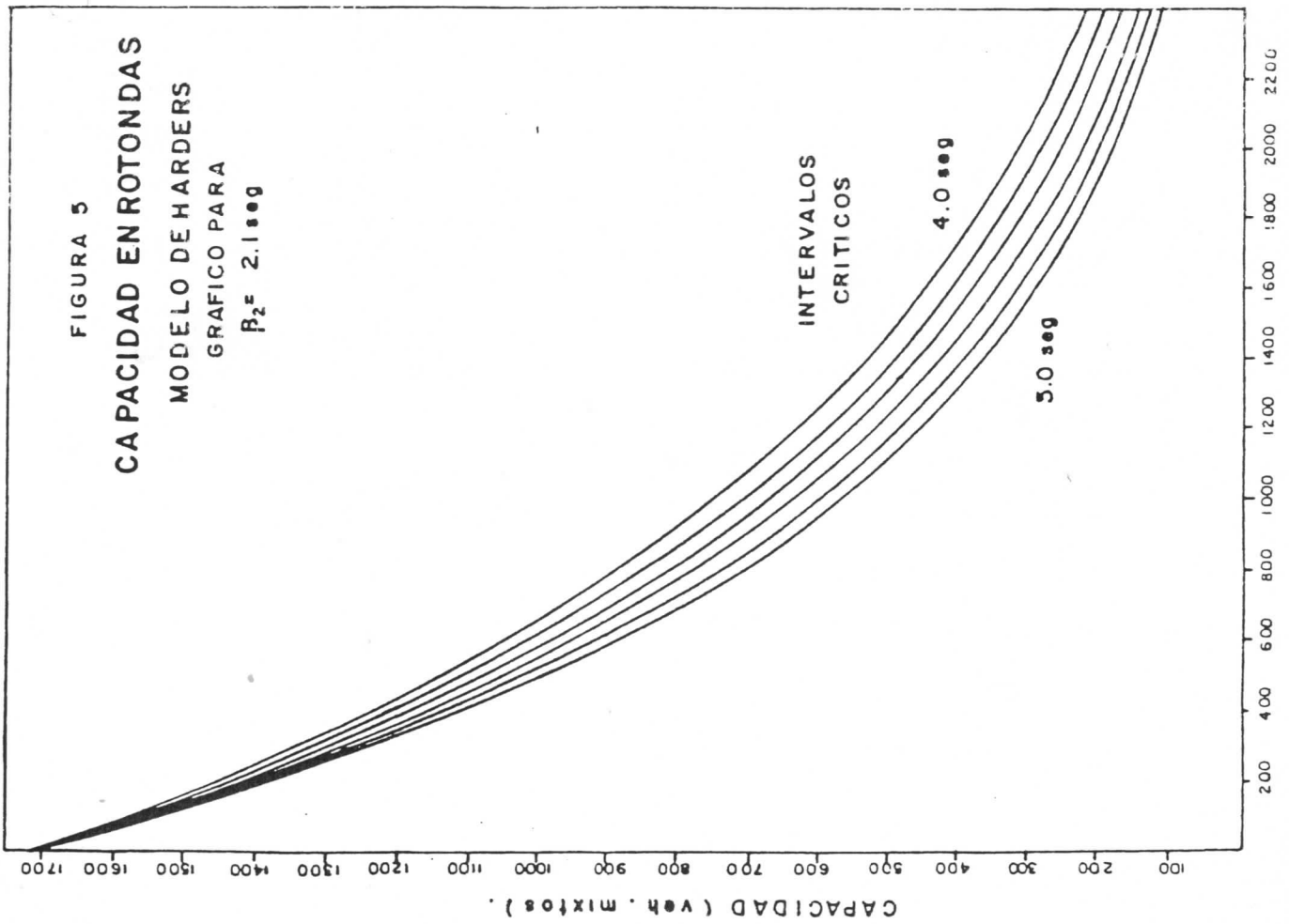
