



**UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA**

POWERED BY **Arizona State University**

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingenierías y Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs)

Escuela de Ingeniería Civil

Trabajo final de graduación para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería
Civil

Modalidad de Proyecto de Graduación

**Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada y Cálculo de
Intervalos Críticos en la Rotonda de Guadalupe**

Autor: Pablo Alberto Rojas Ávila

Tutor: José María Ulate Zarate

San Pedro, Montes de Oca

5 de septiembre de 2023

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Análisis de Distribución de Volumen Vehicular por Carril de Entrada y Cálculo de Intervalos Críticos en la Rotonda de Guadalupe, por el (la) estudiante: Pablo Rojas Ávila, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede San Pedro, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:



José María Ulate Zárte
Tutor



Víctor Obando Angulo
Lector



Alberto González Solera
Lector

San José, 09 de junio, 2023.

Facultad de Ingeniería y Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs)
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Latina de Costa Rica
Sede San Pedro

A quien corresponda:

Yo, Cindy Tatiana Argüello Castro, cédula 2-0617-0233, como filóloga miembro del Colegio de Licenciados y Profesores (COLYPRO), carné 79131, hago constar que revisé la tesis titulada *Análisis de distribución del volumen vehicular por carril de entrada y cálculo de intervalos críticos en la rotonda de Guadalupe*, realizada por el estudiante Pablo Alberto Rojas Ávila, cédula número 208060152, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.

He revisado y corregido detalladamente este documento; por lo tanto, certifico que utiliza adecuadamente los aspectos ortográficos, léxicos y semánticos. En virtud de ello, dicho proyecto desde el punto de vista filológico, es correcto.

Cordialmente se despide:



Cindy Tatiana Argüello Castro

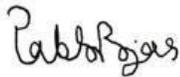
DECLARACIÓN JURADA

Yo, Pablo Alberto Rojas Ávila estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual del Proyecto de Graduación titulado:

Análisis de Distribución de Volumen Vehicular por Carril de Entrada y Cálculo de Intervalos Críticos en la Rotonda de Guadalupe

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Palmares, Alajuela, 5 de septiembre de 2023.



Pablo Alberto Rojas Ávila

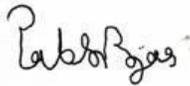
Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)
Universidad Latina de Costa Rica

Yo (Nosotros):	Pablo Alberto Rojas Ávila
De la Carrera / Programa:	Ingeniería Civil
Modalidad de TFG:	Proyecto de Graduación
Titulado:	Análisis de Distribución de Volumen Vehicular por Carril de Entrada y Cálculo de Intervalos Críticos en la Rotonda de Guadalupe

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el “AUTOR”), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la “OBRA”). **SEGUNDO:** El AUTOR autoriza y cede a favor de la UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L. con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la “UNIVERSIDAD”), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la OBRA necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la OBRA con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El AUTOR acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la UNIVERSIDAD no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El AUTOR garantiza la originalidad de la OBRA, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la OBRA, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del AUTOR y este garantiza mantener indemne a la UNIVERSIDAD ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El AUTOR se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la UNIVERSIDAD. **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el AUTOR y la UNIVERSIDAD, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El AUTOR acepta que la UNIVERSIDAD, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de

presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO:** El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD.**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD.** puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO:** El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO:** El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.** La presente autorización se extiende el día 5 de septiembre de 2023 a las 8:51 PM

Firma del estudiante(s):



Agradecimientos

Agradezco a Dios, por darme la paciencia y sabiduría para afrontar mi proceso de estudios superiores hasta el momento, además de todas las bendiciones que ha puesto en mi vida.

Agradezco a mi familia, especialmente a mis padres y a mi hermana, por apoyarme en todos los procesos que he pasado en mi formación académica. Siempre me han brindado su ayuda incondicional y por ello les estaré eternamente agradecido.

Agradezco al personal académico; tutor, lectores y miembros de la coordinación académica por su colaboración y disponibilidad en el desarrollo de este proyecto de graduación.

Mención y agradecimiento a: Luis Ángel Medrano, Sebastián Losilla y Mauricio Castro. Por su colaboración en los aforos vehiculares.

Dedicatoria

Este proyecto es dedicado a mi familia; a mis padres por apoyarme de todas las formas que han podido para lograr mis objetivos y a mi hermana por aportarme sus conocimientos y su apoyo siempre que lo he necesitado. Los amo mucho.

Quiero también dedicar este proyecto a mis abuelos, que han sido recibidos en la gloria de Dios durante mis años de estudio: a mi abuela Blanca Jenny González Cubero y a mi abuelo Enrique Rojas Madriz.

Resumen

El presente proyecto tiene como finalidad el análisis de la distribución del volumen vehicular por carril de entrada; el sitio de estudio seleccionado es la intersección tipo rotonda de Guadalupe o del Bicentenario. Los métodos de ejecución del proyecto se valdrán del aforo vehicular en carriles de entrada de la rotonda de forma experimental empírica, según los lineamientos del MOPT para dicha recolección de datos; además, se cuenta con el *Método para estimar la capacidad y demoras en las intersecciones tipo rotonda de Costa Rica* del ingeniero Mario Durán, principal fuente para la ejecución, desarrollo y análisis de datos para el proyecto.

Los intervalos críticos, junto con los volúmenes vehiculares por carril de entrada de la rotonda de Guadalupe, serán las principales variables por recopilar y analizar en el proyecto. Estas serán estrechamente relacionadas y analizadas con la geometría de la rotonda y la forma en la que se influye en ellas. Los datos de análisis en sitio serán recopilados en horarios de máxima demanda. Factores como el comportamiento de los conductores, si bien no serán contabilizados, serán determinantes en los resultados de los intervalos críticos de la rotonda.

La metodología del proyecto estará basada en el método del ingeniero Mario Durán, para obtener resultados que representen la realidad vial de la rotonda de Guadalupe mediante gráficos. Se resalta la importancia de que las recolecciones de datos en sitio se lleven a cabo de forma manual, para que así quede reflejado en el proyecto los principios de operación vial de la rotonda, además de la relación que mantienen estos con las variables de estudio.

Se pretende, una vez realizadas las recopilaciones de datos en sitio y su análisis, que la investigación represente la realidad vial en la rotonda de Guadalupe o del Bicentenario; esta es de gran importancia a nivel vial en el país debido a la presencia de la Ruta Nacional 39 Circunvalación.

Abstract

The purpose of this project is to develop an analysis of the distribution of vehicle volume per entry lane, with the selected study site being the Guadalupe roundabout or Bicentenario type intersection. The project execution methods will use the vehicular capacity in the entry lanes of the roundabout in an empirical experimental way, according to the MOPT guidelines for said on-site data collection; in addition, the method to estimate capacity and delays at roundabout-type intersections in Costa Rica by Eng. Mario Durán, main source for the execution, development and analysis of data for the project.

The critical intervals, together with the vehicular volumes per entry lane of the Guadalupe roundabout, will be the main variables to be collected and analyzed in the project. These variables will be closely related and analyzed in the project with the geometry of the roundabout and the way in which it influences them. On-site analysis data will be collected at times of peak demand for the roundabout. Factors such as the behavior of the drivers, although they will not be counted, will be decisive in the results of the critical intervals of the roundabout.

The project methodology will be broadly based on the method of Eng. Mario Durán, to obtain results at the end of the execution that represent the road reality of the Guadalupe roundabout through graphics. The importance of on-site data collection being carried out manually is highlighted, so that the principles of road operation of the roundabout are reflected in the project, in addition to the relationship that these maintain with the study variables.

It is contemplated, once the on-site data collection and analysis have been carried out, that the investigation results in a representation of the road reality present in the Guadalupe or Bicentenario roundabout, this being of great importance at road level in the country due to the presence of National Route 39 Circunvalació

Índice de Contenido

Agradecimientos	i
Dedicatoria	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice de tablas.....	viii
Índice de figuras.....	x
Introducción	1
Antecedentes	1
Planteamiento del Problema	3
Hipótesis	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
Justificación	4
Alcances y Limitaciones	5
<i>Alcances</i>	5
<i>Limitaciones</i>	6
Impacto	6
Capítulo 1	8
Fundamentación Teórica	8
Rotondas	8
Principios de Operación de Rotondas	9
Elementos de una Rotonda	9
<i>Entradas</i>	9
<i>Salidas</i>	9
<i>Islas Divisorias</i>	9
Rotondas Modernas	10
Capacidad de una Rotonda	11
Volumen Vehicular	11
<i>Tipos de Volumen Vehicular Horario</i>	12
Variación del Volumen Vehicular en Hora de Máxima Demanda	12

Demora	13
Longitud de Cola	13
Flujo o Tasa Vehicular.....	13
Vehículo de Proyecto.....	13
Nivel de Servicio en Intersecciones	13
Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones Tipo Rotonda en Costa Rica	15
Capítulo 2.....	24
Marco Metodológico	24
Paradigma, Enfoque Metodológico y Métodos de Investigación Propuestos	24
Categorías de Análisis de la Investigación	24
<i>Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones Tipo Rotonda de Costa Rica.</i>	24
<i>Herramientas</i>	25
Definición de Variables.....	27
Población.....	28
Muestra	28
Técnicas e Instrumentos para la Recolección de Datos	28
Técnicas e Instrumentos para el Procesamiento y Análisis de Datos	29
<i>Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones Tipo Rotonda de Costa Rica</i>	29
<i>Pasos por Seguir para Procesar los Datos</i>	29
Capítulo 3.....	32
Análisis de los resultados	32
Análisis de Datos	32
<i>Aforo Vehicular del miércoles 21 de Junio de 2023, 6:00AM – 8:00AM</i>	34
<i>Aforo Vehicular del miércoles 21 de Junio de 2023, 4:00PM – 6:00PM</i>	38
<i>Aforo Vehicular del jueves 22 de Junio de 2023, 6:00AM – 8:00AM</i>	42
<i>Aforo Vehicular del jueves 22 de Junio de 2023, 4:00PM – 6:00PM</i>	46
<i>Aforo Vehicular del viernes 23 de junio de 2023, 6:00AM – 8:00AM</i>	50
<i>Aforo Vehicular del viernes 23 de junio de 2023, 4:00PM – 6:00PM</i>	54
Resultados y Datos Obtenidos.....	57
Determinación de Ángulos de Entrada	58
Factores de Análisis de los Aforos Vehiculares	60

<i>Factores de Análisis, Aforo Vehicular del miércoles 21 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM</i>	61
<i>Factores de Análisis, Aforo Vehicular del miércoles 21 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM</i>	61
<i>Factores de Análisis, Aforo Vehicular del jueves 22 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM</i>	62
<i>Factores de Análisis, Aforo Vehicular del jueves 22 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM</i>	63
<i>Factores de Análisis, Aforo vehicular del viernes 23 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM</i>	64
Percepción de Datos Obtenidos	65
<i>Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del miércoles 21 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM</i>	65
<i>Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del miércoles 21 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM</i>	68
<i>Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del jueves 22 de junio de 2023, 6AM a 8AM</i>	71
<i>Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del jueves 22 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM</i>	74
<i>Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del jueves 23 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM</i>	77
<i>Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del Jueves 23 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM</i>	82
<i>Análisis de los Intervalos Críticos de la Rotonda de Guadalupe Según los Datos de los Aforos Realizados el 21, 22 y 23 de junio</i>	85
Conclusiones	88
Recomendaciones	89
Referencias Bibliográficas	90
Anexos	93
Anexo 1	93
Anexo 2	94
Anexo 3	95
Anexo 4	96
Anexo 5	97
Anexo 6	98
Anexo 7	99
Anexo 8	100
Anexo 9	101
Anexo 10	102
Glosario	103

Índice de tablas

Tabla 1	2
Tabla 2	22
Tabla 3	22
Tabla 4	25
Tabla 5	27
Tabla 6	34
Tabla 7	35
Tabla 8	36
Tabla 9	37
Tabla 10	38
Tabla 11	39
Tabla 12	40
Tabla 13	41
Tabla 14	42
Tabla 15	43
Tabla 16	44
Tabla 17	45
Tabla 18	46
Tabla 19	47
Tabla 20	48
Tabla 21	49
Tabla 22	50
Tabla 23	51
Tabla 24	52
Tabla 25	53
Tabla 26	54
Tabla 27	55
Tabla 28	56
Tabla 29	57
Tabla 30	61
Tabla 31	61
Tabla 32	61
Tabla 33	62
Tabla 34	62
Tabla 35	62
Tabla 36	63
Tabla 37	63
Tabla 38	63
Tabla 39	64
Tabla 40	64
Tabla 41	64

Tabla 42	66
Tabla 43	69
Tabla 44	71
Tabla 45	74
Tabla 46	77
Tabla 47	82
Tabla 48	85

Índice de figuras

Figura 1	3
Figura 2	8
Figura 3	10
Figura 4	11
Figura 5	16
Figura 6	19
Figura 7	21
Figura 8	26
Figura 9	30
Figura 10	32
Figura 11	58
Figura 12	59
Figura 13	60
Figura 14	67
Figura 15	68
Figura 16	70
Figura 17	71
Figura 18	73
Figura 19	73
Figura 20	76
Figura 21	76
Figura 22	78
Figura 23	80
Figura 24	81
Figura 25	84
Figura 26	84
Figura 27	86

Introducción

Antecedentes

Las rotondas son intersecciones que circulan en sentido antihorario en torno a una isla central, en donde los conductores que van a ingresar deben, por ley, dar prioridad de paso a los que se encuentran dentro, esto es conocido como corriente conflictiva. Según la Ley de Tránsito de Costa Rica, se prohíbe la realización de maniobras de cambio de carril dentro de las rotondas, cada conductor deberá ubicarse en el carril de entrada correspondiente a su carril de salida. Se ha identificado que el no cumplimiento de la normativa resulta en longitudes de cola que no disminuyen y en una afectación a los intervalos críticos y de seguimiento de las rotondas.

En cuanto a las investigaciones a nivel nacional relacionadas con el tema por desarrollar, se incluye a Durán (1990), quien se basa, en gran medida, en modelos de análisis provenientes de Suecia y Reino Unido. En su metodología encontramos que para la evaluación y diseño de las intersecciones no solo es importante el cálculo de sus capacidades, sino también de otras medidas de eficiencia, como las demoras y las longitudes de cola. El enfoque es matemático-probabilístico, empírico; además, se divide en dos módulos de cálculo, uno para la capacidad de las rotondas y otro para las longitudes y demoras.

Por su parte, Depiante y Galarraga (2015) presentan un proyecto de análisis de diversas metodologías de evaluación aplicado en cuatro rotondas de Argentina; se toma el modelo de HCM2010 y se adecua a condiciones locales para obtener los intervalos críticos y de seguimiento. Los parámetros que definen la eficiencia de una rotonda están directamente relacionados con su capacidad, como lo son el intervalo crítico — mínimo intervalo del flujo conflictivo que necesita un vehículo para entrar a la rotonda— y el intervalo de seguimiento — tiempo entre vehículos en cola de la rama de aproximación que ingresan en la rotonda en un mismo intervalo crítico de la corriente conflictiva o circulante—.

Tabla 1

Intervalos críticos y de seguimiento propuestos por el HCM2010

Configuración		t_c	t_f
Entrada de un carril	Un carril de circulación	5,19	3,19
	Dos carriles de circulación	4,11	3,19
Entrada de dos carriles con dos carriles de circulación	Carril Izquierdo	4,29	3,19
	Carril Derecho	4,11	3,19

Nota. Calibración del modelo de capacidad de rotondas del HCM2010 a condiciones locales. Córdoba, 2013.

En relación con las investigaciones presentadas, Dávila (2019) se basó, en gran medida, en la metodología del ingeniero Mario Durán y en recomendaciones del MOPT para analizar la distribución del volumen vehicular y de cálculo de intervalos en la rotonda de Paso Ancho, San José. En el proyecto se compararon los resultados obtenidos con las evaluaciones realizadas en la rotonda, mediante la misma metodología empleada en el año 1990. Se concluyó que los datos no habían variado en gran medida y que dicha metodología es aún vigente para el análisis de rotondas en Costa Rica.

Por último, Acosta y Pardo (2016) desarrollaron un proyecto con un enfoque analítico-investigativo, en donde se evaluaron las capacidades, niveles de servicio y geometrías de diversas rotondas en Bogotá, Colombia. Se empleó la metodología HCM2010, para posteriormente, y mediante la observación en horarios de alto volumen vehicular, determinar la cantidad de maniobras de trenzado o cambio de carril que se realizaron dentro del anillo central de las rotondas en un intervalo de tiempo. El objetivo de este modelo de análisis es contrastar los datos obtenidos, para identificar la afectación que conllevan las maniobras en los parámetros obtenidos.

Planteamiento del Problema

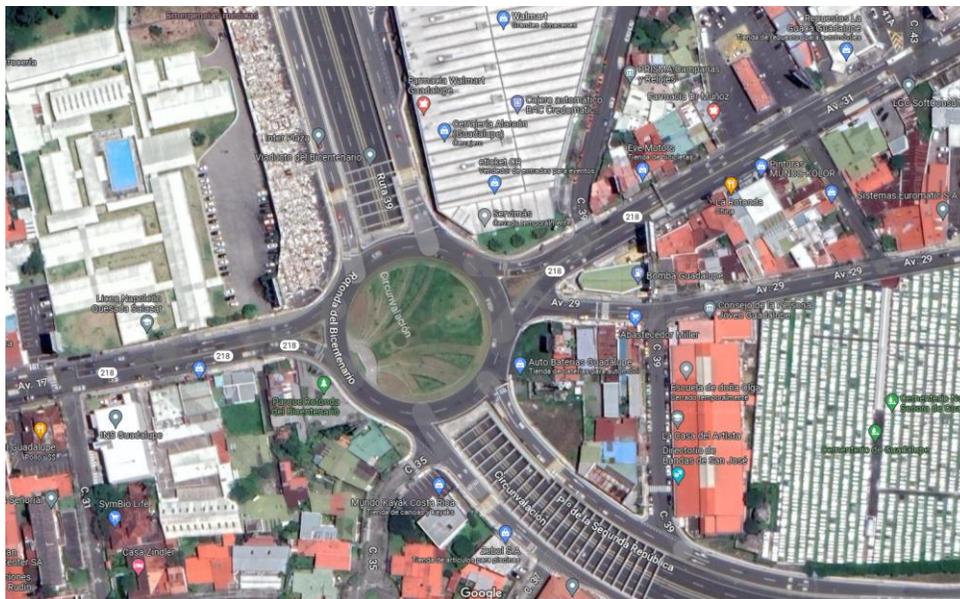
¿Qué factores intervienen en el análisis de la distribución del volumen vehicular por carril de entrada para la obtención de intervalos críticos y de seguimiento? ¿Cómo calcular estos factores y su relación con los intervalos críticos?

Se investigará la intersección de tipo rotonda de Guadalupe (rotonda del Bicentenario), ubicada en el distrito de Guadalupe, cantón de Goicoechea, provincia de San José. La rotonda de estudio está sobre la carretera Circunvalación Ruta Nacional 39, y se cruza con la Ruta Nacional Secundaria 218. El Ministerio de Obras Públicas y Transportes recomienda realizar los análisis de intersecciones durante las horas pico, para así apreciar la reducción de los intervalos de seguimiento, es decir, de 6:30 AM a 8:30 AM y de las 4:30 PM a las 6:30 PM. En el caso del presente proyecto, dada su naturaleza y por sugerencia del ingeniero José María Ulate Zarate, se aconseja realizar el análisis fuera de las franjas de hora pico y a su vez dentro de estas.

Se adjunta una imagen que indica la ubicación de la rotonda de Guadalupe o rotonda del Bicentenario.

Figura 1

Imagen satelital de 120a Rotonda del Bicentenario



Nota. Tomado de Google Maps. 2023.

Hipótesis

La presente investigación busca determinar si los factores y elementos viales de la rotonda de Guadalupe influye en las demoras, longitudes de cola e intervalos críticos y de seguimiento. Se toma en consideración la geometría de la rotonda y las maniobras que los conductores deben llevar a cabo, donde esto puede afectar a los intervalos críticos.

Objetivo General

Determinar los factores representativos en la distribución del volumen vehicular por carril de entrada presentes en la rotonda de Guadalupe o del Bicentenario para la obtención de intervalos críticos.

Objetivos Específicos

1. Realizar conteos vehiculares según el tipo de vehículos que circulan la rotonda de Guadalupe mediante visitas de campo.
2. Estimar el tiempo de entrada de los vehículos que ingresan a la rotonda de Guadalupe según el tipo al que corresponden.
3. Calcular los intervalos críticos de la rotonda de Guadalupe a través de los datos recopilados en los conteos vehiculares.
4. Analizar el efecto de la geometría en los intervalos críticos de la rotonda de Guadalupe.
5. Expresar la distribución del volumen vehicular por carril de entrada en la rotonda de Guadalupe mediante la elaboración de gráficos en función de la situación vial actual.

Justificación

De acuerdo con Depiante y Galarraga (2015), “todas las intersecciones serán áreas donde aparecerán puntos de conflicto tanto para vehículos como para peatones”. Las rotondas son una alternativa de intersección eficaz para conectar caminos que realizan un cambio en su dirección; si se trata de una ruta de un elevado volumen vehicular, es relevante cerciorarse de que el tránsito funcione correctamente y así asegurar el flujo vehicular ininterrumpido de los caminos que convergen en estas. Las rotondas han sido implementadas en gran medida en zonas urbanas de Costa Rica, donde se busca un tránsito continuo para mejorar las

actividades socioeconómicas desarrolladas en las zonas. Por ende, su estudio es importante para poder identificar puntos de mejora que agilicen el transporte.

Es posible identificar factores propios de cada rotonda, como lo son su capacidad y el volumen vehicular. Mediante el estudio de los factores se obtienen valores de demora y de intervalos críticos a los que se verán sometidos los conductores que ingresan a la intersección; sin embargo, el comportamiento y las maniobras imprudentes realizadas por conductores que circulan el anillo central de la rotonda, generalmente debido al desconocimiento, va a incidir de forma directa en dichos datos. Por consiguiente, se destaca la relevancia de llevar a cabo un estudio de tales fenómenos y su afectación en el panorama de las rotondas, de forma que, en futuros proyectos referentes a la rotonda de estudio, se aborden los planes de movilidad o se dé a conocer las normas de uso eficaz a los conductores.

El presente proyecto pretende realizar un análisis de la distribución vehicular en la rotonda de Guadalupe, como tal, se toman datos representativos actuales para el cálculo de factores presentes en dicha intersección, esto con el objetivo de exponerlos por medio de gráficos. Los datos y representaciones de la realidad vial de la rotonda que se esperan obtener en el presente proyecto serán de gran ayuda para futuras investigaciones realizadas en esta, ya sea con el objetivo de mitigar las problemáticas identificadas, o para la evaluación de otros elementos presentes.

Alcances y Limitaciones

Alcances

- El presente proyecto abarcará de forma delimitada las condiciones y elementos viales en la intersección tipo rotonda de Guadalupe (rotonda del Bicentenario).
- Se tomará como referencia para el análisis de la distribución vehicular las metodologías expuestas en manuales de ingeniería vial, como el *Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones tipo Rotonda de Costa Rica* del ingeniero Mario Durán.
- Para efectuar conteos vehiculares en el sitio de estudio se llevará a cabo una labor de toma de datos de campo, se consideran todas las precauciones pertinentes.
- Se realizarán las labores de conteo en momentos críticos del volumen vehicular para identificar su distribución e intervalos críticos de manera representativa.

- Se representará mediante gráficos la distribución del volumen vehicular por carril de entrada y cálculo de intervalos críticos en la rotonda de Guadalupe
- Se identificarán los comportamientos y maniobras realizadas por conductores que circulan el anillo central de la rotonda de Guadalupe y la afectación que esto conlleva en los intervalos críticos y en las demoras.

Limitaciones

- El proyecto se limita al análisis de los factores viales presentes en la zona comprendida por la rotonda de Guadalupe desde sus carriles de entrada.
- De las metodologías para el análisis o evaluación de intersecciones tipo rotonda consultadas, no se formularán nuevas ecuaciones o procedimientos ni se modificarán los existentes.
- El proyecto no pretende dar soluciones al problema expuesto o proponer cambios de ningún tipo a la rotonda de Guadalupe, se limitará meramente a exponer la situación vial de la rotonda.
- Los conteos vehiculares se clasificarán en tipos de vehículos, de los cuales se excluyen del estudio las motocicletas.
- La identificación de maniobras imprudentes en la rotonda de Guadalupe se limita a aquellas realizadas dentro del anillo central de circulación.

Impacto

El presente proyecto responde a la necesidad de contar con datos representativos de la distribución de volúmenes vehiculares por carril de entrada y de intervalos críticos en la rotonda de Guadalupe. Los objetivos del proyecto pretenden una representación de realidad vial en la rotonda de estudio, para ello, se muestran los valores de demora, longitudes de cola e intervalos críticos y de seguimiento a los que los conductores se enfrentan cuando ingresan a la rotonda.

La problemática que se busca solventar con las metodologías aplicadas en el proyecto es de naturaleza meramente investigativa. La meta es colaborar con quien realice en el futuro investigaciones relacionadas tanto con el tema como con el sitio de estudio, ello con datos cuantitativos fiables en cuanto a las distribuciones vehiculares de la rotonda.

El análisis y evaluación de intersecciones de tipo rotonda es un tema que cuenta con pocas investigaciones a nivel nacional, a su vez las metodologías a las cuales acudir para abordar estos estudios son limitadas. El presente proyecto busca ampliar la información recopilada al respecto y con ello extender la metodología de análisis de rotondas en el país.

Se resalta que, si bien no es su propósito principal, el proyecto pretende realizar observaciones y análisis de la afectación que conlleva la incorrecta circulación de los conductores que ingresan al anillo interno de una rotonda y realizan maniobras de cambio de carril. Este es un tema que puede ser ampliamente desarrollado en futuras investigaciones como enfoque principal, incluso, la formulación de mecanismos para solventar el problema.

Capítulo 1

Fundamentación Teórica

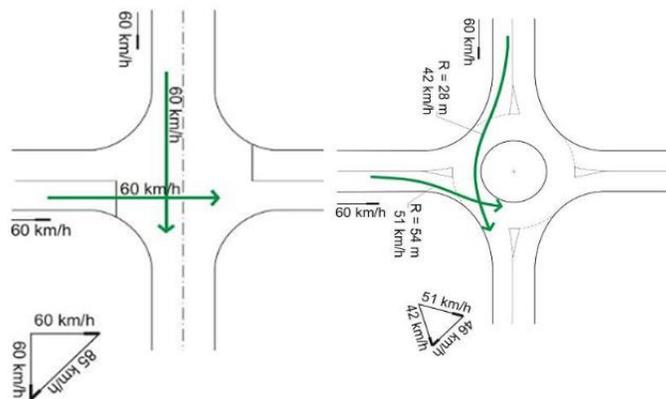
Rotondas

Las rotondas se definen como intersecciones compuestas por un anillo de circulación interno y una estructura circular en medio, estas son reguladas por sistemas de control de tránsito específicos. En su diseño se toman en consideración pasos canalizados para el tránsito entrante regulados por señales como Ceda el Paso al tránsito interno y características geométricas, en donde se resaltan anchos de calzada determinados. El objetivo de aplicar una intersección tipo rotonda es controlar la velocidad de entrada de vehículos y facilitar el intercambio y distribución de flujos de tránsito; de tal forma, se reduce la gravedad de choques y conflictos viales (Savastano, 2010).

En la siguiente imagen encontramos una intersección en ángulo de 90°, donde la velocidad de los carriles entrantes es de 60 km/h. Se comparan los diagramas de velocidad relativa potencial y se observa que en la alternativa que presenta una rotonda en la intersección la velocidad es de 46 km/h, valor menor a 85 km/h en el caso que no aplica una rotonda (Savastano, 2010).

Figura 2

Comparación de intersecciones



Nota. Tomado de Tecnicatura Superior en Obras Civiles, 2010.

Principios de Operación de Rotondas

La capacidad máxima en ramas de aproximación de una rotonda está determinada por dos factores: el volumen circulante o conflictivo con el volumen de entrada y las características geométricas de la rotonda. Los volúmenes conflictivos bajos resultan en amplios intervalos de entrada para los conductores que van a ingresar a la rotonda, así como un aumento de los volúmenes conflictivos reduce las posibilidades de entrada. Un mismo intervalo puede ser aprovechado por más de un vehículo (Flores, 2013). Con esto en mente, el funcionamiento de una rotonda consiste en:

- Los conductores entrantes ceden el paso a los vehículos en el flujo conflictivo y aprovechan los intervalos para ingresar a la rotonda.
- El desempeño de la rotonda será afectado por elementos geométricos (número de carriles, anchos de vía, ángulos de entrada, etc.).

Elementos de una Rotonda

Entradas

Corresponden a las aproximaciones al anillo central por parte de los ramales, son zonas de vital importancia para el desempeño geométrico de la rotonda, pues en ellas se da una disminución de la velocidad, que a su vez controla la capacidad. Se pueden encontrar uno o más carriles, donde un aumento en la cantidad de carriles conlleva un aumento en la capacidad, sin embargo, se ha de tomar en cuenta la seguridad de circulación al aplicar estas variaciones (Ortega, 2017).

Salidas

Las salidas comprenden la evacuación de vehículos que transitan el anillo central, la geometría de estas no influirá en la capacidad, pero han de ser efectivas y generar una salida rápida y, además, mantener la seguridad. Se considera que las rotondas eficientes son aquellas que facilitan las salidas y dificultan las entradas (Ortega, 2017).

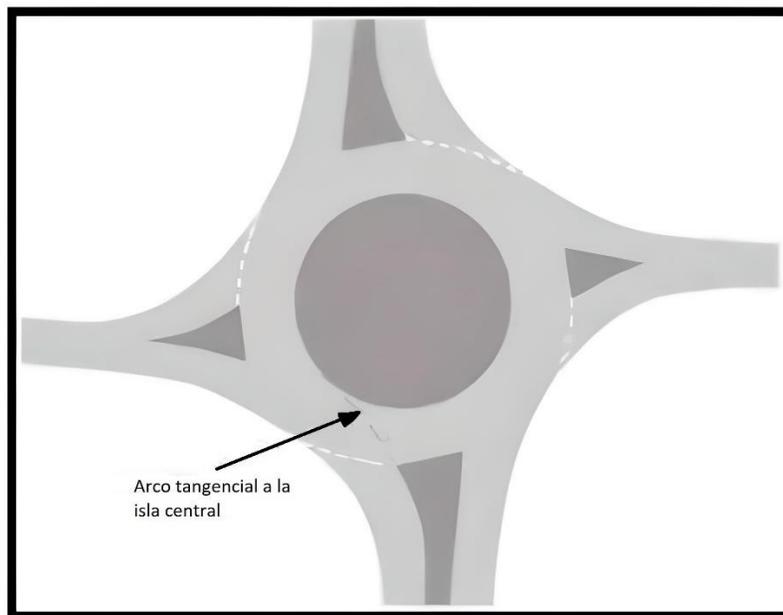
Islas Divisorias

El uso de islas divisorias es altamente recomendado en normativas de diseño de rotondas, estas tienen el objetivo de guiar a los conductores para que ingresen al anillo de circulación en el sentido correcto, además de favorecer la disminución de velocidad de los ramales de entrada y ser zonas de usos varios, como la ubicación de señalización o el refugio

peatonal. A su vez, se sugiere que las islas divisorias acaben en un arco que se proyecte tangencialmente al anillo central, como se muestra en la Figura 3 (Torres, 2015).

Figura 3

Proyección del arco de la isla divisoria



Nota. Tomado de International Comparison of roundabout design guidelines, 2007.

Rotondas Modernas

Se habla del concepto de rotondas modernas como una constitución de varias “intersecciones en T”. Estas son una alternativa segura y eficiente en la distribución del flujo vehicular pues reducen las velocidades de tránsito en cuanto incluyen impedimentos de señalización, como Ceda el Paso, y geométricos, como la deflexión en la trayectoria de entrada (Oscar, 2010).

Se identifican varias características propias de rotondas modernas, como tal, se destacan los cruces peatonales, donde estos han de ser accesibles por peatones con capacidades disminuidas y contar con un descanso en las isletas partidoras. En la figura 4 se presentan ejemplos de las características físicas de rotondas modernas.

Figura 4

Características de rotondas modernas



Nota. Tomado de Tecnicatura Superior en Obras Viales, 2010.

Capacidad de una Rotonda

Dávila (2019) estipula que “El enfoque de capacidad de una rotonda es directamente afectado por los patrones de flujo que se componen de flujo de entrada, flujo de circulación y flujo de salida”. Una modificación geométrica que aumente la cantidad de carriles de entrada de una rotonda se reflejará en un aumento de su capacidad; se reitera el no comprometer la seguridad en la rotonda y sus maniobras cuando se realicen estos cambios.

Volumen Vehicular

El concepto de volumen vehicular es definido por Cal (2018) como “el número total de vehículos que pasan durante un lapso de tiempo determinado” (p. 183). El volumen vehicular es un parámetro básico para el conteo vehicular, este a su vez se ve afectado por variables externas diversas, como horarios de mayor o menor demanda; esto se debe de tomar en cuenta cuando se pretenda llevar a cabo dichos análisis.

Tipos de Volumen Vehicular Horario

La variación en el volumen vehicular, debido al horario seleccionado para realizar conteos vehiculares, llevó a Cal (2018) a plantear los siguientes tipos de volúmenes absolutos o totales:

- Volumen horario máximo anual (VHMA): hora de mayor volumen vehicular registrada en un año en un tramo o carril.
- Volumen horario de máxima demanda (VHMD): máximo volumen vehicular en un tramo o sección registrado durante 60 minutos consecutivos. Es el valor de mayor representación en la demanda de un día en particular.
- Volumen horario de proyecto o diseño (VHP): volumen vehicular que se utiliza para diseñar las características geométricas de la vía. Se proyecta un volumen que presente un máximo de veces al año, un valor muy elevado se reflejará en características geométricas de un elevado costo.

Variación del Volumen Vehicular en Hora de Máxima Demanda

Se identifica que las variaciones que experimenta el volumen vehicular de una sección o tramo durante la hora de máxima demanda obedecen a un patrón y pueden repetirse a lo largo de varios días o semanas; sin embargo, estas serán muy distintas entre un tramo u otro, a pesar de darse durante los mismos periodos y horas. En todo caso, es importante cuantificar las variaciones dadas durante horas de máxima demanda y la duración de sus flujos máximos, para así tomar medidas de control de tránsito acordes (Cal, 2018).

Al no poderse asumir que la distribución vehicular durante la hora de máxima demanda será uniforme, esta es analizada en periodos cortos donde la demanda puede ser mayor. Para esto se establece el parámetro de *factor de la hora de máxima demanda* FHMD, que relaciona el *volumen horario de máxima demanda* y el *volumen máximo* durante un periodo corto de la hora de máxima demanda, expresado como:

$$FHMD = \frac{VHMD}{N(Q_{t\ max})} \quad (1)$$

Donde:

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

t = Duración de los periodos (en minutos).

Los periodos más comunes son de 5, 10 y 15 minutos; en donde este último es el más utilizado en los análisis.

Demora

Se conoce como el tiempo que empieza desde que un vehículo llega a la cola de una fila entrante en una intersección hasta que llega al principio, lo cual se determina mediante mediciones de tiempo que pueden ser afectadas por las condiciones presentes en una intersección (Durán, 1990).

Longitud de Cola

Parámetro que mide la fila de vehículos en un carril de entrada que van a ingresar a la intersección, es medido en intervalos de tiempo que establecen en qué momento se presentó la fila más larga (Durán, 1990).

Flujo o Tasa Vehicular

Frecuencia con la que vehículos circulan una sección o tramo de vía en intervalos de tiempo específicos menores a una hora, comúnmente de 15 minutos. Es un concepto similar a volumen vehicular, sin contar con su característica de expresión en periodos anuales, mensuales y subhorarios (HCM2010).

Vehículo de Proyecto

El vehículo de proyecto es un modelo de vehículo hipotético, definido por su peso, dimensiones y funciones operacionales. Por un lado, “los vehículos *ligeros* son vehículos de pasajeros y/o carga, que tienen dos ejes y cuatro ruedas. Se incluyen en esta denominación los automóviles, camperos, camionetas y las unidades ligeras de pasajeros y carga” (Cal, 2018). Por otro lado, “los vehículos *pesados* son unidades destinadas al transporte masivo de pasajeros o carga, de dos o más ejes y de seis o más ruedas. En esta denominación se incluyen los autobuses y los camiones” (Cal, 2018).

Nivel de Servicio en Intersecciones

El nivel de servicio en intersecciones se verá afectado tanto por las características geométricas presentes, como por la señalización. Esto debido a que ambos aspectos afectarán a las demoras, factor determinante. Mediante el nivel de servicio, se puede interpretar el gasto

de combustible al transitar la intersección, además de la conformidad de tránsito de los conductores (Cal, 2018).

- Nivel de servicio A:

Circulación a flujo libre. Los conductores no experimentan la presencia de otros vehículos al transitar, lo que facilita maniobrar o cambiar velocidades. La conformidad de los conductores es excelente.

- Nivel de servicio B:

Se mantiene el flujo libre en presencia de otros vehículos y la libertad de cambio de velocidades, pero se disminuye la de maniobras. El nivel de conformidad de conductores es decente.

- Nivel de servicio C:

Se cataloga como flujo estable, pero la interacción de conductores empieza a afectar. La selección de velocidad y maniobras se ve restringida. La conformidad de los conductores desciende.

- Nivel de servicio D:

Circulación de alta densidad, pero estable. El cambio de velocidades y maniobras se restringe severamente. La conformidad del conductor es baja.

- Nivel de servicio E:

Circulación cerca del límite de capacidad. Velocidad reducida a valores uniformes y libertad de maniobra imposibilitada, los vehículos ceden el paso de forma forzada. Niveles de conformidad muy bajos, se lleva incluso a expresar frustración.

- Nivel de servicio F:

Flujo de circulación forzado, se excede la capacidad de la intersección. Se opera mediante paradas y arranques, característicos de cuellos de botella.

Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones Tipo Rotonda en Costa Rica

Este se basa en métodos de diseño y análisis de rotondas desarrolladas en Suecia y Reino Unido, entre otros países. Las metodologías desarrolladas anteriormente solo tomaban en cuenta la capacidad como parámetro, sin embargo, es incorrecto, pues considerar, además, demoras y longitudes de cola aporta al análisis de realidad vial. Asimismo, muchas de estas son llevadas a cabo mediante modelos de simulación digitales. Durán (1990) afirma que: “ese enfoque no se considera apropiado, porque primero era necesario comprender mejor el esquema real de operación de las rotondas, fundamentados en verificación experimental”.

El nivel de servicio de una intersección en presencia de un flujo discontinuo no representa correctamente la relación volumen/capacidad. Por ello el método del ingeniero Mario Durán fue dividido en dos módulos, el primero permite estimar la capacidad de las entradas a una rotonda, y el segundo determina la demora y longitud de cola en función de la congestión en la intersección.

A continuación, se desarrolla el procedimiento del método de análisis de intersecciones. Se rescata la interpretación realizada por Dávila (2019) en relación con la metodología y los pasos por seguir para aplicarlo en rotondas de Costa Rica actualmente.

1. Aforos vehiculares en sitio; se enfoca en un ramal de entrada en periodos de una hora para calcular el factor de hora pico según la fórmula (2), posteriormente se divide al volumen horario, fórmula (3).

$$FHP\ 15 = \frac{\text{Volumen total en una hora}}{4 * \text{volumen máximo en 15 min}} \quad (2)$$

Con:

$FHP = \text{Factor de hora pico}$

$$\text{Tasa de flujo horario} = \frac{\text{Volumen horario}}{FHP\ 15} \quad (3)$$

El porcentaje de distribución por carril será determinado según se muestra en la figura 5. Se resalta que esta cambia si se trata de una rotonda con accesos de dos o tres carriles.

Figura 5

Distribución del volumen secundario por carril

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

Nota. Tomado de *Método para estimar la capacidad y demoras en las intersecciones tipo rotonda en Costa Rica, 1990.*

En casos de hora pico, para rotondas con accesos de dos carriles, se considera un 55% del volumen en el carril izquierdo y un 45% en el derecho. Por su parte, en casos fuera de la hora pico se toma un 45% del volumen para el carril izquierdo y un 55% para el derecho.

2. Cálculo de volúmenes opuestos para cada carril de acceso.

$$V_{op} - q_2 = q_{CT} + q_{BI} \tag{4}$$

$$V_{op} - q_1 = K_1 * q_{D1} + q_{CI} + q_{CT} + V_{op} - q_2 \tag{5}$$

$$K = 0 \text{ si } X > 5m$$

$$K = 0.1 \text{ si } X < 5m$$

Con:

V_{op} = Volumen opuesto para cada carril de acceso.

K = Constante de corrección por geometría.

$q_1 =$ Volumen vehicular de carril izquierdo de entrada.

$q_2 =$ Volumen vehicular de carril derecho de entrada.

$q_{CT} =$ Volumen vehicular de carril ante dirección opuesta.

$q_{BI} =$ Volumen vehicular de carril hacia tercera salida.

$q_{CI} =$ Volumen vehicular perpendicular a q_{BI}

3. Estimar intervalos de seguimiento de la corriente principal y tomar en cuenta vehículos pesados.

$\beta_2 = 2.1 \text{ s}$ Radio rotonda $< 15 \text{ m}$

$\beta_2 = 2.3 \text{ s}$ Radio rotonda $> 15 \text{ m}$, entrada normal $\varphi \leq 60^\circ$

$\beta_2 = 2.5 \text{ s}$ Radio rotonda $> 15 \text{ m}$, entrada forzada $\varphi > 60^\circ$

Factor de corrección:

+ 0.1 s cada 10% de pesados

Donde:

$\beta_2 =$ Intervalo de seguimiento.

$\varphi =$ Ángulo de giro desde carril de entrada.

4. Determinar intervalos críticos desde carril de entrada hasta anillo central.

$t_c = 4.0 \text{ s}$ Radio rotonda $> 15 \text{ m}$, entrada tangencial, $\varphi < 40^\circ$

$t_c = 4.2 \text{ s}$ Radio rotonda $> 15 \text{ m}$, entrada normal, $40^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$

$t_c = 4.5 \text{ s}$ Radio rotonda $> 15 \text{ m}$, entrada forzada, $\varphi > 60^\circ$

$t_c = 4.0 \text{ s}$ Radio rotonda $< 15 \text{ m}$

Factor de corrección:

+ 0.3 s cada 10% de pesados

– 0.2 s para carril derecho

5. Estimar la capacidad del volumen vehicular en rotonda, aplicado a rotondas de dos carriles en los accesos.

$$C_2 = \frac{V_{op} * e \left(\frac{V_{op} * (\beta_2 - t_c)}{3600} \right)}{e \left(\frac{V_{op} * \beta_2}{3600} \right)} \quad (6)$$

Con:

C_2 = Capacidad en intersección de dos carriles.

V_{op} = Volumen opuesto (vehículos mixtos por hora).