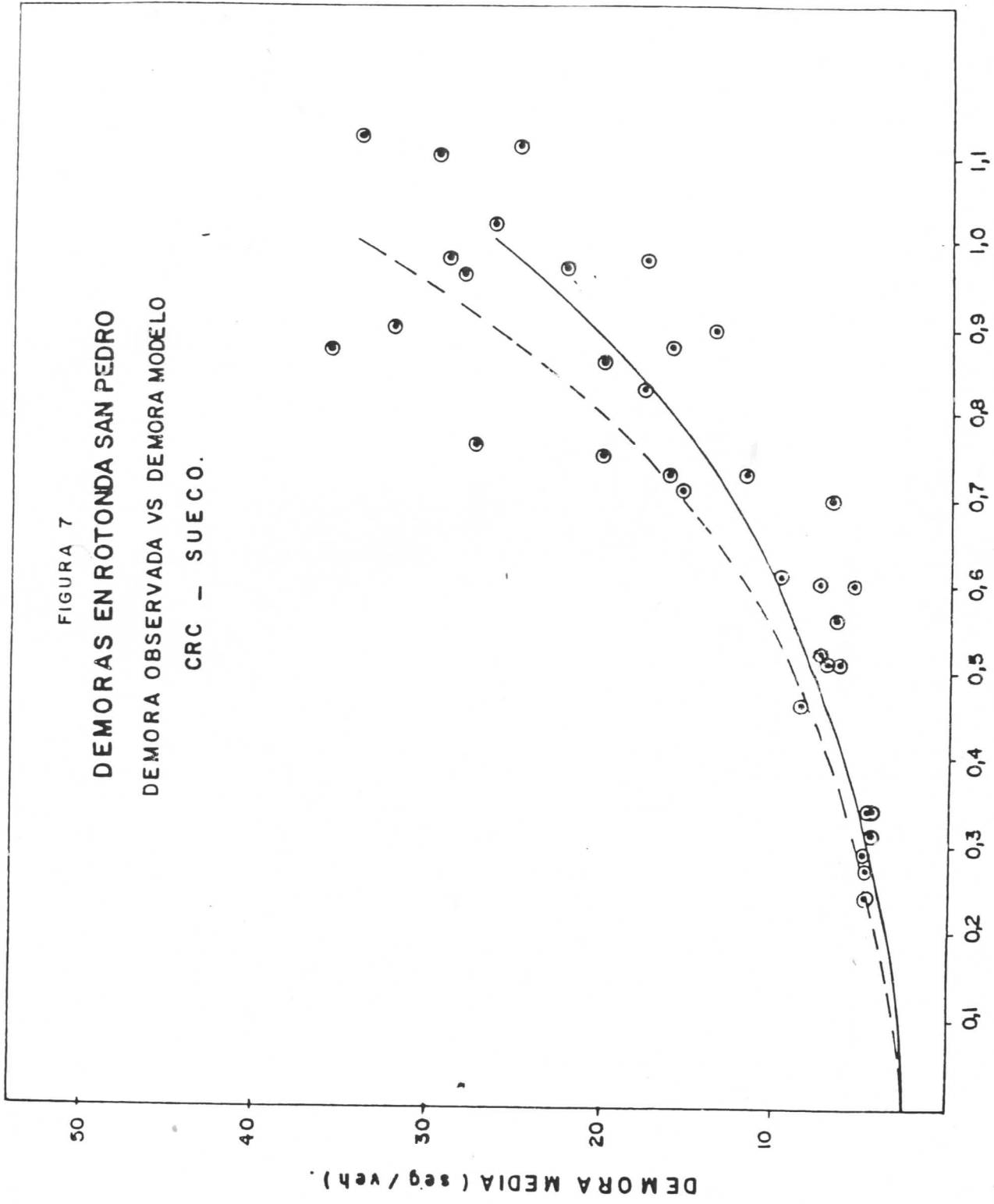