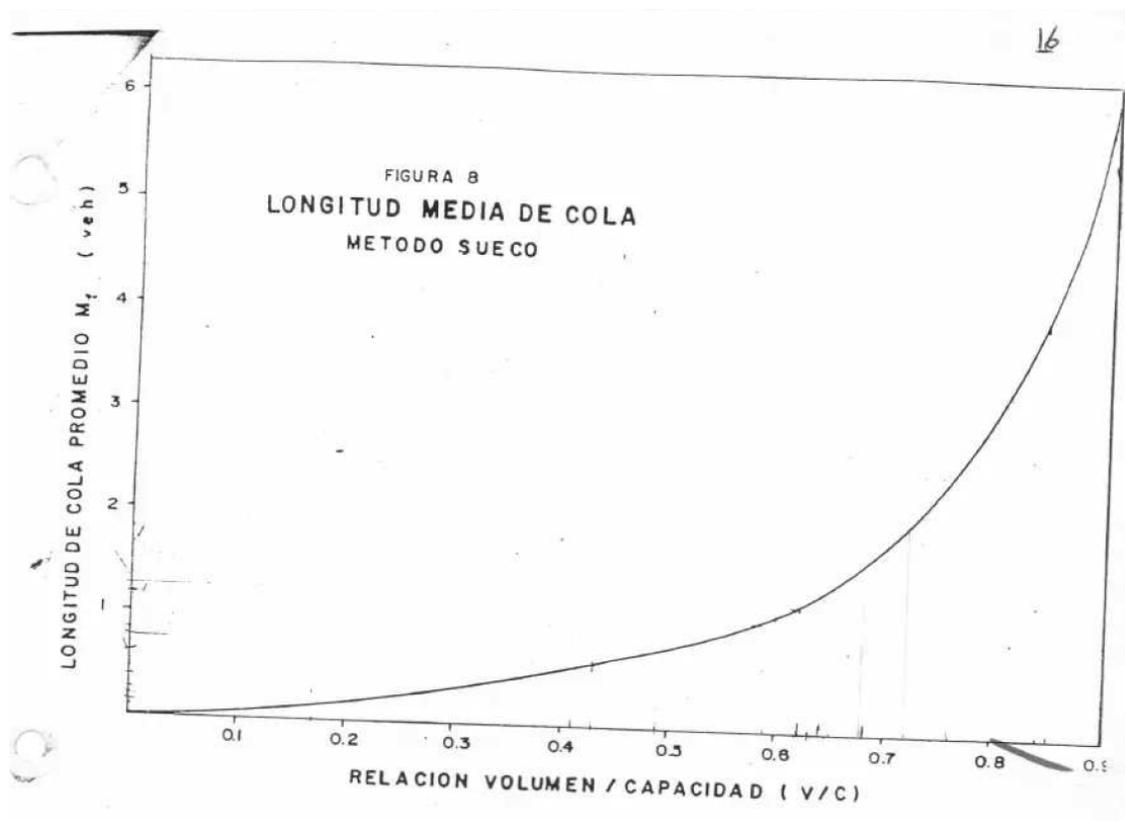
β_2 = Intervalo de seguimiento (s).

t_c = Intervalo crítico (s).

6. Determinar la longitud de cola media para carriles de acceso, mediante lo estipulado en la figura 6 y con base en la relación volumen/capacidad.

Figura 6

Longitud media de cola



Nota. Tomado de *Método para estimar la capacidad y demoras en las intersecciones tipo rotonda en Costa Rica*, 1990.

Con:

M_f = Longitud de cola promedio (veh).

(V/C) = Relación volumen/capacidad.

Para obtener la longitud de cola en metros, tomando el dato en vehículos, se aplica la siguiente fórmula:

$$M'_f = M_f * (7.5 + (\%T * 0.07)) \quad (7)$$

Con:

M_f' = Longitud de cola promedio (m).

M_f = Longitud de cola promedio (veh).

$\%T$ = Porcentaje de vehículos pesados en acceso.

7. Determinación de probabilidad de detenerse ante señal de CEDA en el acceso.
Con este dato será posible calcular la demora geométrica.

$$p_s = 100 * (1 - p_f + p_f * p_k) \quad (8)$$

Con:

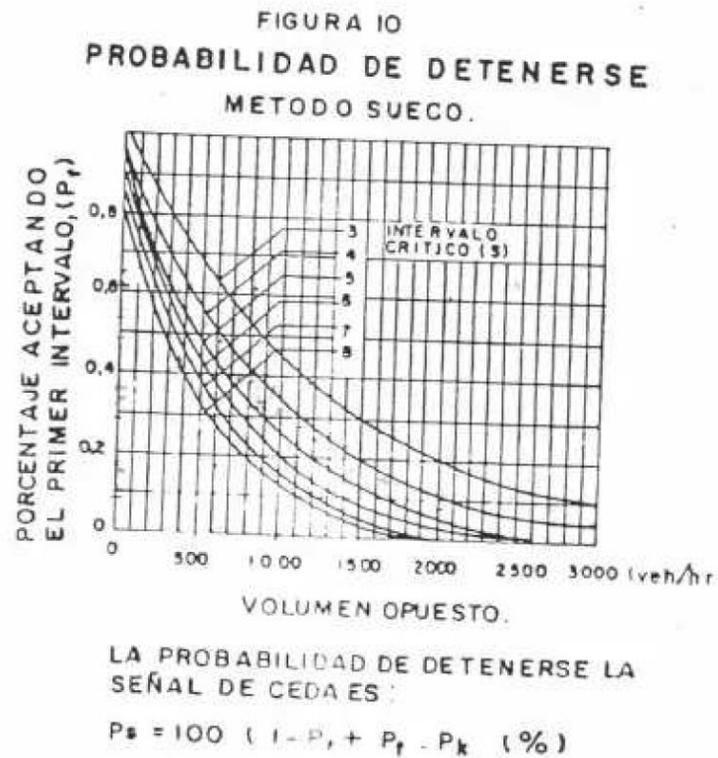
p_s = Probabilidad de detenerse (%).

p_f = Probabilidad de aceptar el primer intervalo. Obtenido de figura 7, con V_{op} y t_c

$p_k = (V/C)$ probabilidad de esperar en cola.

Figura 7

Probabilidad de detenerse



Nota. Tomado de *Método para estimar la capacidad y demoras en las intersecciones tipo rotonda en Costa Rica*, 1990.

8. Estimación de demora promedio total por carril.

$$d = d_v + d_k \tag{9}$$

Con:

d = Demora media total (s/veh).

$d_v = M_f * 3600/V_2$ demora de espera (s/veh).

d_k = demora geométrica (s/veh), tomado de Tabla 2 en función de la velocidad de aproximación y probabilidad de detenerse.

Tabla 2*Demora geométrica*

Velocidad aprox. (km/h)	Probabilidad de detenerse	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

Nota. Tomado de *Método para estimar la capacidad y demoras en las intersecciones tipo rotonda en Costa Rica*, 1990.

- Determinación del nivel de servicio según el método HCM, el cual confirma la posibilidad de estimar el nivel de servicio mediante la demora media total

Tabla 3

Definición de nivel de servicio

Definición de Nivel de Servicio	
Nivel de Servicio	Demora Media Total (s/veh)
A	≤ 10
B	10 a 20
C	20 a 30
D	30 a 40
E	40 a 150
F	≥ 150

Nota. Tomado de HCM, 2010.

Capítulo 2

Marco Metodológico

Paradigma, Enfoque Metodológico y Métodos de Investigación Propuestos

El paradigma de la investigación constituye aquel pensamiento, técnica o metodología desarrollado por una comunidad investigativa en común, con el objetivo de dar soluciones a un problema determinado (Homo Academicus, 2020). Para el presente proyecto, se considera que el paradigma es el estudio de las intersecciones tipo rotonda y sus metodologías de análisis realizadas. En este caso, se especifican aquellas técnicas y conceptos alrededor de las distribuciones del volumen vehicular y los intervalos críticos en una rotonda.

Se concluye que el enfoque metodológico del proyecto es de tipo cuantitativo, esto al considerar los procesos por utilizar, donde se cuantificarán variables mediante investigación, observación y cálculos determinados. Asimismo, se resalta el volumen vehicular de la rotonda, sus características geométricas y demás parámetros viales, para demostrar el efecto sobre sus intervalos críticos. Por lo tanto, el relacionamiento de variables y la forma en la que unas influyen en otras es un principio fundamental para la investigación y un aspecto característico del enfoque cuantitativo.

Las metodologías utilizadas, principalmente el *Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones tipo Rotonda de Costa Rica* de Mario Durán, son aplicables de forma generalizada para el análisis de rotondas de similares características a las del proyecto; se consideran factores varios en rotondas que tengan una afectación en parámetros como los intervalos críticos y la distribución vehicular. La metodología y los procesos del proyecto se apoyan en herramientas digitales, tabulaciones de datos por categorías y mediciones de elementos geométricos en rotondas.

Categorías de Análisis de la Investigación

Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones Tipo Rotonda de Costa Rica.

La metodología del ingeniero Mario Durán presenta puntos que afectan los resultados en los análisis de intersecciones tipo rotonda, como características geométricas, es decir,

número de carriles, ángulos de entrada, intervalos críticos; y de seguimiento, además de volúmenes vehiculares en carriles de entrada y en el anillo central.

Con base en los procesos de la metodología del ingeniero Mario Durán, se realizarán aforos vehiculares manuales en intervalos de 15 minutos durante los periodos de mayor demanda en la rotonda, para así obtener volúmenes vehiculares que mediante el procesamiento de datos demuestren tasas de flujo horario (Durán, 1990).

Herramientas

- Microsoft Excel.
- Tabulación de aforos vehiculares.

En la tabla se reflejan los aforadores seleccionados para documentar los volúmenes vehiculares de cada ramal de acceso a la rotonda; se toma en cuenta el carril de entrada y el tipo de los vehículos. Los aforos se darán a lo largo de dos horas, en donde se captarán datos en intervalos de 15 minutos y se distribuirán en días y franjas horarias distintas. Se resalta que el formato de la tabla es específico para rotondas de dos carriles, toda variación conllevará un ajuste en caso de futuras investigaciones.

Tabla 4

Aforos vehiculares en sitio

Fecha: DD/MM/AAAA Nombre del aforador: Ramal de entrada:						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho
6:00 - 6:15						
6:15 - 6:30						
6:30 - 6:45						
6:45 - 7:00						
7:00 - 7:15						
7:15 - 7:30						
7:30 - 7:45						
7:45 - 8:00						
8:00 - 8:15						
16:00-16:15						
16:15 - 16:30						
16:30 - 16:45						

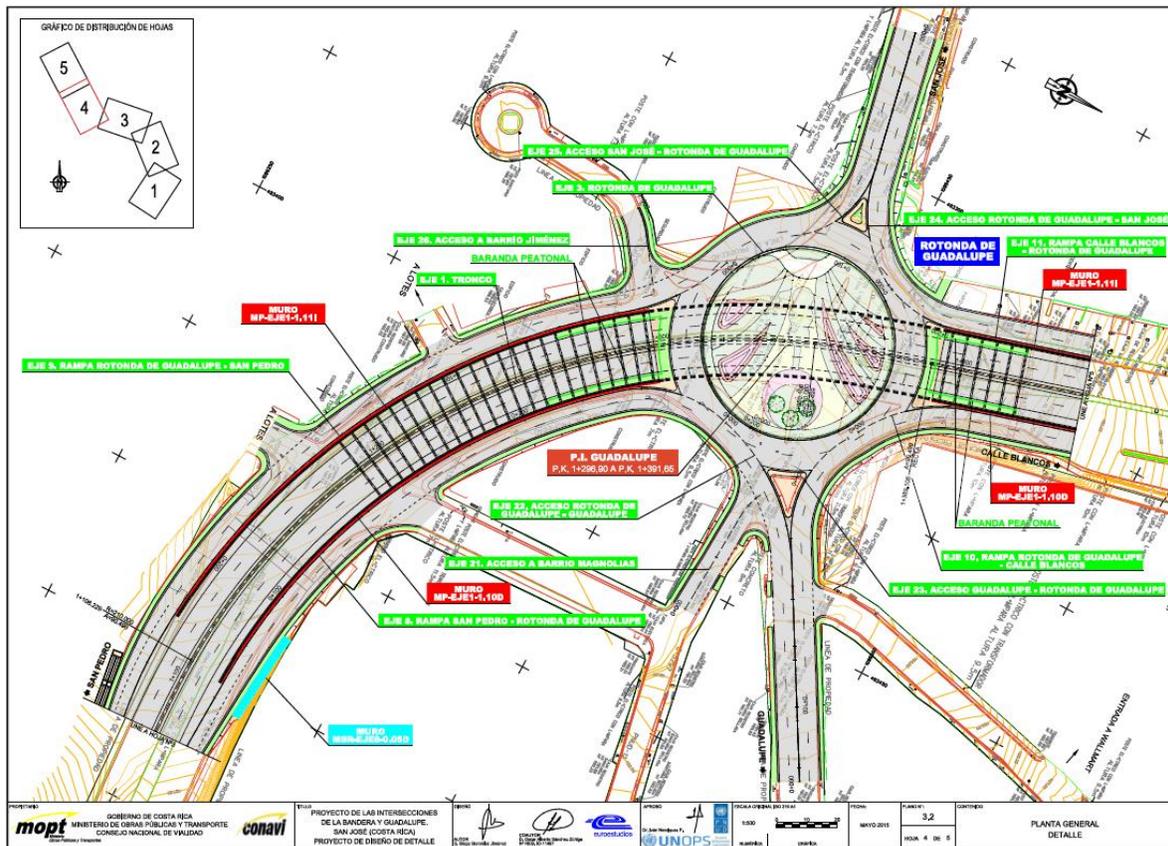
16:45 - 17:00						
17:00 - 17:15						
17:15 - 17:30						
17:30 - 17:45						
17:45 - 18:00						

Nota. Elaboración propia, 2023.

- Google Earth.
- Civil 3D.
- Planos constructivos de la rotonda del Bicentenario proporcionados por UNOPS.

Figura 8

Plano constructivo rotonda del Bicentenario



Nota. Tomado de UNOPS, 2015.

Definición de Variables

Tabla 5

Definición de variables

Objetivos Específicos	Variable Dependiente	Variable Independiente	Relación de variables	Herramienta de recolección
2. Estimar el tiempo de entrada de los vehículos que ingresan a la rotonda de Guadalupe según el tipo al que corresponden.	Intervalo Crítico	Volumen Vehicular	Relación proporcional entre el volumen vehicular y los intervalos críticos de entrada a la rotonda. A mayor volumen vehicular, mayor tiempo de maniobra de entrada y viceversa.	Intervalos de medición de 15 minutos considerando el tiempo de entrada de 10 vehículos.
3. Calcular los intervalos críticos de la rotonda de Guadalupe a través de los datos recopilados en los conteos vehiculares.		Eventualidades en el anillo principal	Todo evento en el anillo principal de la rotonda, como velocidades de tránsito o maniobras internas, afectará el espacio de entrada para vehículos que ingresen.	Conteos vehiculares, recolección de datos de ingreso a la rotonda en tablas de aforo.
4. Analizar el efecto de la geometría en los intervalos críticos de la rotonda de Guadalupe.		Maniobras de entrada	El comportamiento del conductor al realizar la maniobra de entrada a la rotonda afectará a los intervalos críticos de forma directa.	Medición del ángulo de entrada a la rotonda mediante Civil 3D utilizando los planos proporcionados por UNOPS.
1. Realizar conteos vehiculares según el tipo de vehículos que circulan la rotonda de Guadalupe mediante visitas de campo.	Distribución vehicular	Volumen Vehicular	Las variaciones en volúmenes vehiculares afectarán la distribución en intersecciones, lo que provocará a los conductores alternar sus rutas previstas.	Conteos vehiculares separados por tipo de vehículo en livianos y pesados, según su carril de circulación.
5. Expresar la distribución del volumen vehicular por carril de entrada en la rotonda de Guadalupe mediante la elaboración de gráficos en función de la situación vial actual.		Correspondencia de carril de entrada-salida	Los vehículos que ingresen a la rotonda lo harán en el carril correspondiente a su carril de salida, según dicta la ley de tránsito, así se evitarán imprevistos en la intersección.	Los gráficos expresan la distribución vehicular proveniente del análisis de ángulos de entrada e intervalos críticos, datos recopilados en tablas de aforo.

Nota. Elaboración propia, 2023.

Población

La población de estudio de la investigación corresponde a los conductores que transitan la Ruta Nacional 39, Circunvalación y la Ruta Nacional Secundaria 218; quienes circulan la rotonda de Guadalupe o del Bicentenario. Esta cuenta con cuatro ramales de entrada, de dos carriles cada uno, donde los conductores que ingresen a la intersección deberán ubicarse en el carril correspondiente a su carril de salida, como lo dicta la ley de tránsito, dar prioridad de paso a los conductores del anillo central y no realizar maniobras de cambio de carril.

Muestra

Se considera que la investigación constituye una muestra del tipo aleatorio simple, ya que no hay un lineamiento específico de análisis en los sujetos por investigar, sino que todo aquel conductor que ingrese a la rotonda por un ramal de entrada cumple como objeto de muestreo. Sin embargo, hay acotaciones como el tipo de vehículo, donde serán catalogados en livianos o pesados; se deja por fuera del estudio a las motocicletas.

El muestreo se llevará a cabo en horas de mayor demanda para la rotonda, por consiguiente, de las 6:00 AM a 8:00 AM y de las 4:00 PM a 6:00 PM. Se medirá el aforo de los vehículos que ingresan a la rotonda en intervalos de 15 minutos, esto representa una delimitación de las muestras que se tomen en consideración para el análisis.

Técnicas e Instrumentos para la Recolección de Datos

Los datos de análisis de la investigación serán recopilados mediante aforos vehiculares a través de la observación por parte del personal calificado, esta técnica a diferencia de otras no conlleva un contacto directo con el sujeto por investigar, es decir, no brinda los datos de estudio, sino que su comportamiento será la variable por considerar de acuerdo con el funcionamiento de la rotonda. Se incluye la medición de elementos geométricos, determinados a través de los planos constructivos de la rotonda de Guadalupe y proporcionados por UNOPS, quien fue el organismo encargado de las reformas en la intersección finalizadas en 2021.

Los 4 ramales de ingreso de la rotonda serán analizados de forma específica en los periodos de mayor demanda de la intersección; se pretende medir los tiempos de entrada de los vehículos, ello al realizar aforos vehiculares en intervalos de 15 minutos. Tales estarán a

cargo del personal debidamente preparado para la labor, la cual se apoyará en la Tabla 3 para documentar los datos.

Técnicas e Instrumentos para el Procesamiento y Análisis de Datos

Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones Tipo Rotonda de Costa Rica

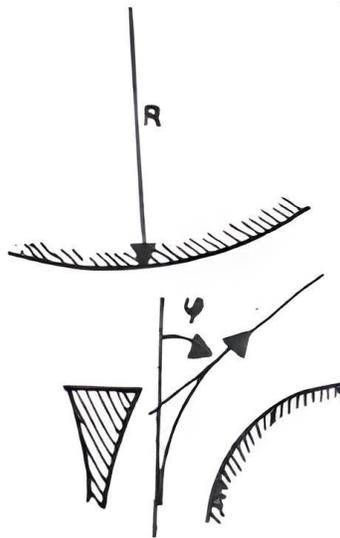
La metodología del ingeniero Mario Durán comprende los procedimientos principales que se aplicarán en el análisis de la distribución del volumen vehicular para el presente proyecto. Con este método se conseguirá el cálculo de intervalos críticos en la rotonda a partir de la recopilación de datos por conteos vehiculares en sitio.

Pasos por Seguir para Procesar los Datos

1. Cálculo de ángulos de entrada correspondientes a los ramales de acceso a la rotonda a partir de las dimensiones geométricas en los planos constructivos proporcionados por UNOPS. Se convierten los planos a formato dwg para manipularlos en el software de Civil 3D. En él se traza una línea desde el centro de la rotonda hasta el centro de los ramales de entrada, seguidamente, se traza una línea desde el centro de los ramales al centro del anillo principal. El procedimiento es apreciable en la Figura 9.

Figura 9

Determinar el ángulo de entrada



Nota. Tomado de *Método para estimar la capacidad y demoras en intersecciones tipo rotonda en Costa Rica*, 1990.

Donde:

$\mu = \text{Ángulo de entrada}$

(10)

2. Se dispone de un aforador previamente capacitado en cada ramal de entrada para que realice los conteos vehiculares según carril de entrada y tipo de vehículo.
3. Se inician los aforos vehiculares; se documentan los vehículos que ingresan a la rotonda según su tipo en livianos o pesados y según su carril de circulación, sea derecho o izquierdo.
4. Los aforos se darán en intervalos de 15 minutos, durante este periodo se estimará el tiempo de intervalos críticos por carril de entrada de 10 vehículos.
5. Se cuentan los datos de aforos e intervalos críticos por carril; se promedian los intervalos medidos y se dividen entre la cantidad de vehículos considerados para la medición de tiempo (10 vehículos).

$$\text{Intervalo Crítico} = \frac{\text{Tiempo total}}{(\text{Cantidad de vehículos})} \quad (11)$$

6. Se trasladan los datos al formato definitivo para el análisis (Tabla 5 en Excel correspondiente a cada ramal de acceso) y se documenta, por separado, la cantidad de vehículos según tipo y carril de circulación. Se cuenta también con los intervalos críticos estimados para cada 15 minutos.
7. Se aplican factores de corrección que suman 0.3 segundos a cada intervalo crítico por cada 10% de vehículos pesados aforados en el carril.
8. Se aplica un factor de corrección que resta 0.2 segundos a los intervalos críticos del carril derecho.
9. Se promedian los intervalos críticos de cada carril.
10. Se determina y analiza la distribución del volumen vehicular por carril de entrada, esto al contar con intervalos críticos corregidos por carril y ángulos de entrada respectivos.

Capítulo 3

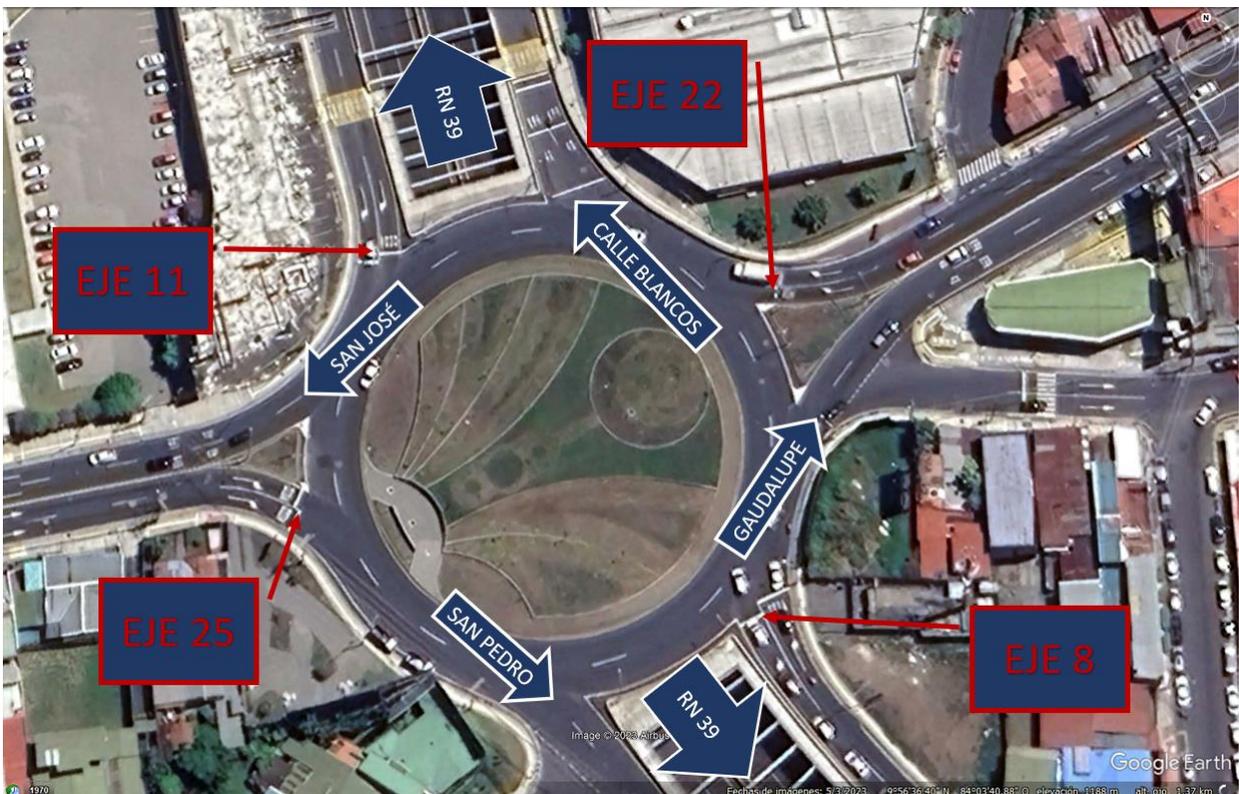
Análisis de los resultados

Análisis de Datos

Se asignó una denominación a cada uno de los ramales de entrada de la rotonda de estudio, esto con el fin de organizar la distribución en las tablas de los aforos vehiculares. Se destaca que la nomenclatura corresponde con los planos constructivos de la rotonda del Bicentenario realizados por UNOPS, los cuales se pueden consultar en la Figura 8. La distribución de entradas a la rotonda y su nomenclatura es la siguiente:

Figura 10

Nomenclatura de ramales de entrada



Nota. Elaboración propia y Google Earth, 2023.

La distribución de los ramales de entrada se da de la siguiente manera:

- Eje 8: Vehículos que ingresan desde San Pedro.
- Eje 22: Vehículos que ingresan desde Guadalupe.
- Eje 11: Vehículos que ingresan desde Calle Blancos.
- Eje 25: Vehículos que ingresan desde San José.

La ejecución de los aforos vehiculares y la recopilación de datos para cálculo de intervalos críticos se llevó a cabo en sitio en horas pico de tránsito. Con base en la metodología del proyecto, se realizó un aforo por la mañana y uno por la tarde. El proceso se ejecutó por tres días, se inició el miércoles 21 de junio y finalizó el viernes 23 de junio de 2023.

Para el cálculo de intervalos críticos, cada aforador fue designado a un ramal de entrada. En cada intervalo de 15 minutos, adicional a la medición de vehículos que ingresaban a la rotonda por cada carril, el personal debía calcular el tiempo que le tomaba a 10 vehículos realizar la maniobra de entrada a la rotonda, dato que posteriormente sería promediado y tabulado en el formato de la Tabla 4.

El cálculo del tiempo de intervalos críticos se llevó a cabo por cada aforador utilizando un cronómetro y midiendo el tiempo desde que el vehículo salía de la línea de ceda hasta que se ubicaba en su carril respectivo de la corriente central. Se emplearon los cronómetros de los teléfonos celulares del personal, quienes tomaron capturas de pantalla a cada uno de los 10 tiempos en cada intervalo de 15 minutos, datos que serían promediados y tabulados.

A continuación se presentan las tablas de los aforos vehiculares y sus datos:

Aforo Vehicular del miércoles 21 de Junio de 2023, 6:00AM – 8:00AM

Tabla 6

Aforo vehicular miércoles 21 de junio de 2023 AM

Fecha: 21/06/2023 Nombre del Aforador: Pablo Alberto Rojas Ávila Ramal de Entrada: E8						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	60	56	4	7	3,99	4,01
6:15 - 6:30	100	120	9	7	3,95	4,01
6:30 - 6:45	111	120	11	12	3,88	3,08
6:45 - 7:00	119	112	4	13	3,24	2,99
7:00 - 7:15	128	119	8	15	3,42	2,90
7:15 - 7:30	116	106	7	13	3,39	2,93
7:30 - 7:45	139	127	7	19	3,38	3,05
7:45 - 8:00	121	127	12	11	3,39	2,74

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 7.

Aforo vehicular miércoles 21 de junio de 2023 AM

Fecha: 21/06/2023 Nombre del Aforador: Mauricio Castro Ramal de Entrada: E22						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	107	101	51	58	3,34	3,93
6:15 - 6:30	124	117	54	89	3,78	3,61
6:30 - 6:45	134	131	35	41	3,51	3,89
6:45 - 7:00	112	107	21	17	3,25	3,15
7:00 - 7:15	108	99	17	18	3,01	2,85
7:15 - 7:30	112	110	23	20	3,07	3,06
7:30 - 7:45	97	91	19	21	3,49	2,96
7:45 - 8:00	100	93	21	25	3,85	3,79

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 8*Aforo vehicular miércoles 21 de junio de 2023 AM*

Fecha: 21/06/2023 Nombre del Aforador: Luis Ángel Medrano Ramal de Entrada: E11						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	29	49	5	1	3,57	2,83
6:15 - 6:30	19	42	4	3	3,12	2,75
6:30 - 6:45	22	40	6	5	3,26	2,22
6:45 - 7:00	37	66	4	3	3,3	2,37
7:00 - 7:15	29	445	7	0	2,96	2,48
7:15 - 7:30	40	69	4	4	3,48	2,64
7:30 - 7:45	31	58	1	2	3,33	2,56
7:45 - 8:00	43	60	6	2	3,65	2,8

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 9*Aforo vehicular miércoles 21 de junio de 2023 AM*

Fecha: 21/06/2023 Nombre del Aforador: Sebastián Losilla Ramal de Entrada: E25						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	55	69	9	24	3,58	2,93
6:15 - 6:30	65	81	13	28	3,42	2,86
6:30 - 6:45	71	111	10	17	3,33	2,91
6:45 - 7:00	98	108	5	24	3,12	2,7
7:00 - 7:15	88	92	11	24	3,26	2,84
7:15 - 7:30	93	121	10	33	3,56	2,75
7:30 - 7:45	101	114	3	26	3,44	2,94
7:45 - 8:00	100	97	6	17	3,28	2,88

Nota. Elaboración propia, 2023.

Aforo Vehicular del miércoles 21 de Junio de 2023, 4:00PM – 6:00PM

Tabla 10

Aforo vehicular miércoles 21 de junio de 2023 PM

Fecha: 21/06/2023 Nombre del Aforador: Pablo Alberto Rojas Ávila Ramal de Entrada: E8						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	88	104	7	12	4,00	3,89
16:15 - 16:30	60	96	6	4	3,97	3,94
16:30 - 16:45	86	113	5	7	3,92	3,12
16:45 - 17:00	87	120	3	5	3,86	3,44
17:00 - 17:15	82	111	3	4	3,44	3,37
17:15 - 17:30	78	98	3	11	3,56	2,46
17:30 - 17:45	61	96	1	1	3,78	2,84
17:45 - 18:00	40	62	1	1	3,33	2,55

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 11*Aforo vehicular miércoles 21 de junio de 2023 PM*

Fecha: 21/06/2023 Nombre del Aforador: Mauricio Castro Ramal de Entrada: E22						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	130	120	28	29	3,45	3,88
16:15 - 16:30	123	131	19	22	3,61	3,76
16:30 - 16:45	109	107	25	21	3,33	3,33
16:45 - 17:00	98	91	19	15	3,31	3,01
17:00 - 17:15	90	93	13	16	3,77	3,15
17:15 - 17:30	83	85	13	14	3,72	2,94
17:30 - 17:45	91	85	10	11	3,46	2,83
17:45 - 18:00	83	80	11	13	3,30	3,22

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 12*Aforo vehicular miércoles 21 de junio de 2023 PM*

Fecha: 21/06/2023 Nombre del Aforador: Luis Ángel Medrano Ramal de Entrada: E11						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	90	50	1	1	3,44	2,90
16:15 - 16:30	55	59	0	0	3,13	2,83
16:30 - 16:45	60	67	1	3	3,34	2,82
16:45 - 17:00	60	63	0	0	3,17	2,38
17:00 - 17:15	68	63	0	2	3,21	2,49
17:15 - 17:30	72	61	1	0	3,73	2,20
17:30 - 17:45	65	69	1	2	3,66	2,50
17:45 - 18:00	73	61	0	1	3,58	2,54

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 13*Aforo vehicular miércoles 21 de junio de 2023 PM*

Fecha: 21/06/2023 Nombre del Aforador: Sebastián Losilla Ramal de Entrada: E25						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	78	76	1	12	3,20	2,94
16:15 - 16:30	148	136	1	27	2,72	3,11
16:30 - 16:45	135	142	1	22	3,31	2,94
16:45 - 17:00	122	146	4	16	3,20	2,84
17:00 - 17:15	120	146	6	17	3,40	2,71
17:15 - 17:30	152	145	5	27	3,36	2,69
17:30 - 17:45	145	122	1	22	3,48	2,92
17:45 - 18:00	137	117	3	17	3,51	2,36

Nota. Elaboración propia, 2023.

Aforo Vehicular del jueves 22 de Junio de 2023, 6:00AM – 8:00AM

Tabla 14

Aforo vehicular jueves 22 de junio de 2023 AM

Fecha: 22/06/2023 Nombre del Aforador: Pablo Alberto Rojas Ávila Ramal de Entrada: E8						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	82	102	7	10	3,92	4
6:15 - 6:30	97	126	7	10	3,90	3,97
6:30 - 6:45	98	111	9	13	3,86	3,06
6:45 - 7:00	95	88	7	10	3,30	2,94
7:00 - 7:15	102	113	7	12	3,48	2,83
7:15 - 7:30	123	127	9	12	3,33	2,97
7:30 - 7:45	101	111	9	8	3,35	3,12
7:45 - 8:00	65	117	7	14	3,41	2,89

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 15*Aforo vehicular jueves 22 de junio de 2023 AM*

Fecha: 22/06/2023 Nombre del Aforador: Mauricio Castro Ramal de Entrada: E22						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	110	102	39	37	3,47	3,92
6:15 - 6:30	101	105	30	28	3,72	3,72
6:30 - 6:45	93	90	23	21	3,49	3,86
6:45 - 7:00	120	111	20	19	3,26	3,24
7:00 - 7:15	108	101	19	21	3,08	2,89
7:15 - 7:30	110	103	23	20	3,16	3,12
7:30 - 7:45	97	95	19	15	3,54	2,92
7:45 - 8:00	103	99	24	21	3,83	3,66

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 16*Aforo vehicular jueves 22 de junio de 2023 AM*

Fecha: 22/06/2023 Nombre del Aforador: Luis Ángel Medrano Ramal de Entrada: E11						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	21	48	2	1	3,65	2,84
6:15 - 6:30	23	53	2	0	3,48	2,8
6:30 - 6:45	33	50	1	4	3,86	2,42
6:45 - 7:00	24	39	3	2	3,52	2,36
7:00 - 7:15	25	65	6	1	3,37	2,57
7:15 - 7:30	25	66	1	6	2,98	2,63
7:30 - 7:45	33	60	5	2	3,14	2,54
7:45 - 8:00	33	50	3	4	3,22	2,43

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 17*Aforo vehicular jueves 22 de junio de 2023 AM*

Fecha: 22/06/2023 Nombre del Aforador: Sebastián Losilla Ramal de Entrada: E25						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	87	78	10	27	3,33	2,92
6:15 - 6:30	67	84	6	21	3,38	2,86
6:30 - 6:45	112	109	7	25	2,57	2,91
6:45 - 7:00	108	118	11	32	3,24	2,73
7:00 - 7:15	10	107	9	24	3,46	2,88
7:15 - 7:30	76	97	5	24	3,56	2,64
7:30 - 7:45	99	104	10	26	3,67	2,53
7:45 - 8:00	90	100	14	22	3,54	2,38

Nota. Elaboración propia, 2023.

Aforo Vehicular del jueves 22 de Junio de 2023, 4:00PM – 6:00PM

Tabla 18

Aforo vehicular jueves 22 de junio de 2023 PM

Fecha: 22/06/2023 Nombre del Aforador: Pablo Alberto Rojas Ávila Ramal de Entrada: E8						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	58	89	6	1	4,05	3,98
16:15 - 16:30	68	88	5	7	3,92	3,91
16:30 - 16:45	67	84	5	13	3,86	3,15
16:45 - 17:00	87	106	3	5	3,23	3,22
17:00 - 17:15	67	102	5	2	3,48	3,02
17:15 - 17:30	81	104	0	6	3,3	3,11
17:30 - 17:45	53	83	3	4	3,45	3,07
17:45 - 18:00	85	91	2	6	3,38	2,96

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 19*Aforo vehicular jueves 22 de junio de 2023 PM*

Fecha: 22/06/2023 Nombre del Aforador: Mauricio Castro Ramal de Entrada: E22						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	109	111	20	17	3,48	3,95
16:15 - 16:30	113	104	21	18	3,56	3,86
16:30 - 16:45	104	98	30	23	3,61	3,55
16:45 - 17:00	105	101	19	19	3,53	3,42
17:00 - 17:15	114	112	25	24	3,88	3,13
17:15 - 17:30	110	106	21	23	3,74	3,2
17:30 - 17:45	93	87	15	10	3,57	3,3
17:45 - 18:00	107	101	17	10	3,37	3,57

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 20*Aforo vehicular jueves 22 de junio de 2023 PM*

Fecha: 22/06/2023 Nombre del Aforador: Luis Ángel Medrano Ramal de Entrada: E11						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	42	39	1	2	3,44	2,90
16:15 - 16:30	49	46	1	1	3,13	2,83
16:30 - 16:45	48	37	1	0	3,34	2,82
16:45 - 17:00	53	43	0	1	3,17	2,38
17:00 - 17:15	35	24	1	0	3,21	2,49
17:15 - 17:30	53	54	0	1	3,73	2,20
17:30 - 17:45	55	51	3	4	3,66	2,50
17:45 - 18:00	61	56	2	5	3,58	2,54

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 21*Aforo vehicular jueves 22 de junio de 2023 PM*

Fecha: 22/06/2023 Nombre del Aforador: Sebastián Losilla Ramal de Entrada: E25						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	143	123	5	29	3,33	2,96
16:15 - 16:30	144	128	3	22	2,81	3,21
16:30 - 16:45	97	83	2	20	3,36	2,92
16:45 - 17:00	119	108	5	15	3,18	2,91
17:00 - 17:15	139	138	11	23	3,56	2,84
17:15 - 17:30	103	86	0	21	3,29	2,63
17:30 - 17:45	99	85	11	22	3,54	2,89
17:45 - 18:00	55	56	11	22	3,62	2,45

Nota. Elaboración propia, 2023.

Aforo Vehicular del viernes 23 de junio de 2023, 6:00AM – 8:00AM

Tabla 22

Aforo vehicular viernes 23 de junio de 2023 AM

Fecha: 23/06/2023 Nombre del Aforador: Pablo Alberto Rojas Ávila Ramal de Entrada: E8						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	108	120	2	8	4,10	3,98
6:15 - 6:30	111	171	2	7	3,90	3,84
6:30 - 6:45	103	151	6	5	3,63	3,25
6:45 - 7:00	120	143	4	6	3,18	3,15
7:00 - 7:15	87	118	3	13	3,59	3,01
7:15 - 7:30	92	138	5	11	3,46	2,76
7:30 - 7:45	83	127	5	6	3,21	3,61
7:45 - 8:00	56	92	8	10	3,76	2,89

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 23*Aforo vehicular viernes 23 de junio de 2023 AM*

Fecha: 23/06/2023 Nombre del Aforador: Mauricio Castro Ramal de Entrada: E22						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	109	115	28	33	3,78	3,87
6:15 - 6:30	129	136	23	35	3,61	3,52
6:30 - 6:45	135	146	35	40	3,52	3,71
6:45 - 7:00	143	158	31	40	3,37	3,25
7:00 - 7:15	147	150	29	43	3,11	3,06
7:15 - 7:30	132	143	23	25	3,02	3,24
7:30 - 7:45	124	136	24	30	3,09	3,03
7:45 - 8:00	136	143	20	31	3,84	3,82

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 24*Aforo vehicular viernes 23 de junio de 2023 AM*

Fecha: 23/06/2023 Nombre del Aforador: Luis Ángel Medrano Ramal de Entrada: E11						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	54	63	2	3	3,59	2,96
6:15 - 6:30	54	47	3	2	3,23	3,03
6:30 - 6:45	19	44	0	1	3,33	2,47
6:45 - 7:00	20	49	6	2	3,14	2,11
7:00 - 7:15	2	46	0	1	3,02	2,89
7:15 - 7:30	30	39	3	4	3,48	2,51
7:30 - 7:45	12	40	9	2	3,56	2,25
7:45 - 8:00	16	53	5	3	3,29	2,46

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 25*Aforo vehicular viernes 23 de junio de 2023 AM*

Fecha: 23/06/2023 Nombre del Aforador: Sebastián Losilla Ramal de Entrada: E25						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
6:00 - 6:15	99	85	4	22	3,34	3,1
6:15 - 6:30	55	56	4	22	3,04	2,93
6:30 - 6:45	59	80	4	23	2,67	2,67
6:45 - 7:00	77	111	6	23	3,41	2,41
7:00 - 7:15	69	78	9	28	3,39	2,87
7:15 - 7:30	78	73	6	34	3,21	2,84
7:30 - 7:45	46	64	8	13	3,08	3,03
7:45 - 8:00	75	93	3	24	3,49	2,91

Nota. Elaboración propia, 2023.

Aforo Vehicular del viernes 23 de junio de 2023, 4:00PM – 6:00PM

Tabla 26

Aforo vehicular viernes 23 de junio de 2023 PM

Fecha: 23/06/2023 Nombre del Aforador: Pablo Alberto Rojas Ávila Ramal de Entrada: E8						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	88	104	7	12	3,92	3,99
16:15 - 16:30	60	96	6	4	4,01	3,92
16:30 - 16:45	86	113	5	7	3,28	3,39
16:45 - 17:00	87	120	3	5	3,46	3,08
17:00 - 17:15	82	111	3	4	3,88	3,17
17:15 - 17:30	78	98	3	11	3,29	3,22
17:30 - 17:45	61	96	1	1	3,68	3,13
17:45 - 18:00	40	62	1	1	3,71	3,26

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 27*Aforo vehicular viernes 23 de junio de 2023 PM*

Fecha: 23/06/2023 Nombre del Aforador: Mauricio Castro Ramal de Entrada: E22						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	102	110	15	18	3,48	3,91
16:15 - 16:30	110	124	14	16	3,63	3,48
16:30 - 16:45	121	135	11	19	3,79	3,23
16:45 - 17:00	92	102	9	13	3,41	3,02
17:00 - 17:15	96	108	11	10	3,32	2,96
17:15 - 17:30	101	115	8	15	3,81	3,11
17:30 - 17:45	104	109	15	16	3,61	3,22
17:45 - 18:00	98	108	10	14	3,89	3,58

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 28*Aforo vehicular viernes 23 de junio de 2023 PM*

Fecha: 23/06/2023 Nombre del Aforador: Luis Ángel Medrano Ramal de Entrada: E11						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	48	43	1	3	3,24	2,94
16:15 - 16:30	33	43	3	1	3,28	2,87
16:30 - 16:45	40	61	2	2	3,49	2,73
16:45 - 17:00	44	53	5	0	3,33	2,45
17:00 - 17:15	37	44	0	1	3,58	2,57
17:15 - 17:30	41	37	2	3	3,47	2,18
17:30 - 17:45	7	41	1	4	3,31	2,62
17:45 - 18:00	41	36	4	0	3,22	2,55

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 29*Aforo vehicular viernes 23 de junio de 2023 PM*

Fecha: 23/06/2023 Nombre del Aforador: Sebastián Losilla Ramal de Entrada: E25						
Hora	Livianos Carril Izquierdo	Livianos Carril Derecho	Pesados Carril Izquierdo	Pesados Carril Derecho	Intervalo Crítico Carril Izquierdo (s)	Intervalo Crítico Carril Derecho (s)
16:00 - 16:15	113	102	1	18	3,28	2,94
16:15 - 16:30	141	135	4	22	3,81	3,11
16:30 - 16:45	147	135	4	24	3,33	2,94
16:45 - 17:00	119	106	9	23	3,19	2,84
17:00 - 17:15	123	138	4	29	3,56	2,71
17:15 - 17:30	155	151	7	23	3,48	2,69
17:30 - 17:45	92	86	1	15	3,21	2,92
17:45 - 18:00	110	124	2	23	3,59	2,36

Nota. Elaboración propia, 2023.**Resultados y Datos Obtenidos**

Se realizaron aforos vehiculares durante 3 días en la rotonda de Guadalupe, donde se ubicó personal debidamente capacitado en cada una de las entradas, encargados de contar los vehículos que ingresan a la rotonda, distinguiendo livianos y pesados. Adicionalmente, debían estimar los intervalos críticos de cada carril de entrada.

La realidad vial de la rotonda de Guadalupe presentó patrones de afectación a su correcto funcionamiento, tanto en aforos matutinos como en vespertinos. El eje 8, 22 y 25 de la rotonda (según la nomenclatura asignada para este proyecto) tuvieron, en la mayor parte de su análisis, volúmenes vehiculares constantes y uniformes durante los periodos de aforo. Sin embargo, en el eje 22 se encontró un volumen vehicular más elevado; el ingreso fue un factor mayoritario en la falla del funcionamiento de la rotonda en momentos determinados,

lo que causó embotellamientos en el flujo vehicular central. El hecho imposibilita en algunos casos el ingreso de vehículos desde otros ramales de entrada o el tránsito en general dentro de la rotonda.