FIGURA 7
DEMORAS EN ROTONDA SAN PEDRO
DEMORA OBSERVADA VS DEMORA MODELO
CRC - SUECO.



Aunque es necesaria una mayor comprobación de campo y una calibración detallada, como la que se hizo para el modelo de capacidad, se recomienda usar el procedimiento Sueco, de forma preliminar. Se considera que para análisis comparativo de alternativas se reduce el margen de error en que se podría incurrir. Por otra parte, el error en la estimación es mayor para demoras superiores a 30 seg, que como se verá mas adelante, no afecta significativamente la determinación del nivel de servicio. Se adopta entonces el método Sueco para intersecciones sin semáforo, y el procedimiento es el siguiente:

1. Determinación de Longitud Media de Cola

Con base en los resultados del Modulo 1, se calcula la relación V/C para cada carril del acceso, y se obtiene la longitud media de cola, M_f , del gráfico de la Figura 8, para cada carril.

Para efectos de diseño, la Figura 9 permite obtener la longitud máxima de cola, $M_f \text{ max.}$ La probabilidad de que la cola máxima sea excedida, p , es seleccionada por el ingeniero con base en el grado de riesgo aceptable según su criterio.

Para convertir la longitud de colas, M_f o $M_f \text{ max.}$, de vehiculos a metros, se puede usar la siguiente aproximación:

$$M_f = M_f * [7.5 + (\% T * 7/100)]$$

con $\%T$ = porcentaje de vehiculos pesados en el acceso.

2. Determinación de probabilidad de detenerse

Al realizar la maniobra de aproximación, algunos vehiculos podrán continuar sin detenerse y otros si deben realizar una parada total. Para obtener la demora geometrica es necesario conocer la probabilidad de detenerse ante la señal de CEDA.

Esta se obtiene como:

$$p_s = 100 (1 - p_f + p_f * p_k) \quad (3)$$

con p_s = probabilidad de detenerse, en %

p_f = probabilidad de aceptar el primer intervalo o "lag", obtenida de Figura 10, con V_{op} y t_c

p_k = V/C , probabilidad de esperar en cola

3. Estimación de la Demora Media Total

La demora promedio total por carril se obtiene como:

$$d = d_v + d_k \quad (4)$$

con d = demora media total en seg /veh

$d_v = M_f * 3600 / V_2$, demora de espera, en seg/veh.

V_2 = Volumen horario del carril en estudio

d_k = demora geométrica, en veh/seg.

La demora geométrica se obtiene de la Tabla 2, en función de la velocidad de aproximación y la probabilidad de detenerse, p_s . Esta demora incluye el tiempo perdido por efectos de desaceleración y aceleración debido a la presencia de la intersección. Debido a que la demora de espera incluye parte de ese tiempo, la Figura 12 permite eliminar la doble contabilidad (con $d_k = d_k - \Delta d_k$).

El tiempo máximo de espera se puede obtener de la Figura 11.

4. Determinación del nivel de servicio

Con base en el estudio realizado por Durán (15) para mejorar

LONGITUD DE COLA PROMEDIO M_f (veh)