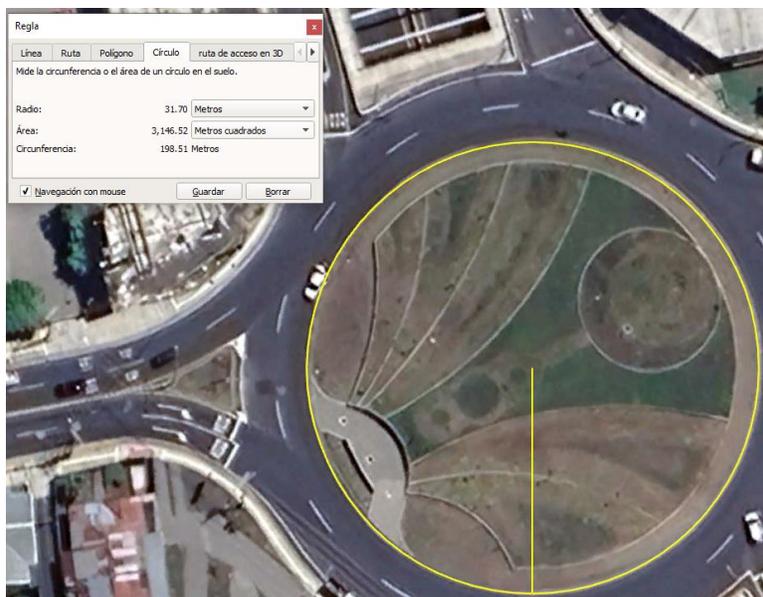
Adicionalmente, se identificó que la maniobra de salida de la rotonda con dirección a San José correspondiente al eje 25 suele incurrir en embotellamientos que colapsan el correcto funcionamiento; estos suelen perdurar entre 5 y 10 minutos, en los cuales se paraliza el tránsito interno y en donde aquellos vehículos que ingresan desde cualquier ramal no pueden avanzar. La afectación empeora por los elevados volúmenes vehiculares que ingresan desde el eje 22 proveniente de Guadalupe, especialmente por parte de los vehículos pesados.

Determinación de Ángulos de Entrada

De acuerdo con los métodos descritos por el ingeniero Mario Durán, apreciables en la Figura 4, se determinan ángulos de entrada para los ramales de acceso a la rotonda de Guadalupe desde sus planos constructivos suministrados por UNOPS. Se hace uso del programa Civil 3D para llevar a cabo el procedimiento, en donde será necesario escalar los planos al importarlos; como tal, se empleará Google Earth para tomar medidas de referencia en la rotonda.

Figura 11

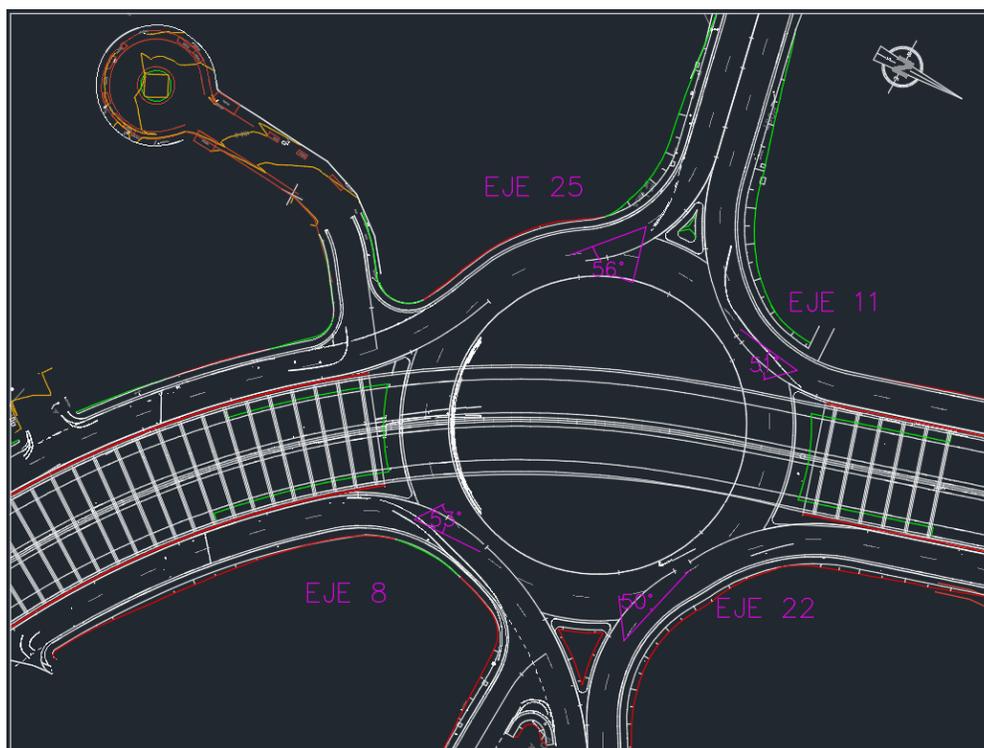
Medidas de referencia para escalar Civil 3D



Nota. Tomado de Google Earth, 2023.

Figura 12

Ángulos de entrada

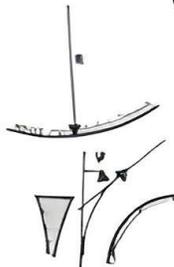


Nota. Elaboración propia, 2023.

Con la medida del radio de la rotonda, determinado por Google Earth, y de los ángulos calculados con la metodología del ingeniero Mario Durán, se procede a aplicar lo descrito en la Figura 13 para averiguar los valores de intervalos críticos correspondientes a las medidas de la rotonda de estudio. Con estos se podrán comparar los datos obtenidos por los aforadores vehiculares del proyecto en cada carril de entrada y verificar si se cumple con el funcionamiento esperado.

Figura 13

Valores de intervalo crítico según metodología del ingeniero Mario Durán

VALORES DE INTERVALO CRÍTICO (0% PESADOS), t_c	
	t_{cA} 4.0 seg. RADIO ROTONDA > 15 m, ENTRADA TANGENCIAL, $\phi < 40^\circ$
	t_{cB} 4.2 seg. RADIO ROTONDA > 15 m, ENTRADA NORMAL, $40^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$
	t_{cC} 4.5 seg. RADIO ROTONDA > 15 m, ENTRADA FORZADA, $\phi > 60^\circ$
	t_{cD} 4.0 seg. RADIO ROTONDA < 15 m.
FACTORES DE CORRECCION	+ 0.3 seg POR CADA 10% PESADOS - 0.2 seg. PARA CORRIENTE CARRIL DERECHO.

Nota. Tomado de Método para estimar la capacidad y demoras en intersecciones tipo rotonda en Costa Rica, 1990.

Se resalta la corrección en la metodología de Mario Durán en los intervalos críticos por el porcentaje de vehículos pesados presentes en la rotonda y para los carriles derechos. Al aplicarla se añade 0.3 segundos por cada 10% de vehículos pesados en el carril, ya que estos maniobran con mayor dificultad que los livianos. Además, se restan 0.2 segundos a los carriles derechos, puesto que los vehículos que ingresan realizan un recorrido contra la corriente principal menor que los del carril izquierdo.

Factores de Análisis de los Aforos Vehiculares

En primer lugar, se presenta una tabla con la cantidad total de vehículos livianos y pesados aforados en cada entrada de la rotonda durante un periodo determinado, además de los porcentajes correspondientes al tipo de vehículo. En segundo lugar, se encuentra una tabla con el total de vehículos por carril, se incluyen pesados y livianos, lo cual implica un aporte al análisis general durante el aforo. Adicionalmente, se tiene el promedio de los intervalos críticos calculados, se destaca que no se ha aplicado un factor de corrección.

Factores de Análisis, Aforo Vehicular del miércoles 21 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM

Tabla 30

Cantidad y porcentaje de vehículos por carril de entrada según tipo de vehículo, 21/6/2023, 6 a 8 AM

ENTRADA	CANTIDAD VEH. LIVIANOS	CANTIDAD VEH. PESADOS	TOTAL	PORCENTAJE VEH. LIVIANOS	PORCENTAJE VEH. PESADOS
EJE 8	1781	159	1940	92%	8%
EJE 11	1079	57	1136	95%	5%
EJE 22	1743	530	2273	77%	23%
EJE 25	1464	260	1724	85%	15%

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 31

Total de vehículos por carril, promedio de intervalos críticos, 21/6/2023, 6 a 8 AM

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	INTERVALO CARRIL IZQ. (S)	INTERVALO CARRIL DER. (S)	INTERVALO SEGÚN METODOLOGÍA (S)
Eje 8	956	984	3,58	3,21	4,2
Eje 11	287	849	3,33	2,58	4,2
Eje 22	1135	1138	3,41	3,40	4,2
Eje 25	738	986	3,37	2,85	4,2

Nota. Elaboración propia, 2023.

Factores de Análisis, Aforo Vehicular del miércoles 21 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM

Tabla 32

Cantidad y porcentaje de vehículos por carril de entrada según tipo de vehículo, 21/6/2023, 4 a 6 PM

ENTRADA	CANTIDAD VEH. LIVIANOS	CANTIDAD VEH. PESADOS	TOTAL	PORCENTAJE VEH. LIVIANOS	PORCENTAJE VEH. PESADOS
EJE 8	1382	74	1456	95%	5%
EJE 11	1036	13	1049	99%	1%
EJE 22	1599	279	1878	85%	15%
EJE 25	2067	182	2249	92%	8%

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 33*Total de vehículos por carril, promedio de intervalos críticos, 21/6/2023, 4 a 6 PM*

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	INTERVALO CARRIL IZQ. (S)	INTERVALO CARRIL DER. (S)	INTERVALO SEGÚN METODOLOGÍA (S)
Eje 8	611	845	3,73	3,20	4,2
Eje 11	547	502	3,41	2,58	4,2
Eje 22	945	933	3,49	3,27	4,2
Eje 25	1059	1190	3,27	2,81	4,2

Nota. Elaboración propia, 2023.**Factores de Análisis, Aforo Vehicular del jueves 22 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM****Tabla 34***Cantidad y porcentaje de vehículos por carril de entrada según tipo de vehículo, 22/6/2023, 6 a 8 AM*

ENTRADA	CANTIDAD VEH. LIVIANOS	CANTIDAD VEH. PESADOS	TOTAL	PORCENTAJE VEH. LIVIANOS	PORCENTAJE VEH. PESADOS
EJE 8	1658	151	1809	92%	8%
EJE 11	648	43	691	94%	6%
EJE 22	1648	379	2027	81%	19%
EJE 25	1446	273	1719	84%	16%

Nota. Elaboración propia, 2023.**Tabla 35***Total de vehículos por carril, promedio de intervalos críticos, 22/6/2023, 6 a 8 AM*

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	INTERVALO CARRIL IZQ. (S)	INTERVALO CARRIL DER. (S)	INTERVALO SEGÚN METODOLOGÍA (S)
Eje 8	825	984	3,57	3,22	4,2
Eje 11	240	451	3,40	2,57	4,2
Eje 22	1039	988	3,44	3,42	4,2
Eje 25	721	998	3,34	2,73	4,2

Nota. Elaboración propia, 2023.

Factores de Análisis, Aforo Vehicular del jueves 22 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM

Tabla 36

Cantidad y porcentaje de vehículos por carril de entrada según tipo de vehículo, 22/6/2023, 4 a 6 PM

ENTRADA	CANTIDAD VEH. LIVIANOS	CANTIDAD VEH. PESADOS	TOTAL	PORCENTAJE VEH. LIVIANOS	PORCENTAJE VEH. PESADOS
EJE 8	1313	73	1386	95%	5%
EJE 11	746	23	769	97%	3%
EJE 22	1675	312	1987	84%	16%
EJE 25	1706	222	1928	88%	12%

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 37

Total de vehículos por carril, promedio de intervalos críticos, 22/6/2023, 4 a 6 PM

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	INTERVALO CARRIL IZQ. (S)	INTERVALO CARRIL DER. (S)	INTERVALO SEGÚN METODOLOGÍA (S)
Eje 8	595	791	3,58	3,30	4,2
Eje 11	405	364	3,41	2,58	4,2
Eje 22	1023	964	3,59	3,50	4,2
Eje 25	947	981	3,34	2,85	4,2

Nota. Elaboración propia, 2023.

Factores de Análisis, Aforo Vehicular del viernes 23 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM

Tabla 38

Cantidad y porcentaje de vehículos por carril de entrada según tipo de vehículo, 23/6/2023, 6 a 8 AM

ENTRADA	CANTIDAD VEH. LIVIANOS	CANTIDAD VEH. PESADOS	TOTAL	PORCENTAJE VEH. LIVIANOS	PORCENTAJE VEH. PESADOS
EJE 8	1820	101	1921	95%	5%
EJE 11	588	46	634	93%	7%
EJE 22	2182	490	2672	82%	18%
EJE 25	1198	233	1431	84%	16%

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 39

Total de vehículos por carril, promedio de intervalos críticos, 23/6/2023, 6 a 8 AM

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	INTERVALO CARRIL IZQ. (S)	INTERVALO CARRIL DER. (S)	INTERVALO SEGÚN METODOLOGÍA (S)
Eje 8	795	1126	3,60	3,31	4,2
Eje 11	235	399	3,33	2,59	4,2
Eje 22	1268	1404	3,42	3,44	4,2
Eje 25	602	829	3,20	2,85	4,2

Nota. Elaboración propia, 2023.

Factores de Análisis, Aforo vehicular del viernes 23 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM

Tabla 40

Cantidad y porcentaje de vehículos por carril de entrada según tipo de vehículo, 23/6/2023, 4 a 6 PM

ENTRADA	CANTIDAD VEH. LIVIANOS	CANTIDAD VEH. PESADOS	TOTAL	PORCENTAJE VEH. LIVIANOS	PORCENTAJE VEH. PESADOS
EJE 8	1382	74	1456	95%	5%
EJE 11	649	32	681	95%	5%
EJE 22	1735	214	1949	89%	11%
EJE 25	1977	209	2186	90%	10%

Nota. Elaboración propia, 2023.

Tabla 41

Total de vehículos por carril, promedio de intervalos críticos, 23/6/2023, 4 a 6 PM

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	INTERVALO CARRIL IZQ. (S)	INTERVALO CARRIL DER. (S)	INTERVALO SEGÚN METODOLOGÍA (S)
Eje 8	611	845	3,65	3,40	4,2
Eje 11	309	372	3,37	2,61	4,2
Eje 22	917	1032	3,62	3,31	4,2
Eje 25	1032	1154	3,43	2,81	4,2

Nota. Elaboración propia, 2023.

Percepción de Datos Obtenidos

Adicional a los datos aforados en la rotonda de Guadalupe, en donde se destaca la determinación de volúmenes vehiculares e intervalos críticos por carril de entrada, se identificaron factores externos a estos parámetros que pueden afectar el correcto funcionamiento de la intersección y el flujo vehicular ininterrumpido en su carril central. Se hace referencia a factores humanos de los conductores, lo cual se ve influenciado por el tipo de vehículo y las distintas situaciones dadas en el carril central durante el ingreso.

Se identificó una tendencia en algunos conductores de realizar cambios de carril en el momento de ingreso a la rotonda o durante su traslado dentro ella, esto provoca conflictos con la corriente central, ya que causa que otros conductores tengan que detenerse o frenar para evitar colisiones. A su vez, se determinó que algunos conductores ejecutan maniobras en falso para ingresar, lo que conlleva a una confusión en el carril central, en ocasiones, incluso es necesario que se ceda el paso al ingresante; dicho comportamiento incumple la intención del uso de señales de Ceda el Paso ubicadas en las entradas.

Como se ha mencionado con anterioridad, se detectó un caso de embotellamiento muy común en la rotonda, el cual principalmente se genera por parte de los volúmenes vehiculares que ingresan desde el eje 22 con dirección a la salida del eje 25. Este fenómeno se da por los elevados volúmenes vehiculares que tienen que evacuar por la salida del eje 25, además, los vehículos que ingresan por el eje 22 para realizar la maniobra deben ubicarse en el carril izquierdo, lo cual implica un mayor recorrido. El embotellamiento se presentó durante los aforos tanto matutinos como vespertinos, ello causa un bloqueo en todas las entradas y detiene los vehículos de la corriente central.

Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del miércoles 21 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM

A continuación, se presenta una tabla que contiene un análisis y desarrollo de los datos recopilados durante el aforo vehicular en la rotonda de Guadalupe. En esta se aplica el factor de corrección correspondiente a los intervalos críticos del carril derecho e izquierdo, proveniente de la metodología del ingeniero Mario Durán, anteriormente descrito.

Tabla 42*Análisis de distribución del volumen vehicular, aforo de 21/6/2023, 6 AM - 8AM*

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE VEH. CARRIL IZQUIERDO	PORCENTAJE VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE PESADOS IZQUIERDO	PORCENTAJE PESADOS DERECHO	PORCENTAJE VEHICULAR	INTERVALO CARRIL IZQ. (s)	INTERVALO CARRIL DER. (s)
Eje 8	956	984	49,28%	50,72%	6,49%	9,86%	27,43%	3,58	3,01
Eje 11	287	849	25,26%	74,74%	12,89%	2,36%	16,06%	3,63	2,38
Eje 22	1135	1138	49,93%	50,07%	21,23%	25,40%	32,14%	4,01	3,80
Eje 25	738	986	42,81%	57,19%	9,08%	19,57%	24,37%	3,37	2,95

Nota. Elaboración propia, 2023.

- ~ Eje 8: Segunda entrada con mayor porcentaje vehicular de este aforo; cuenta con una distribución uniforme en sus dos carriles. A pesar del elevado volumen vehicular, los intervalos críticos, una vez aplicado sus factores de corrección, son bajos con respecto a los de la metodología del ingeniero Mario Durán, lo cual demuestra un flujo vehicular constante.
- ~ Eje 11: Entrada con el menor porcentaje vehicular del aforo; la distribución se recarga en el carril derecho, este mantiene un bajo intervalo crítico, lo cual denota que los vehículos realizan maniobras de entrada con poca dificultad. No obstante, al ser la entrada contigua al eje 22, los conductores tardan en iniciar su maniobra de ingreso por el elevado volumen vehicular al que se enfrentan. El intervalo crítico del carril izquierdo también se mantiene bajo, ello demuestra la facilidad de los vehículos de integrarse a la corriente principal. Adicionalmente, encontramos el menor porcentaje de vehículos pesados del aforo.
- ~ Eje 22: El eje 22 corresponde a la entrada con mayor porcentaje vehicular de este aforo, ya que aporta casi el 50%, además de una elevada presencia de vehículos pesados. Estos factores, más la cercanía de entrada al eje 8, contribuyen a que se presenten unos elevados intervalos críticos, en donde los vehículos pesados son un factor determinante. El intervalo crítico del carril izquierdo solo difiere en un 2.38% de los intervalos de la metodología de Mario Durán.
- ~ Eje 25: La entrada presenta un elevado porcentaje vehicular, el cual se distribuye mayormente en el carril derecho, además, existe un porcentaje elevado de vehículos pesados. A pesar de que estos factores parecen recargar la entrada, los intervalos

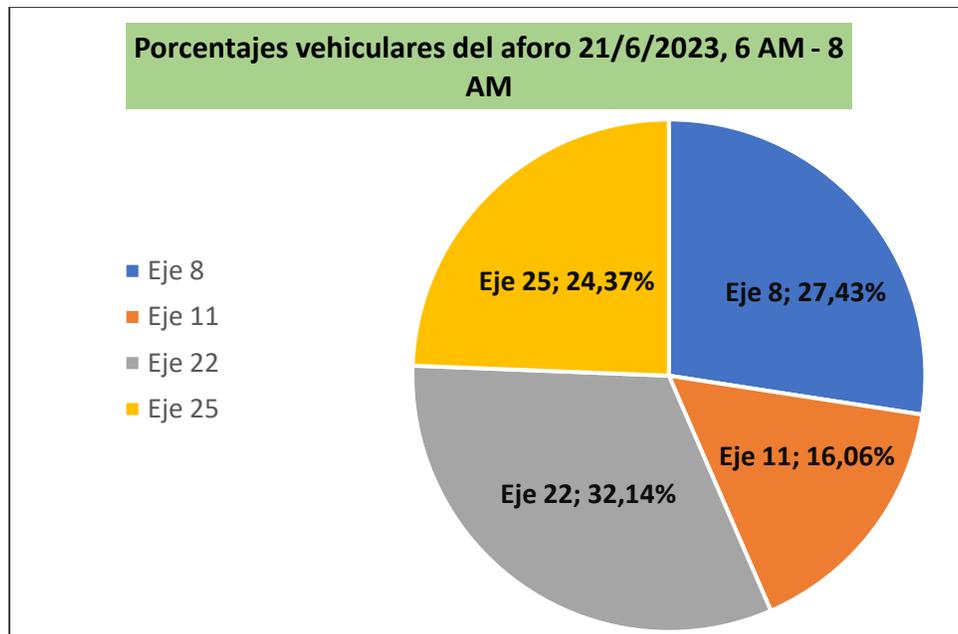
críticos se mantienen en valores bajos en comparación con los de la metodología de Mario Durán.

El eje 25 se ubica posterior al eje 11, puesto que este posee un volumen vehicular bajo los conductores que ingresan desde el eje 25 no se enfrentan a corrientes vehiculares contrarias tan elevadas.

Se confeccionaron dos gráficos que sintetizan la información recopilada durante el aforo, por un lado, el primero demuestra los porcentajes del volumen vehicular correspondiente a cada entrada de la rotonda. Por otro lado, el segundo contrasta los valores de intervalos críticos corregidos del carril izquierdo y derecho de cada entrada con los propuestos por la metodología del ingeniero Mario Durán.

Figura 14

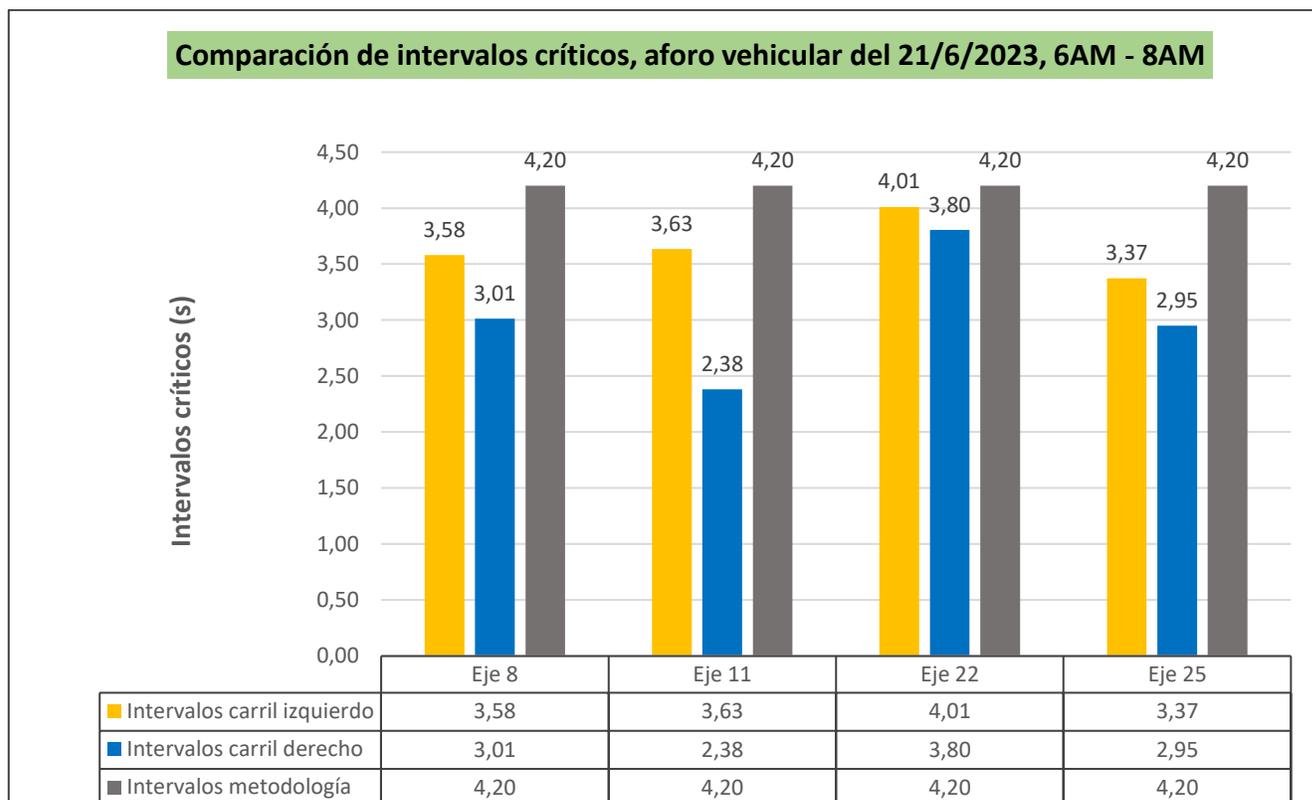
Porcentajes vehiculares, 21/6/2023, 6 AM - 8 AM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 15

Comparación de intervalos críticos, 21/6/2023, 6 AM - 8 AM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del miércoles 21 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM

A continuación, se presenta una tabla que contiene un análisis y desarrollo de los datos recopilados durante el aforo vehicular en la rotonda de Guadalupe. En esta se aplica el factor de corrección correspondiente a los intervalos críticos del carril derecho e izquierdo, anteriormente descrito, proveniente de la metodología del Ingeniero Mario Durán.

Tabla 43*Análisis de distribución del volumen vehicular, aforo de 21/6/2023, 4 PM - 6 PM*

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE VEH. CARRIL IZQUIERDO	PORCENTAJE VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE PESADOS IZQUIERDO	PORCENTAJE PESADOS DERECHO	PORCENTAJE VEHICULAR	INTERVALO CARRIL IZQ. (s)	INTERVALO CARRIL DER. (s)
Eje 8	611	845	41,96%	58,04%	4,75%	5,33%	21,95%	3,73	3,00
Eje 11	547	502	52,14%	47,86%	0,73%	1,79%	15,82%	3,41	2,38
Eje 22	945	933	50,32%	49,68%	14,60%	15,11%	28,32%	3,79	3,37
Eje 25	1059	1190	47,09%	52,91%	2,08%	13,45%	33,91%	3,27	2,91

Nota. Elaboración propia, 2023.

- ~ Eje 8: En contraposición a los datos recopilados durante el aforo matutino, esta entrada presenta un porcentaje vehicular bajo en comparación al resto, con distribuciones en sus carriles medianamente uniformes. Se perciben muy bajos porcentajes de vehículos pesados en ambos carriles, lo que da intervalos críticos de un valor lejano a los de la metodología de comparación.
Se resalta cómo puede variar el porcentaje vehicular de una misma entrada según el horario de las mediciones, aunque se mantiene una dinámica donde los ejes 8, 22 y 25 son los que presentan mayores porcentajes vehiculares y el eje 11 los menores.
- ~ Eje 11: Se presenta como la entrada con menor porcentaje vehicular y con unos porcentajes de vehículos pesados cercanos a cero. Los intervalos críticos de esta entrada son bajos, especialmente el del carril derecho.
Se identificó que, a pesar de la afectación ya mencionada debido a la cercanía al eje 22, en él se tiene mayor facilidad de tránsito, generalmente los conductores que lo utilizan evacuan la rotonda de inmediato (por la salida del eje 25), dicha maniobra les toma poco tiempo y la llevan a cabo con facilidad, a excepción de los casos en presencia de embotellamientos.
- ~ Eje 22: A diferencia de los resultados obtenidos en el aforo matutino referentes al eje 22, este no presentó el volumen vehicular más elevado de toda la rotonda, lo cual demuestra que no siempre se encuentra la misma realidad vehicular, ya que puede variar según los factores de horario o del día.

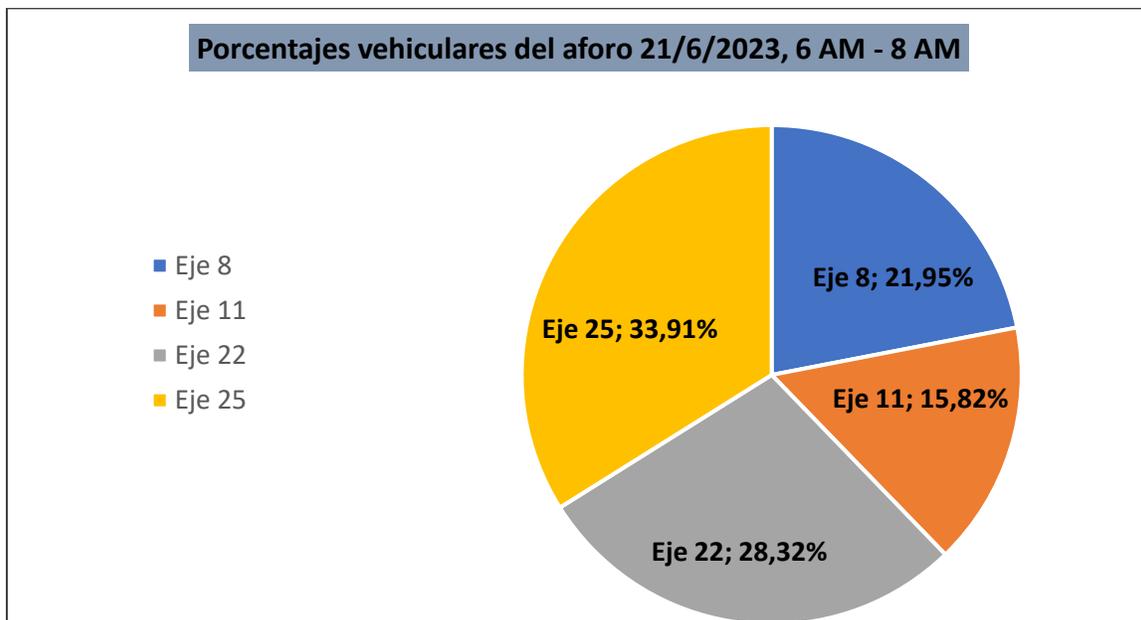
No obstante, en cuanto a los porcentajes de vehículos pesados, posee el más alto del aforo, cercanos al 15%.

- ~ Eje 25: Durante el aforo vespertino el eje 25 fue el que contó con el mayor volumen vehicular en sus carriles de entrada; posee distribución uniforme del volumen vehicular. Se destaca una baja presencia de vehículos pesados en el carril izquierdo y se identifica que en los carriles derechos del eje 25 y eje 11 los intervalos críticos son bajos, los vehículos que ingresan realizan maniobras muy concisas.

Se confeccionaron dos gráficos que sintetizan la información recopilada durante el aforo en el horario correspondiente, por un lado, el primero demuestra los porcentajes del volumen vehicular de cada entrada. Por otro lado, el segundo contrasta los valores de intervalos críticos corregidos del carril izquierdo y derecho de cada entrada con los propuestos por la metodología del ingeniero Mario Durán.

Figura 16

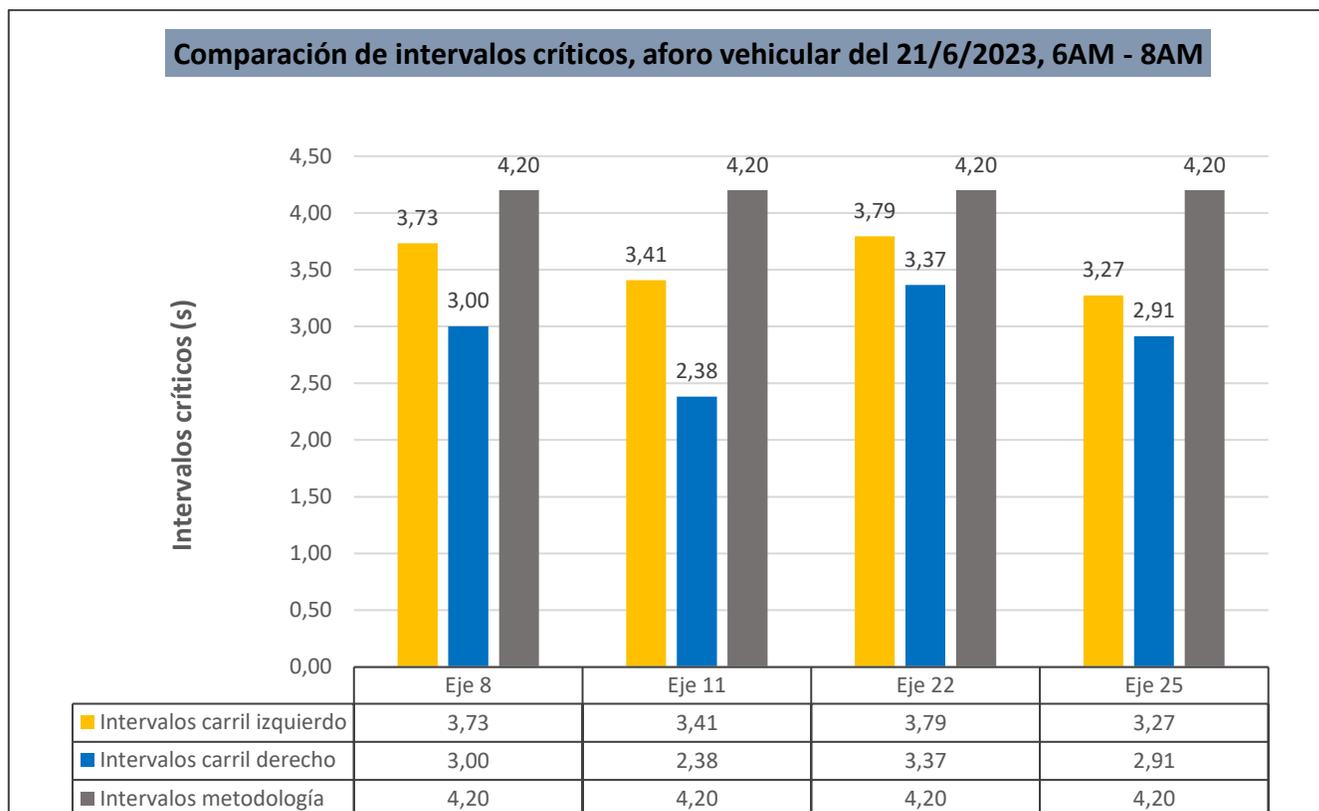
Porcentajes vehiculares, 21/6/2023, 4 PM - 6 PM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 17

Comparación de intervalos críticos, 21/6/2023, 4 PM - 6 PM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del jueves 22 de junio de 2023, 6AM a 8AM

A continuación, se presenta una tabla que contiene el análisis y desarrollo de los datos recopilados durante el aforo vehicular realizado en la rotonda de Guadalupe. En esta se aplica el factor de corrección correspondiente a los intervalos críticos del carril derecho e izquierdo, anteriormente descrito, proveniente de la metodología del Ingeniero Mario Durán.

Tabla 44

Análisis de distribución del volumen vehicular, aforo de 22/6/2023, 6 AM - 8 AM

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE VEH. CARRIL IZQUIERDO	PORCENTAJE VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE PESADOS IZQUIERDO	PORCENTAJE PESADOS DERECHO	PORCENTAJE VEHICULAR	INTERVALO CARRIL IZQ. (s)	INTERVALO CARRIL DER. (s)
Eje 8	825	984	45,61%	54,39%	7,52%	9,04%	28,96%	3,57	3,02
Eje 11	240	451	34,73%	65,27%	9,58%	4,43%	11,06%	3,40	2,37
Eje 22	1039	988	51,26%	48,74%	18,96%	18,42%	32,45%	3,74	3,52
Eje 25	721	998	41,94%	58,06%	9,99%	20,14%	27,52%	3,34	3,13

Nota. Elaboración propia, 2023.

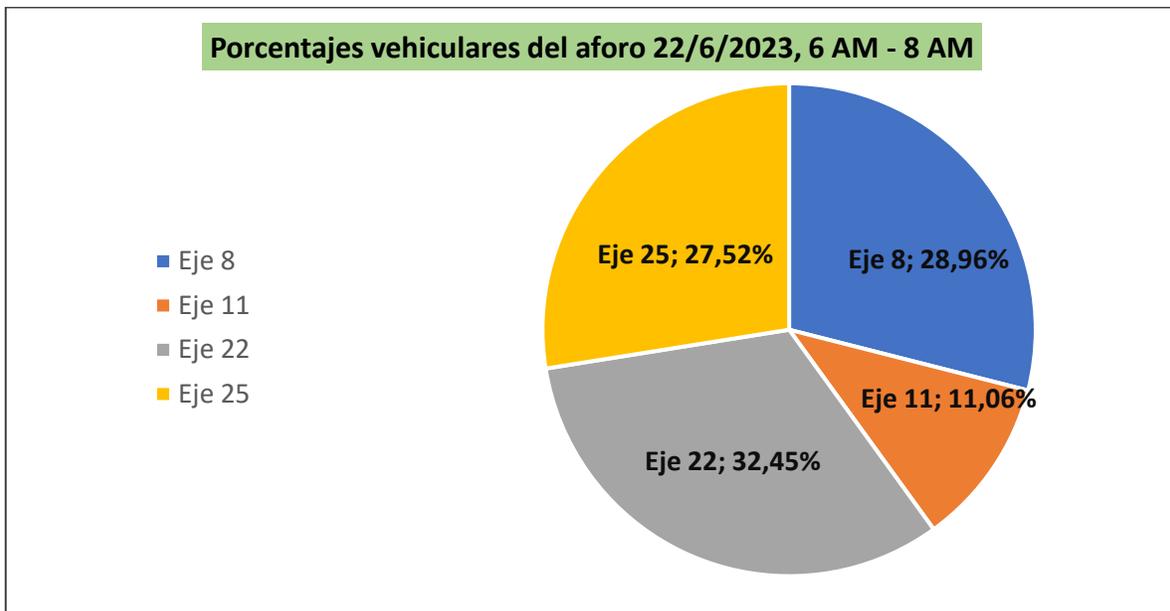
- ~ Eje 8: Elevado volumen vehicular durante los aforos; sin embargo, este fluye de manera constante y no suele presentar embotellamientos de no ser por influencia de otras entradas. Durante el aforo del jueves 22 de junio en horas de mayor demanda, la entrada fue la segunda con mayor porcentaje vehicular en sus carriles; se observan bajos porcentajes de vehículos pesados en comparación con otras entradas. Se encuentran intervalos críticos bajos con respecto a los de la metodología.
- ~ Eje 11: Nuevamente, el Eje 11 es el de menor porcentaje vehicular durante el aforo, en este caso las otras entradas cuentan con valores entre 25% y 30% mientras que él cuenta con un 11,06%. Adicional, el valor de los intervalos críticos es bajo en comparación a los intervalos según metodología. Se menciona que durante los aforos se identificó que una mayoría de los vehículos que circulan la rotonda no lo hacen a la velocidad establecida por la Ley de Tránsito (30 km/h), sino a velocidades mayores, lo que influye en las maniobras de entrada a la rotonda, por lo tanto, en los intervalos críticos de la entrada.
- ~ Eje 22: Entrada con mayor porcentaje vehicular de la rotonda, ya que cuenta con un 32,45% del volumen total del aforo. Se identifica, a su vez, el porcentaje de vehículos pesados más elevado, estos corresponden en gran medida a autobuses del transporte público. Se destaca el elevado intervalo crítico del carril derecho y se considera que ello se debe al elevado volumen vehicular que provenía del eje 8, como se ha observado anteriormente.
- ~ Eje 25: Se presenta una distribución del porcentaje vehicular recargada en el carril derecho. Adicionalmente, se encontró una gran diferencia en el porcentaje de

vehículos pesados con respecto al carril izquierdo, de más de un 10%. Sin embargo, se observa que el carril derecho mantiene intervalos críticos bajos en comparación a la metodología. Como ya se ha mencionado, los vehículos ingresan a gran velocidad y sin mayor complicación debido al bajo volumen vehicular que proviene del eje adyacente (Eje 11).

Se confeccionaron dos gráficos que sintetizan la información recopilada durante el aforo, por un lado, el primero demuestra los porcentajes del volumen vehicular correspondiente a cada entrada de la rotonda. Por otro lado, el segundo contrasta los valores de intervalos críticos corregidos del carril izquierdo y derecho de cada entrada con los propuestos por la metodología del ingeniero Mario Durán.

Figura 18

Porcentajes vehiculares, 22/6/2023, 6 AM - 8 AM

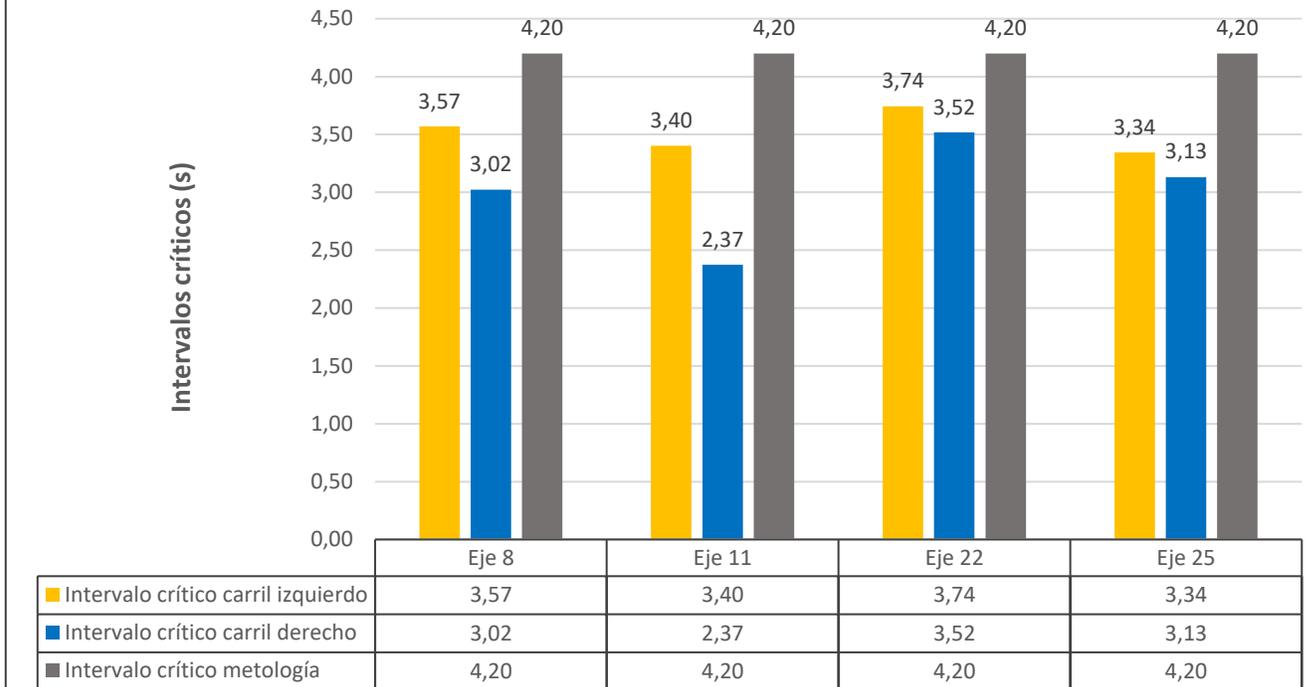


Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 19

Comparación de intervalos críticos, 22/6/2023, 6 AM - 8 AM

Comparación de intervalos críticos, aforo vehicular del 22/6/2023, 6 AM - 8 AM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del jueves 22 de junio de 2023, 4 PM a 6 PM

A continuación, se presenta una tabla de análisis y desarrollo de los datos recopilados durante el aforo vehicular realizado en la rotonda de Guadalupe. En esta se aplica el factor de corrección correspondiente a los intervalos críticos del carril derecho e izquierdo, anteriormente descrito, proveniente de la metodología del Ingeniero Mario Durán.