FIGURA 8
LONGITUD MEDIA DE COLA
METODO SUECO

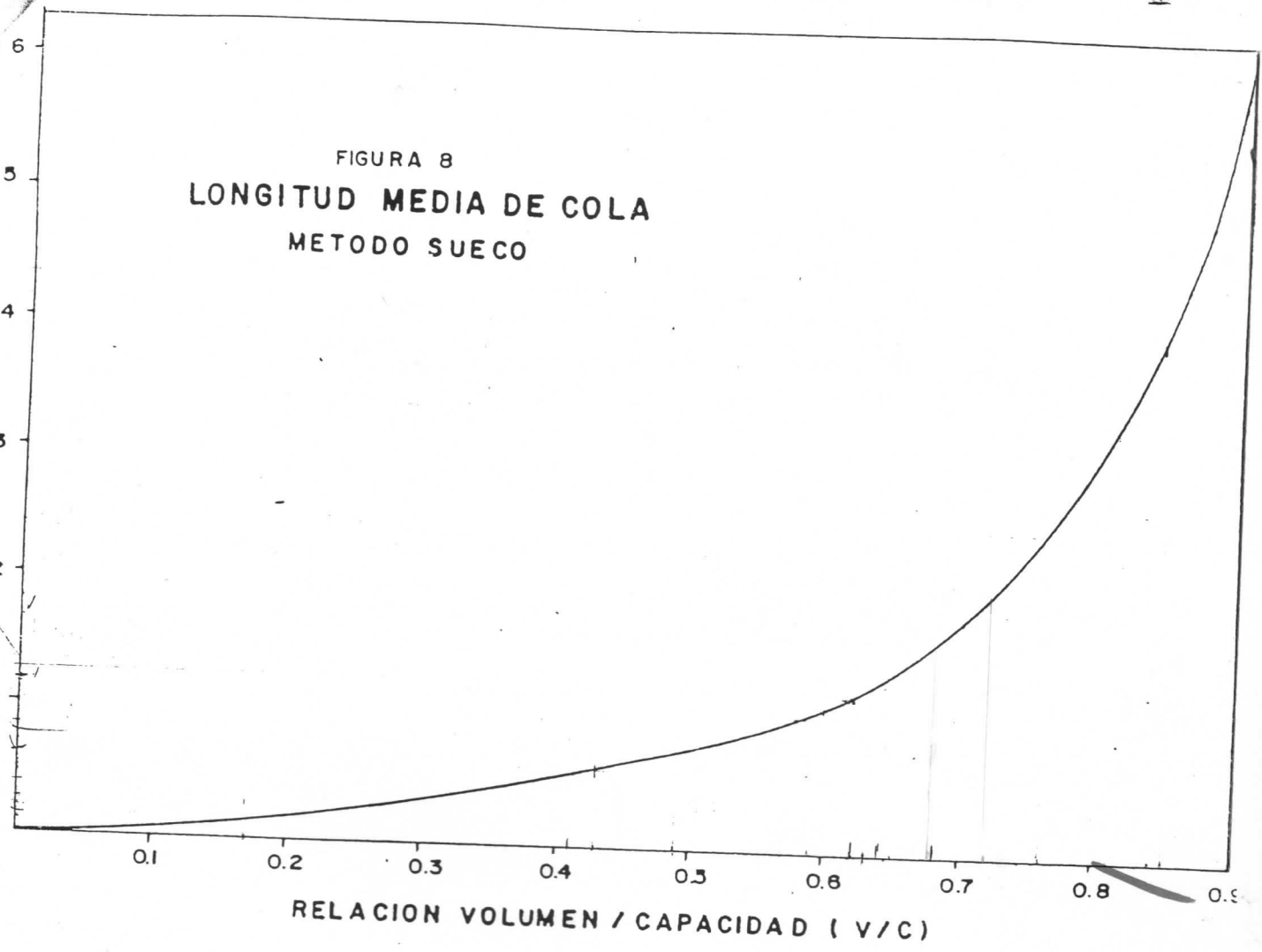


FIGURA 9
LONGITUD MAX DE COLA.
METODO SUECO

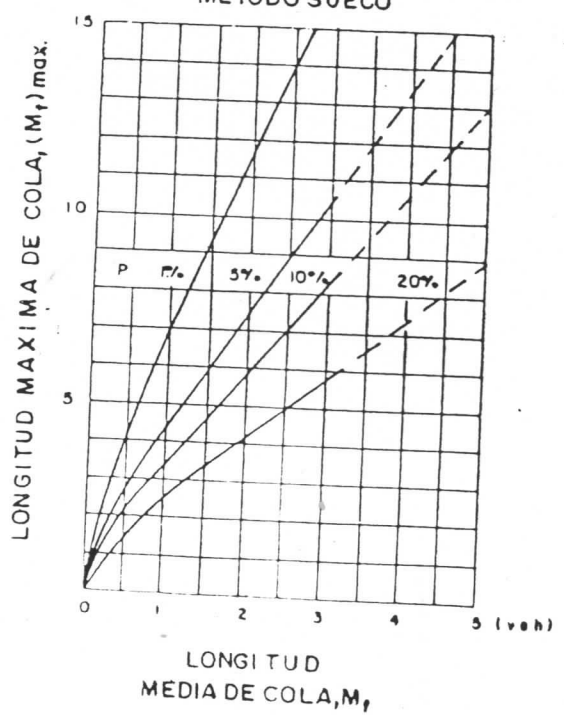
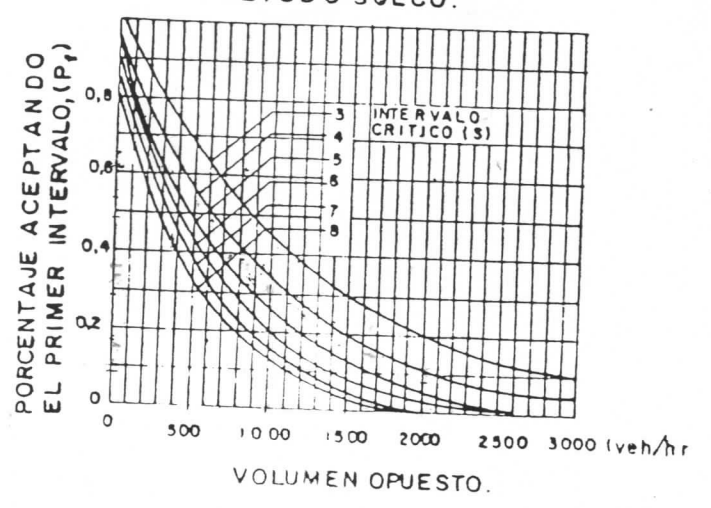