Tabla 45

Análisis de distribución del volumen vehicular, aforo de 22/6/2023, 4 PM - 6 PM

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE VEH. CARRIL IZQUIERDO	PORCENTAJE VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE PESADOS IZQUIERDO	PORCENTAJE PESADOS DERECHO	PORCENTAJE VEHICULAR	INTERVALO CARRIL IZQ. (s)	INTERVALO CARRIL DER. (s)
Eje 8	595	791	42,93%	57,07%	4,87%	5,56%	22,83%	3,58	3,10
Eje 11	405	364	52,67%	47,33%	2,22%	3,85%	12,67%	3,41	2,38
Eje 22	1023	964	51,48%	48,52%	16,42%	14,94%	32,73%	3,89	3,60
Eje 25	947	981	49,12%	50,88%	5,07%	17,74%	31,76%	3,34	2,95

Nota. Elaboración propia, 2023.

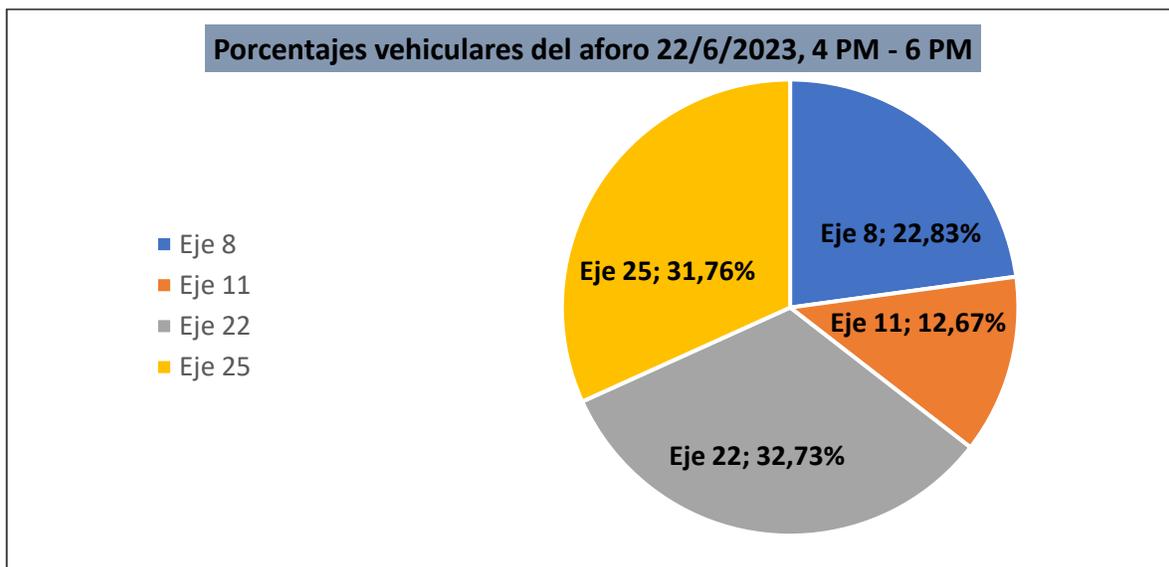
- ~ Eje 8: Se presentó un 22.83% del porcentaje vehicular, es decir, esta es la tercera entrada más concurrida del aforo. Se resaltan los bajos porcentajes de vehículos pesados de cada carril, cercanos al 5%, factor que beneficia a los intervalos críticos de la entrada.
En esta entrada, en similitud con el eje 22, el intervalo crítico del carril derecho e izquierdo no difieren tanto en sus valores, ya que son medianamente elevados en ambos debido a las características geométricas.
- ~ Eje 11: Corresponde a la entrada con menos porcentaje vehicular del aforo, fenómeno común. Se identifican bajos porcentajes de vehículos pesados, 22.2% y 3.85% para los carriles izquierdo y derecho respectivamente. Como se ha mencionado con anterioridad, en el eje 11 y eje 25 es común que se presente una diferencia de valores entre el intervalo crítico de carril derecho y del carril izquierdo, lo cual no siempre se da en los ejes 8 y 22. Los intervalos críticos de este aforo cumplen con la metodología y son menores a los propuestos por el Ing. Mario Durán.
- ~ Eje 22: Entrada con mayor porcentaje vehicular del aforo, 32.73%. Se identifican los porcentajes de vehículos pesados más elevados, especialmente durante la mañana. Se cuenta con intervalos críticos similares en ambos carriles de la entrada, aunque el lado derecho ligeramente menor al del izquierdo. Adicionalmente, se presenta un intervalo crítico para el carril izquierdo de 3.89 segundos, es decir, el más elevado del aforo; este se acerca a los valores de intervalo crítico de la metodología.
- ~ Eje 25: Segundo mayor porcentaje vehicular del aforo en sus carriles, solo por detrás del eje 22 en este caso. Se da un fenómeno curioso en la entrada, donde

el porcentaje de vehículos pesados del carril derecho es mucho mayor al del carril izquierdo, de 17.74% y 5.07% respectivamente. A pesar de la elevada presencia de vehículos pesados en el carril derecho, encontramos unos intervalos críticos bastante bajos, lo cual confirma que los vehículos que ingresan por este carril lo hacen de forma eficaz e ininterrumpida. El intervalo del carril izquierdo es muy similar al resto.

Se confeccionaron dos gráficos que sintetizan la información recopilada durante el aforo y su horario, por un lado, el primero demuestra los porcentajes del volumen vehicular correspondientes a cada entrada de la rotonda. Por otro lado, el segundo contrasta los valores de intervalos críticos corregidos del carril izquierdo y derecho de cada entrada con los propuestos por la metodología del ingeniero Mario Durán.

Figura 20

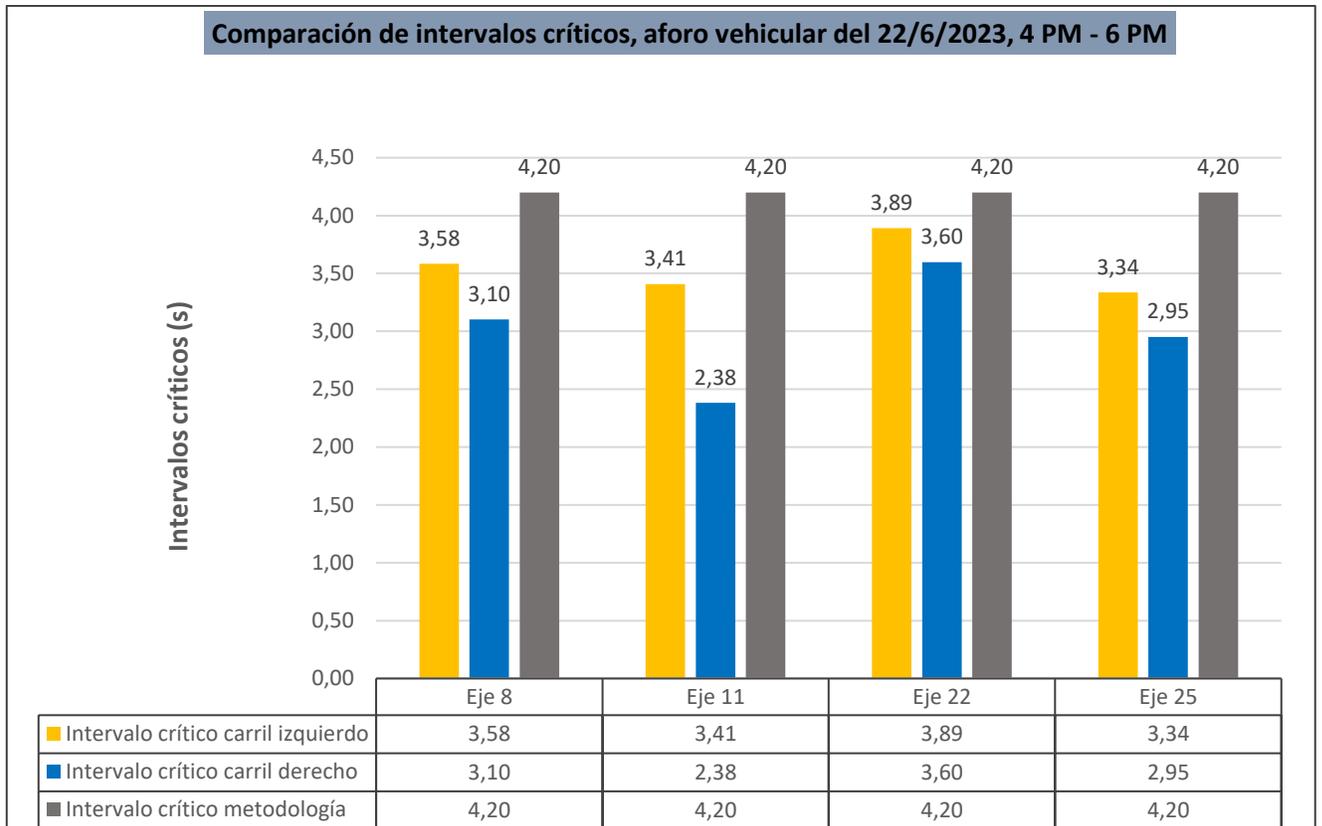
Porcentajes vehiculares, 22/6/2023, 4 PM - 6 PM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 21

Comparación de intervalos críticos, 22/6/2023, 4 PM - 6 PM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del jueves 23 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM

A continuación, se presenta una tabla de análisis y desarrollo de los datos recopilados durante el aforo vehicular realizado en la rotonda de Guadalupe. En esta se aplica el factor de corrección correspondiente a los intervalos críticos del carril derecho e izquierdo, anteriormente descrito, proveniente de la metodología del Ingeniero Mario Durán.

Tabla 46

Análisis de distribución del volumen vehicular, aforo de 23/6/2023, 6 AM – 8 AM

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE VEH. CARRIL IZQUIERDO	PORCENTAJE VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE PESADOS IZQUIERDO	PORCENTAJE PESADOS DERECHO	PORCENTAJE VEHICULAR	INTERVALO CARRIL IZQ. (s)	INTERVALO CARRIL DER. (s)
Eje 8	795	1126	41,38%	58,62%	4,40%	5,86%	28,85%	3,60	3,11
Eje 11	235	399	37,07%	62,93%	11,91%	4,51%	9,52%	3,63	2,69
Eje 22	1268	1404	47,46%	52,54%	16,80%	19,73%	40,13%	3,72	3,54
Eje 25	602	829	42,07%	57,93%	7,31%	22,80%	21,49%	3,20	3,25

Nota. Elaboración propia, 2023.

~ Eje 8: Durante este aforo, el eje 8 fue el segundo con mayor porcentaje vehicular de la rotonda, ya que contó con un 28.85% del total. Se presentó una distribución del volumen vehicular recargado en el carril derecho. Se registra un porcentaje de vehículos pesados bajo, cercano al 5%, además de intervalos críticos en el carril izquierdo de 3.60 segundos y en el derecho de 3.11 segundos; ello demuestra la tendencia de la entrada de mantener similitud en sus intervalos críticos.

Durante este aforo se dio una colisión vehicular debido a una maniobra realizada en el carril izquierdo de la corriente central, en una zona intermedia entre el eje 8 y 22. La colisión obstaculizó a los vehículos que ingresaban desde el eje 8 y provocó que estos tuvieran que rodearla con un cambio de carril en la corriente central. La eventualidad solo duró unos minutos, se adjunta una imagen del vehículo colisionado (se mantiene la privacidad y discreción de civiles implicados).

Figura 22

Colisión vehicular 23/06/2023, 7:12 AM



Nota. Elaboración propia, 2023.

- ~ Eje 11: Durante el aforo el eje 11 tuvo el porcentaje vehicular más bajo, la diferencia entre este y el porcentaje de las otras entradas fue muy elevado. Se identifica una distribución del volumen vehicular con tendencia a recargarse en el carril derecho. Los porcentajes de vehículos pesados son mayores en el carril izquierdo, de un 11.91% y de un 4.51% en el derecho. Se tienen intervalos críticos similares a los del resto de entradas del aforo en el carril izquierdo, y se mantiene la tendencia a valores menores a ellos en el carril derecho.
- ~ Eje 22: Entrada con el mayor porcentaje vehicular en sus carriles durante este aforo, aunque con una gran diferencia del 40.13% del total, lo cual demuestra que dicha entrada es crítica en el funcionamiento de la rotonda y aporta un volumen vehicular que con constancia provoca fallos. Se tienen intervalos

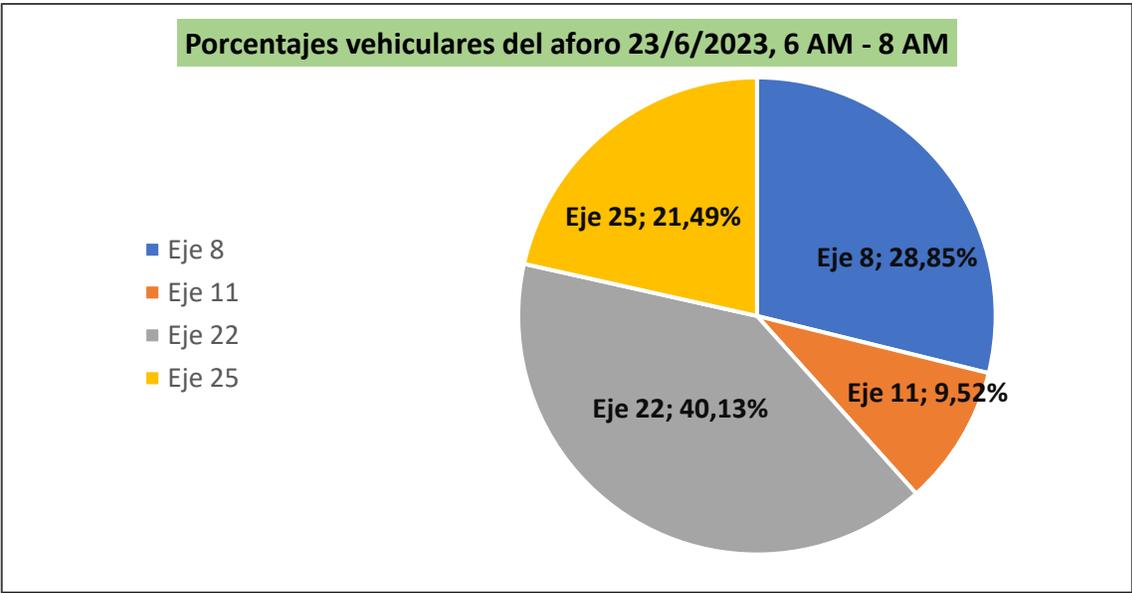
críticos de 3.72 y 3.54 segundos para los carriles izquierdo y derecho respectivamente, lo que permite confirmar la tendencia de no presentar diferencias elevadas en dicho valor; sin embargo, estos no sobrepasan a los intervalos críticos de la metodología.

- ~ Eje 25: Se presenta un porcentaje vehicular del 21.49% del total del aforo en esta entrada, el cual se distribuye de forma más elevada en el carril derecho. El porcentaje de vehículos pesados por carril de entrada es mayor en el carril derecho. Aunque se aplique el factor de corrección a los intervalos críticos, el valor de este no sobrepasa los de la metodología.

Se confeccionaron dos gráficos que sintetizan la información recopilada durante el aforo en su horario, por un lado, el primero demuestra los porcentajes del volumen vehicular correspondientes a cada entrada de la rotonda. Por otro lado, el segundo contrasta los valores de intervalos críticos corregidos del carril izquierdo y derecho de cada entrada con los propuestos por la metodología del ingeniero Mario Durán.

Figura 23

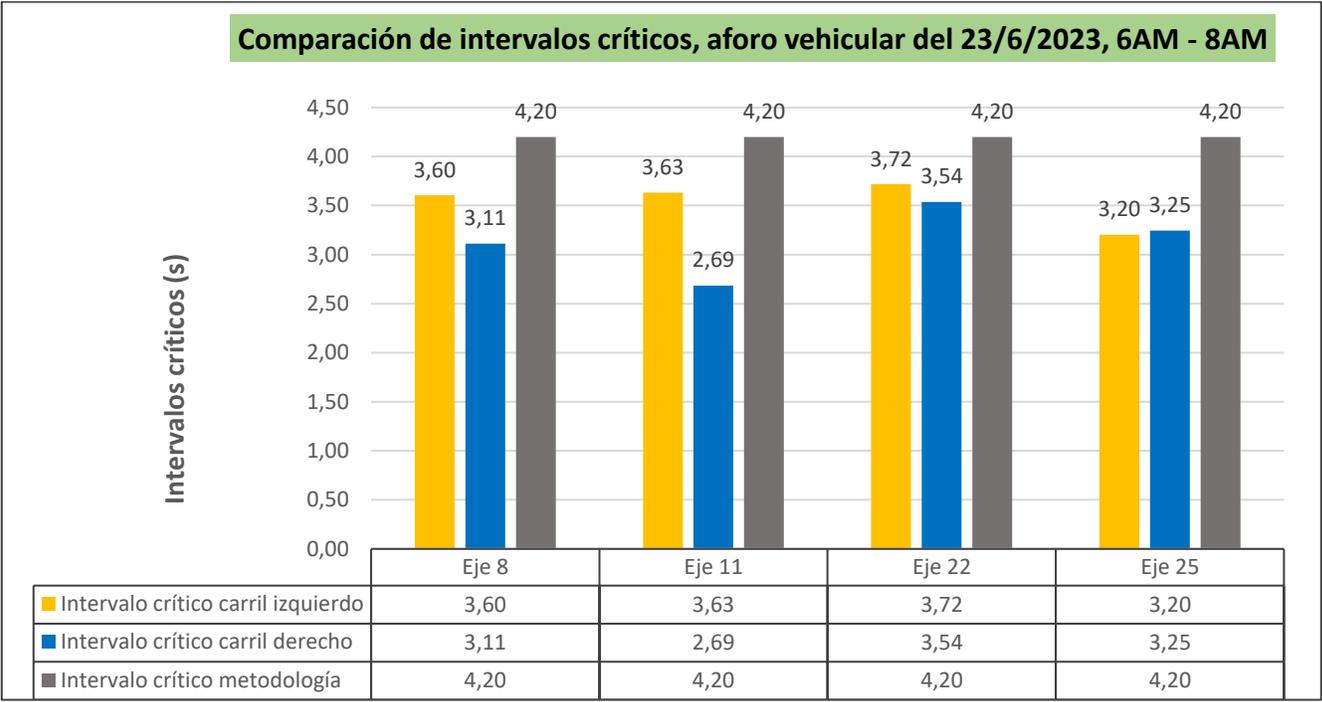
Porcentajes vehiculares, 23/6/2023, 6 AM - 8 AM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 24

Comparación de intervalos críticos, 23/6/2023, 6 AM - 8 AM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Análisis de Distribución del Volumen Vehicular por Carril de Entrada e Intervalos Críticos, Aforo del Jueves 23 de junio de 2023, 6 AM a 8 AM

A continuación, se presenta una tabla de análisis y desarrollo de los datos recopilados durante el aforo vehicular realizado en la rotonda de Guadalupe. En esta se aplica el factor de corrección correspondiente a los intervalos críticos del carril derecho e izquierdo, anteriormente descrito, proveniente de la metodología del Ingeniero Mario Durán.

Tabla 47

Análisis de distribución del volumen vehicular, aforo de 23/6/2023, 4 PM – 6 PM

ENTRADA	VEH. CARRIL IZQUIERDO	VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE VEH. CARRIL IZQUIERDO	PORCENTAJE VEH. CARRIL DERECHO	PORCENTAJE PESADOS IZQUIERDO	PORCENTAJE PESADOS DERECHO	PORCENTAJE VEHICULAR	INTERVALO CARRIL IZQ. (s)	INTERVALO CARRIL DER. (s)
Eje 8	611	845	41,96%	58,04%	4,75%	5,33%	23,21%	3,65	3,20
Eje 11	309	372	45,37%	54,63%	5,83%	3,76%	10,86%	3,37	2,41
Eje 22	917	1032	47,05%	52,95%	10,14%	11,72%	31,07%	3,92	3,41
Eje 25	1032	1154	47,21%	52,79%	3,10%	15,34%	34,85%	3,73	2,91

Nota. Elaboración propia, 2023.

~ Eje 8: Se presenta un 23.21% del porcentaje vehicular del aforo, además, se tiene bajos porcentajes de vehículos pesados en sus carriles, cercanos al 5% en ambos. La distribución vehicular es uniforme, aunque con cierta tendencia a recargarse en el carril derecho. Los intervalos críticos, una vez aplicados los factores de corrección, se mantienen en valores menores a los de la metodología.

Se mantiene la tendencia de los intervalos críticos de tener valores similares, lo cual se considera como un factor negativo, ya que implica que los vehículos del carril derecho no ingresan con la misma facilidad que en otras entradas a la rotonda, mas no es un factor crítico pues sus intervalos no son mayores a los de la metodología.

~ Eje 11: Esta en se mantiene como la menos concurrida de este aforo con un 10.86%, donde las demás rondan sus porcentajes vehiculares entre 20 y 30%. Se presentan porcentajes de vehículos pesados bajos, no mayores al 6%. El eje 11 mantiene la tendencia ya identificada de tener un intervalo del carril derecho menor al izquierdo, debido a la eficacia con la que los conductores

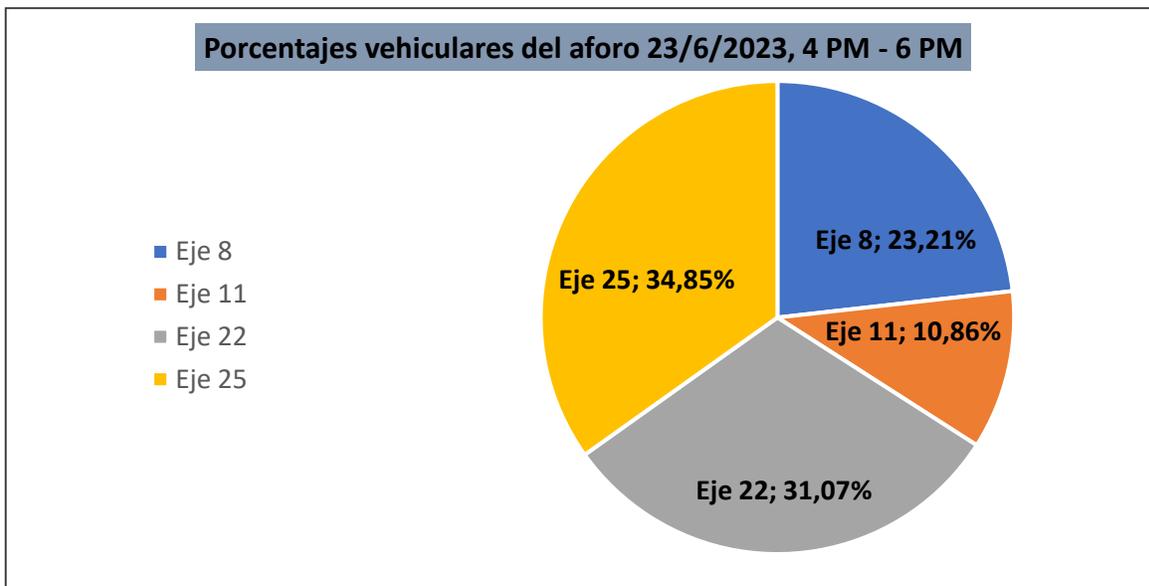
ingresan a la rotonda por el carril derecho. Los intervalos críticos calculados en el aforo cumplen los valores esperados, pues no sobrepasan los estipulados por la metodología.