FIGURA 10
PROBABILIDAD DE DETENERSE
METODO SUECO.



LA PROBABILIDAD DE DETENERSE LA SEÑAL DE CEDA ES:

$$P_s = 100 (1 - P_f + P_f \cdot P_k) (\%)$$

TABLA 2
DEMORA GEOMETRICA.
METODO SUECO

VELOCIDAD APROX. (Km/h)	PROBABILIDAD DE DETENERSE P (%)	TIPO DE MOVIMIENTO		
		←	↑	↘
50	0	7	5	3
	20	9	7	5
	40	11	9	7
	60	13	11	10
	80	15	13	12
	100	17	15	14
70	0	12	10	8
	20	14	12	10
	40	17	14	12
	60	19	17	15
	80	22	19	17
	100	24	21	19

FIGURA 11
TIEMPO DE ESPERA MAXIMO
METODO SUECO

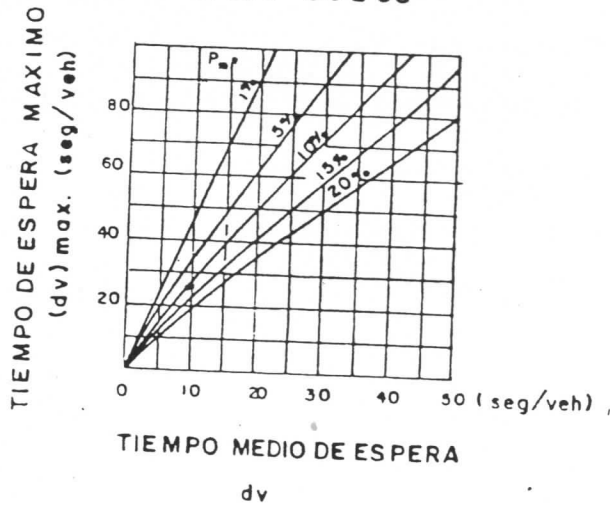
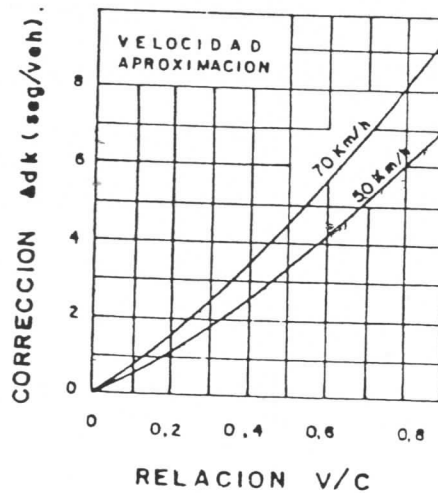


FIGURA 12
FACTOR CORRECCION
DEMORA GEOMETRICA.
METODO SUECO.



Mario Roberto Durán Ortiz
Ingeniero Civil

el método del HCM 85 (9) para intersecciones sin semáforos, y con los resultados obtenidos por Chaves (17), es posible estimar el nivel de servicio, acorde con las definiciones del HCM 85.

La siguiente tabla relaciona la demora media total con el nivel de servicio:

DEFINICION DE NIVEL DE SERVICIO			
NIVEL DE SERVICIO	DEMORA MEDIA TOTAL (SEG/VEH)	NIVEL DE SERVICIO	DEMORA MEDIA TOTAL (SEG/VEH)
A	≤ 10	D	30 a 40
B	10 a 20	E	40 a 150
C	20 a 30	F	>150

Finalmente, se aclara que el Método Sueco no estima niveles de servicio.