- ~ Eje 22: Corresponde a la segunda entrada más concurrida del aforo, con un 31.07% del porcentaje vehicular. Los porcentajes de vehículos pesados son de 10.14% y 11.72% para carriles izquierdo y derecho respectivamente, estos son los más elevados del aforo, lo cual demuestra la baja presencia de vehículos pesados durante los horarios vespertinos. Los intervalos críticos de esta entrada fueron los más elevados, a pesar de no ser la más concurrida; se registra un intervalo crítico para el carril izquierdo de 3.92 segundos, ello es cercano a los intervalos propuestos por metodología, mas no es mayor que estos.
- ~ Eje 25: El eje 25 fue la entrada con un mayor porcentaje vehicular presente en sus carriles en dicho aforo, con un 34.85%. Se evidencia la presencia de un mayor porcentaje de vehículos pesados en el carril derecho, en comparación con el izquierdo, un 15.34% y un 3.10% respectivamente. En los intervalos críticos se tiene 3.73 segundos para el carril izquierdo y 2.91 segundos para el carril derecho, de lo cual observamos que el carril derecho sigue mostrando facilidad para ingresar a la rotonda y el carril izquierdo cuenta con un intervalo similar al resto.

Se confeccionaron dos gráficos que sintetizan la información recopilada durante el aforo en su horario, por un lado, el primero demuestra los porcentajes del volumen vehicular correspondientes a cada entrada de la rotonda. Por otro lado, el segundo contrasta los valores de intervalos críticos corregidos del carril izquierdo y derecho de cada entrada con los propuestos por la metodología del ingeniero Mario Durán.

Figura 25

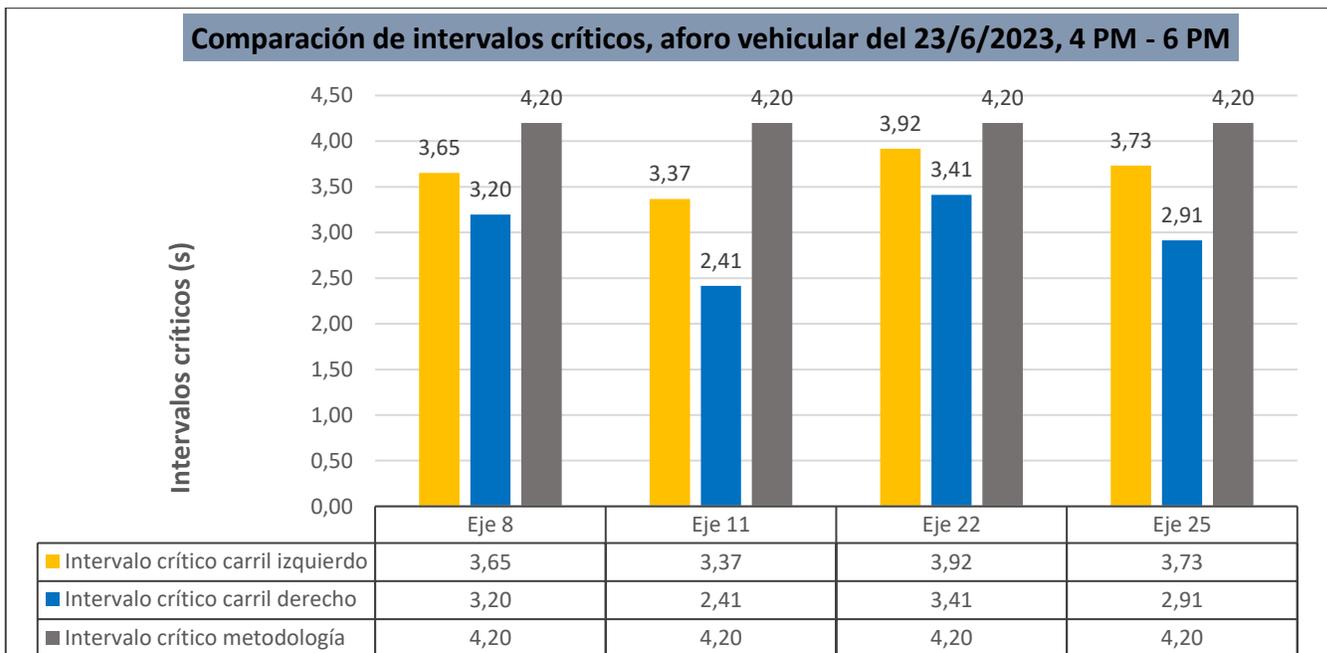
Porcentajes vehiculares, 23/6/2023, 4 PM - 6 PM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 26

Comparación de intervalos críticos, 23/6/2023, 4 PM - 6 PM



Nota. Elaboración propia, 2023.

Análisis de los Intervalos Críticos de la Rotonda de Guadalupe Según los Datos de los Aforos Realizados el 21, 22 y 23 de junio

En la tabla a continuación encontramos un promedio de los intervalos críticos calculados en los aforos en la rotonda de Guadalupe durante el 21, 22 y 23 de junio en horarios matutinos y vespertinos. El promedio de los datos contempla los factores de corrección, según la metodología del ingeniero Mario Durán, correspondientes a cada carril de entrada, además, estos se aplican según el porcentaje de vehículos pesados durante los aforos. Se presenta, asimismo, los datos tabulados.

Tabla 48

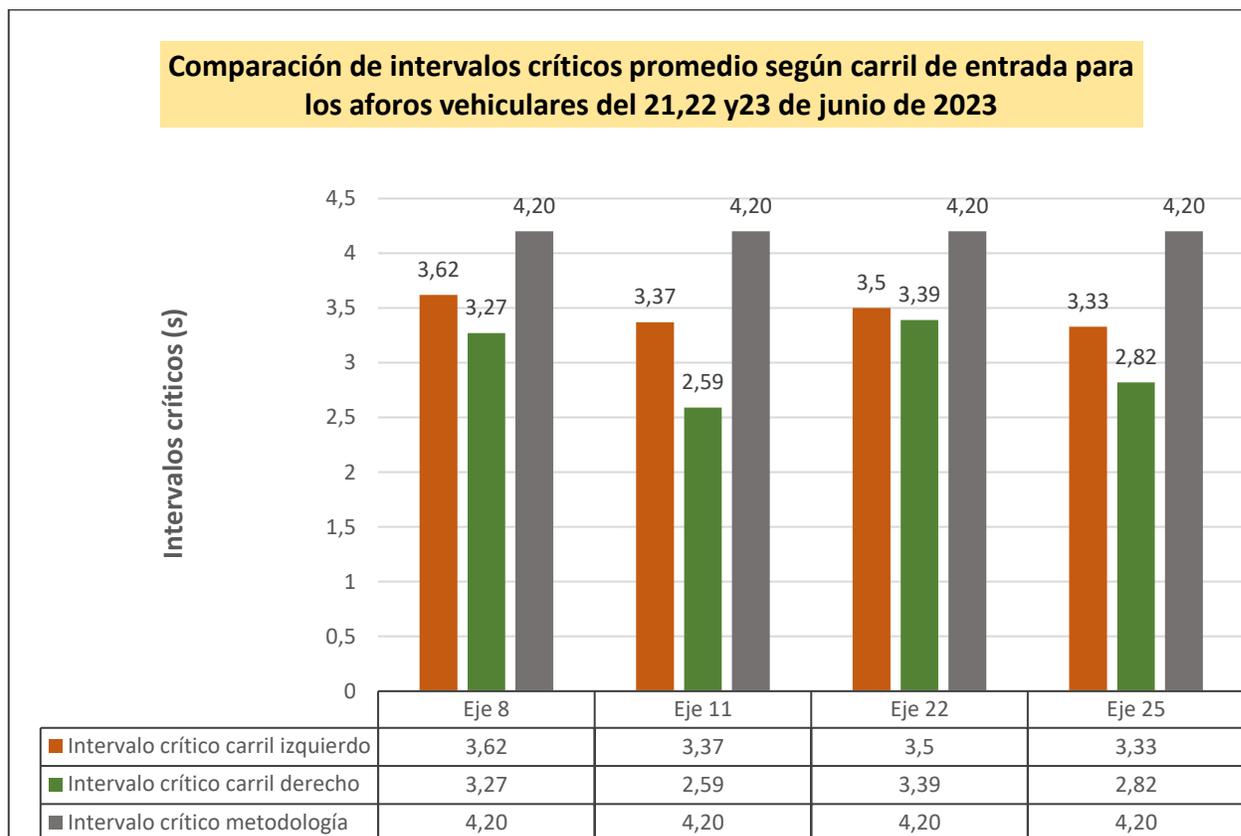
Promedio de intervalos críticos, 21,22,23 de junio

Promedio de intervalos críticos según carril de entrada para los aforos vehiculares realizados el 21, 22 y 23 de junio			
Entrada	Promedio de intervalos críticos carril izquierdo (s)	Promedio de intervalos críticos carril derecho (s)	Intervalo crítico según metodología ingeniero Mario Durán (s)
Eje 8	3,62	3,27	4,2
Eje 11	3,37	2,59	4,2
Eje 22	3,50	3,39	4,2
Eje 25	3,33	2,82	4,2

Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 27

Comparación de intervalos críticos promedio, aforos vehiculares del 21,22,23 de junio



Nota. Elaboración propia, 2023.

Al considerar los datos promedio para los intervalos críticos calculados, se forma un panorama de la realidad vial presente en la rotonda de Guadalupe en cuanto a la maniobrabilidad de los conductores en sus carriles. La distribución del volumen vehicular, determinado mediante los aforos vehiculares en sitio, demuestra cómo se comportan los vehículos en cada entrada a la rotonda y el impacto que esto conlleva a sus respectivos intervalos críticos.

Se demostró mediante los cálculos de intervalos críticos y aforos vehiculares que el eje 22 corresponde a la entrada en situación más crítica, puesto que es la más transitada y la que aporta el mayor volumen vehicular a la corriente central, incluso, genera fallos en el funcionamiento. El eje 22 tiene intervalos críticos en sus respectivos carriles que no exceden aquellos propuestos por la metodología del ingeniero Mario Durán, ello demuestra que en

condiciones generales la entrada mantiene un funcionamiento aceptable en el tránsito de la rotonda.

En el análisis de la distribución del volumen vehicular y el cálculo de intervalos críticos de la rotonda de Guadalupe, se identificaron factores externos a la geometría que afectan estos parámetros y generan fallas en el funcionamiento de la intersección; el principal causante es el comportamiento de los conductores y la forma en la que algunos transitan la rotonda. Se menciona la afectación generada en las salidas, donde algunos conductores realizan maniobras de cambio de carril en el momento de ingresar. Adicionalmente, se registró una tendencia generalizada por parte de los conductores de la corriente central de circular a velocidades que sobrepasan las estipuladas por la Ley de Tránsito, lo que afecta a los intervalos críticos y de seguimiento de los ramales de entrada.

Conclusiones

1. Se realizaron aforos vehiculares en sitio, según carril de entrada y tipo de vehículo que ingresa a la rotonda. Con esto se demostró el porcentaje de vehículos pesados presentes en cada ramal de entrada en el momento del aforo, el parámetro aportó al análisis de la intersección.
2. Se estimaron los valores de los intervalos críticos por carril de entrada correspondientes a cada ramal de la rotonda, los cuales fueron promediados y procesados mediante un factor de corrección que considera la presencia de vehículos pesados en el carril de entrada.
3. Se designó un aforador vehicular debidamente capacitado en cada ramal de entrada a la rotonda, este estimó el intervalo crítico para 10 vehículos en lapsos de 15 minutos (durante periodos de 2 horas). Se obtuvieron los intervalos críticos correspondientes a cada carril de entrada y se aplicó los procedimientos de la metodología del ingeniero Mario Durán.
4. Se concluyó que el factor geométrico de la rotonda que provoca mayor afectación en sus carriles de ingreso es la cercanía de un ramal de entrada con otro, donde el volumen vehicular de uno o afecta directamente al siguiente. A mayor volumen vehicular contrario proveniente del ramal de entrada anterior, mayor afectación.
5. Se elaboraron gráficas correspondientes a cada uno de los aforos vehiculares realizados en sitio, como tal, se demostraron las comparaciones de intervalos críticos por carril de entrada y porcentajes del volumen vehicular correspondientes a cada ramal. De esta manera se tiene una representación visual de la realidad vial de la rotonda de Guadalupe.

Recomendaciones

En primer lugar, se recomienda investigar la mejora del funcionamiento de la rotonda con métodos que solventen el tema de los embotellamientos de la corriente central; se sugiere tomar en consideración la señalización de la calle de salida del eje 25, pues se percibió como un factor que genera embotellamientos. En segundo lugar, implementar métodos de aforo vehicular mediante herramientas que aseguren datos con una mayor precisión que aquella alcanzada por personal capacitado. En tercer lugar, investigar herramientas virtuales de imagen satelital que permitan realizar aforos vehiculares de forma remota.

Referencias Bibliográficas

- Acosta Salinas, I. P., & Pardo Fandiño, R. F. (2016). *Análisis de la influencia de la maniobra de trenzado sobre la capacidad y nivel de servicio en algunas rotondas en la ciudad de Bogotá DC* [Trabajo de Grado Presentado como Requisito para Optar al título de Ingeniero Civil]. Universidad de La Salle, Bogotá
- Alzamora, A. T. (2015). *Análisis y comparación de criterios de diseño geométrico las rotondas modernas*. Piura: Universidad de Piura.
- Beale Nelson, D. (2022). *Análisis del congestionamiento vehicular de la intersección de la ruta 32 con la ruta 36 y la calle 9* [Trabajo final de graduación para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil]. *Universidad Latina de Costa Rica*
- Bolaños Rodríguez, J. D. (2019). *Validación de la Metodología HCM Respecto a la Realidad Vial Urbana del Cuadrante Central de Grecia, Alajuela*. [Trabajo final de graduación para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil]. Universidad Latina de Costa Rica
- Cal, R., & Cárdenas, J. (2018). *Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones*. Alpha Editorial.
- Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas y Transp. (1998). *Manual del conductor*. Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Curso teórico y resumen manual del conductor 2023 (2020). *Manual del conductor COSEVI 2022 capítulo 7 rotondas / resumen manual del conductor 2023*. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=oPX-Z7xBhVo&ab_channel=CURSOTE%C3%93RICOYRESUMENMANUALDELCONDUCTOR2023
- Dávila, C. (2019). *Análisis de distribución de volumen vehicular por carril de entrada a la rotonda de paso ancho y el cálculo de los intervalos críticos* [Tesis de licenciatura, Universidad Latina de Costa Rica]. Repositorio Institucional de la Universidad Latina de Costa Rica.

- de la Hoz, C., & Pozueta, J. (1995). *Recomendaciones para el diseño de glorietas en carreteras suburbanas*. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras.
- Depiante, V., & Galarraga, J. J. (2015). Calibración del modelo de capacidad de rotondas del HCM2010 a condiciones locales: caso Córdoba, Argentina. *Transportes*, 23(1), 95-103.
- Durán Ortiz, Mario R. (1990). *Desarrollo del Método para Estimar la Capacidad y Demoras en las Intersecciones tipo Rotonda de Costa Rica*. Popayán, Colombia.
- Flores Castellano, G. J. (2013). *Capacidad de rotondas: calibración del modelo del HCM2010 a condiciones locales* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales].
- Garber, N., & Hoel, L. (2005). *Ingeniería de Tráfico y Carreteras*. Mexico: Thomson Editores.
- Gómez, M. J. (2019). *Validación de la metodología del manual HCM 2010 para el análisis de capacidad de dos intersecciones, controladas por señales de alto y ceda, en San Antonio del Tejar de Alajuela* [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad Latina.
- Guaricela, H. E. (05 de Setiembre de 2017). *Evaluación de la capacidad en rotondas, en función de la optimización de su diseño geométrico basado en un aumento de la seguridad. Caso de estudio Cuenca. Leiria, Brasil* [Tesis de Maestría realizada bajo la orientación de él Doctor João Pedro Cruz da Silva, Profesor de la Escuela Superior de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria y la codirección del Magíster Jaime Guzmán Crespo, Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca]. Instituto Politécnico de Leiria.
- Highway Capacity Manual. (2010). *HCM 2010*. Washington: Transportation Research Board
- Homo Academicus. (2020). *Paradigmas de la investigación* (Parte 1). YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=IERl1phdFfk&t=95s&ab_channel=HomoAcademicus

- Julián, R. J., Alejandro, D. N. G., & Matías, O. E. El señalamiento luminoso según el anexo L de la Ley Nacional de Tránsito 24.449, inconsistencias en su aplicación en la Argentina y consecuencias sobre la seguridad vial índice del contenido del trabajo.
- Kennedy, J. (2007). *International Comparison of roundabout design guidelines*. Highways Agency. Estados Unidos.
- Maps, G. (17 de febrero de 2023). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps: <https://www.google.com/maps/@9.9430371,-84.0602476,286m/data=!3m1!1e3>
- Chávez Castro, P. A. (2022). *Estandarización de diseño geométrico a través del análisis de estándares de otros países de Sudamérica para actualizar el Manual de Carreteras- Diseño Geométrico* [Tesis para Obtener el Título Profesional de: Ingeniero Civil]. Universidad César Vallejo.
- Saavedra Torres, F. D., & Urrelo Rios, M. (2021). *Diseño geométrico de una rotonda en jirón vía de evitamiento cuadra 26, para mejorar la circulación de vehículos, Banda de Shilcayo 2021*. Savastano, O. (04 de octubre de 2011). Rotondas – Distribuidores. [Archivo PDF]. <https://docplayer.es/69687245-Unidad-7-rotondas-distribuidores-parte-2.html>
- Transportation Research Board. (2010). *High Capacity Manual 2010*. TRB.
- Yépez Sánchez, A. R., & Chávez Suárez, K. J. *Obtención de parámetros de eficiencia empleando los modelos empíricos de análisis alemán y británico. El caso de la rotonda Independencia en Magdalena, Lima* [Tesis para Obtener el Título Profesional de: Ingeniero Civil]. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Anexos

Anexo 1

Ramal de entrada, eje 8.



Anexo 2.

Ramal de entrada, eje 11.



Anexo 3.

Ramal de entrada, eje 22.



Anexo 4.
Eje 25.



Anexo 5.

Presencia de vehículos pesados en corriente central.



Anexo 6.

Embotellamiento, afectación de la salida del eje 25, 23 de junio de 2023, 6:35 AM.



Anexo 7.

Aforador vehicular asignado a eje 22.



Anexo 8.

Aforador vehicular asignado a eje 8.



Anexo 9.

Aforador vehicular asignado a eje 11.



Anexo 10.

Señal de tránsito informativa de la Rotonda de Guadalupe con direcciones.



Glosario

- Volumen vehicular: Factor que únicamente contabiliza los vehículos que circulan por un punto en específico durante un tiempo determinado sin involucrar ningún otro elemento (HCM, 2010).
- Rotonda: La intersección rotatoria a nivel rotonda o glorieta se distingue debido a que los flujos vehiculares que acceden por sus ramas circulan dentro de una calzada circulatoria o anillo vial, alrededor de una isla central, con velocidades relativamente bajas y un tránsito con circulación continua (MTC, 2018).
- Intervalo Crítico: Intervalo de tiempo que transcurre desde que un vehículo se ubica en la entrada de un ramal hasta que se integra a un carril del anillo interior, el cual tiene que ser medido y depende de factores como el tipo de maniobra que se va a realizar, las condiciones geométricas de la rotonda y el comportamiento de los conductores presentes en la intersección (Durán, 1990).
- Intervalo de seguimiento: Intervalo de tiempo requerido para que un vehículo en la entrada de un ramal siga a otro que está ingresando a la rotonda, el cual también tiene que medirse en sitio (Durán, 1990).
- Demora: Tiempo transcurrido desde que un vehículo llega al final de una cola hasta que avanza a su inicio, puede ser afectado por condiciones de la intersección y se determina por mediciones de tiempo (Durán, 1990).
- Longitud de cola: Factor demostrado por el número de vehículos atrapados en una fila de embotellamiento para ingresar a la intersección; se toman intervalos de tiempo para determinar cuándo se formó la longitud de cola más extensa (Durán, 1990).
- Capacidad: Se define como el número máximo de vehículos por unidad de tiempo que pueden pasar por una sección de la vía bajo las condiciones prevalecientes del tránsito. Normalmente, se expresa como un volumen horario, cuyo valor no debe sobrepasarse a no ser que las condiciones prevalecientes cambien (MTC, 2018).

- Vehículos de diseño: Vehículos seleccionados con peso representativo, dimensiones y características de operación, utilizados para establecer los criterios de los proyectos de las carreteras (MTC, 2018).
- Congestionamiento: Períodos de máxima demanda vial, el movimiento vehicular se va tornando deficiente con pérdidas de velocidad, lo que hace que el sistema tienda a saturarse (Cal y Cárdenas, 2018).