COMENTARIOS FINALES

Se ha presentado el método desarrollado en Costa Rica para la estimación de capacidad, longitud media de cola y demora promedio total. El módulo de capacidad tiene un mayor sustento experimental que el módulo de demoras, que requiere de mayor refinamiento.

Tras una comparación conceptual de los métodos disponibles para rotondas, con el método de Costa Rica (24), se concluye que el método del Reino Unido es el más sofisticado, pero el tipo de regresiones que usaron para calibrarlo, lo convierten en un modelo empírico que por tanto hacen difícil su calibración a otras condiciones que no sean las británicas. El método Australiano, aunque es el más similar al método de Costa Rica, es muy simplificado, lo que lo hace menos preciso. El método Sueco es del tipo semiempírico y se ubica en una posición intermedia entre el británico y el australiano. El método de la Unión Soviética parece ser el menos confiable. Finalmente se debe recordar que al modelo de capacidad costarricense se le adaptó el modelo de colas y demoras Sueco.

Se considera que el método costarricense para estimar la capacidad de las rotondas (Módulo 1) tiene la gran ventaja de que permite una fácil calibración de los parámetros que intervienen, por lo cual es relativamente sencillo el ajuste para las condiciones de otros países con reglas de conducción en rotondas, similares a las costarricenses.

El método propuesto es una herramienta útil en la planificación, diseño y análisis de operación de rotondas. En Costa Rica la principal aplicación ha sido el análisis de accesos congestionados, y en varios casos se determinaron e implementaron medidas, que permitieron descongestionarlos, así como en otros sitios se determinó que no debió construirse una rotonda.

Otra de las aplicaciones importantes es que el método propuesto, en combinación con los métodos del HCM 85 (9), permite determinar cuando es conveniente usar la opción de rotonda en comparación con otros tipos de intersección, en especial, las controladas con semáforos no actuados por la demanda. Esto se

considera de interés para muchos países latinoamericanos, que casi no usan semáforos con sensores. En este caso, debe cuantificarse la ventaja de la fluida operación que casi siempre se logra con las rotondas fuera de hora pico, en contraste con las interrupciones permanentes de un semáforo sin sensores. También puede tener ventajas si se usa en zonas suburbanas.

En términos generales, la metodología de análisis expuesta permite determinar cuando la rotonda es una opción intermedia o alterna a la intersección controlada con semáforo. Prueba de ello es que en el Reino Unido se usan con éxito, y que siguiendo el ejemplo Británico, en Australia, Suecia y otros países Nórdicos, están tomando auge (29). Aun en los Estados Unidos, ya se comienza a estudiar la posibilidad de usarlas, no solo como control de velocidad en vecindarios (30). Se recomienda al lector revisar el artículo de Todd (1), en el que analiza las verdaderas razones por las que en Estados Unidos no se recomienda el uso de rotondas.

REFERENCIAS

- (1) Todd, Kenneth; A History of Roundabouts in the United States and France; en Transportation Quarterly, Vol.42, Nº4, Octubre 1988, pp 599-623.
- (2) Laurence, C.J.D.; Roundabouts - Evolution, Revolution and the Future; en The Highway Engineer, Vol. 27, Nº 5, Mayo 1980, pp 2-10.
- (3) Wardrop, J.G.; The Traffic Capacity of Weaving Sections of Roundabouts; en Proceedings of the First International Conference on Operational Research, Oxford, 1957, pp 266 - 281.
- (4) American Association of State Highway Officials; A Policy on Geometric Design of Rural Highways; Washington, D.C., 1965.
- (5) American Association of State Highway and Transportation Officials; A policy on Design of Urban Highways and Arterial Streets, Washington, D.C. 1973.
- (6) Highway Research Board; Highway Capacity Manual; Special Report 87, Washington, D.C., 1965.
- (7) Institute of Traffic Engineers; Transportation and Traffic Engineering Handbook; Prentice Hall, New Jersey, 1982.
- (8) American Association of State Highway and Transportation Officials; A Policy on Geometric Design of Highways and Streets; Washington, D.C., 1984.
- (9) Transportation Research Board; Highway Capacity Manual; Special Report 209, Washington, D.C., 1985.
- (10) Durán Ortiz, Mario R.; Estudio del Funcionamiento de la Ronda de la Intersección San Pedro; Dirección General de Vialidad, MOPT, 1982.
- (11) Vargas Zeledón, Olan; Evaluación del Funcionamiento de las Rotondas de la Sección Periférica Sur; Informe de Proyecto Final para Graduación, Universidad de Costa Rica, San Pedro, 1983.
- (12) Flores Zúñiga, Víctor R. y Jorge E. Picado Abarca; Estudio del Funcionamiento de las Rotondas en Costa Rica; Informe de Proyecto Final para Graduación, Universidad de Costa Rica, San Pedro, 1987.

- (13) Durán Ortiz, Mario R.; Modelo de Capacidad de las Rotondas en Costa Rica; en Memoria del Segundo Congreso de Ingeniería de Transporte, Asociación de Ingeniería de Transporte, San José, 1986, pp 25 - 71.
- (14) Organisation for Economic Co-operation and Development; Capacity of At-Grade Junctions; Road Research Record, Paris, 1974.
- (15) Durán Ortiz, Mario R.; Estimation of Delay and Queue Length at Non - Signalized Intersections; Graduate Report UCB-ITS-GR-86-3, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1986.
- (16) Bolaños Ramirez, Oscar H.; Estudio de Capacidad de Rotondas en Costa Rica, Informe de Proyecto Final de Graduación, Universidad de Costa Rica, San Pedro, 1988.
- (17) Chaves Murillo, Ulman; Estudio de Demoras en Rotondas de Costa Rica; Informe de Proyecto Final de Graduación, Universidad de Costa Rica, San Pedro, 1988.
- (18) Saizamaña Flores, Marco V.; Estudio del Efecto de Vehículos Pesados en la Capacidad de las Rotondas en Costa Rica; Informe de Proyecto Final de Graduación, Universidad de Costa Rica, San Pedro, 1988.
- (19) Elizondo Vargas, Shirley; Estudio Comparativo y Refinamiento del Método para Determinar la Capacidad de las Rotondas en Costa Rica; Informe de Proyecto Final de Graduación Universidad de Costa Rica, San Pedro, 1989.
- (20) Vagverk, S.; Beräkning av Kapacitet, Kölängd, Fördrojning i Vagtrafikanläggningar, TV 131, Suecia, 1977.
- (21) Kimber, R.M.; The Traffic Capacity of Roundabouts; TRRL Laboratory Report 942, Crowthorne, 1980.
- (22) Ministerio de Carreteras; Manual de Evaluación de la Capacidad de Carreteras; U.R.S.S., 1982. (Texto en ruso)
- (23) National Association of Australian State Road Authorities; Roundabouts: a Design Guide; Guide to Traffic Engineering Practice, Part 6, New South Wales, 1988.
- (24) Durán Ortiz, Mario R.; Desarrollo del Método para Estimar la Capacidad y Niveles de Servicio en las Rotondas de Costa Rica; en Memoria del Tercer Congreso de Ingeniería del Transporte, Asociación de Ingeniería de Transporte, San José, 1990 (en proceso de publicación)
- (25) Durán Ortiz, Mario R.; ¿Cómo se debe conducir en una rotonda?; en Revista Caminos, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Nº 11, Año IV, 1989, pp 14-15.
- (26) Durán Ortiz, Mario R.; Señalamiento Vial de las Rotondas en Costa Rica; en Revista del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, San José, 1990 (en proceso de publicación).
- (27) Tanner, J.C.; A Theoretical Analysis of Delays at an Uncontrolled Intersection, en Biometrika, Nº49, 1962.
- (28) Tanner, J.C.; The Capacity of an Uncontrolled Intersection, en Biometrika, Nº54, 1967, pp. 567-568
- (29) Johannessen, Stein; Experiences with Small Roundabouts in Norway, en Proceedings of Seminar M, PTRC 12th Summer Annual Meeting, 1984, pp.1-14.
- (30) Maas, Al; Roundabouts..., en AASHTO Quaterly, Abril 1988, pp 14-16.