



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**Optimización de niveles de servicio y capacidad de la  
intersección tipo rotonda de la Av. Solano y Av. Remigio  
Crespo mediante la implementación de una turbo rotonda**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES**

**AUTORES:**

**CAMILA ESTEFANÍA ESPINOZA DAQUILEMA**

**CARLOS RAMIRO MOLINA ABAD**

**DIRECTOR:**

**ING. PABLO ANDRÉS CARVALLO CORRAL**

**Cuenca – Ecuador 2021**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación está dedicado a mis padres, mis hermanos, mis tías y a todas las personas que me han apoyado a culminar mis estudios, crecer como persona y ayudarme cuando más lo necesitaba. No existen suficientes palabras para expresar mi agradecimiento; por todo esto y más este trabajo está dedicado a ustedes. (Camila Estefanía Espinoza Daquilema)

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación está dedicado a Dios, a la Virgen, a mi madre María Isabel y a mis abuelitos Ramiro y Azucena, por su amor, trabajo y sacrificio todos estos años, que fue esencial para ayudarme a cumplir mis metas. (Carlos Ramiro Molina Abad)

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a nuestro tutor, Ing. Pablo Carvallo, que ha sido un excelente guía y profesor, ayudándonos y acompañándonos durante la realización de nuestro trabajo de titulación, y carrera universitaria. Gracias a su ayuda y apoyo hemos conseguido culminar este trabajo. (Camila Estefanía Espinoza Daquilema)

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a Dios por guiarme en este largo camino y darme fortaleza en los momentos de dificultad. A mi madre María Isabel y a mis abuelitos Ramiro y Azucena por siempre ayudarme a cumplir mis sueños, por confiar y creer en mí, por apoyarme y guiarme en cada paso de mi vida. Al Ing. Pablo Carvallo tutor de nuestro proyecto de graduación, quien con su apoyo y conocimiento nos supo guiar para culminar nuestro trabajo. (Carlos Ramiro Molina Abad)

**OPTIMIZACIÓN DE NIVELES DE SERVICIO Y CAPACIDAD DE LA INTERSECCIÓN TIPO ROTONDA DE LA AV. SOLANO Y AV. REMIGIO CRESPO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA TURBO ROTONDA**

**RESUMEN**

La investigación presenta el análisis de una nueva alternativa para Cuenca, las turbo rotondas para mejorar la movilidad en las rotondas existentes. El objetivo principal de la investigación es analizar el nivel de servicio y capacidad de la rotonda mediante simulaciones con el software Aimsun, y luego, implementar una turbo rotonda optimizando las condiciones actuales. Para el levantamiento de información se utilizó una cámara que registraba los vehículos que entraban a la rotonda con el objetivo de obtener parámetros de tráfico, como la cantidad de vehículos y el destino de cada uno para un diseño a prefactibilidad. Luego se simula en Aimsun y se obtiene los siguientes resultados: la turbo rotonda reduce el tiempo de espera hasta en 10 segundos aproximadamente en el 75% de los accesos, aumenta la capacidad en un 6% para el año 2030 y reduce la cola promedio de vehículos en un 29% en 2030.

**Palabras clave:** rotonda, turbo rotonda, nivel de servicio, Aimsun, Cuenca.



---

**Camila Estefanía Espinoza Daquilema**

**Autora**



---

**Carlos Ramiro Molina Abad**

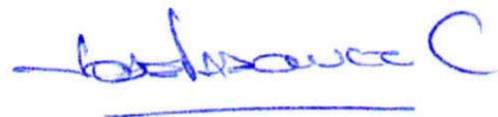
**Autor**



---

**Ing. Pablo Andrés Carvallo Corral**

**Director del trabajo de titulación**



---

**Ing. José Fernando Vásquez Calero**

**Director de carrera**

**OPTIMIZATION OF THE LEVEL OF SERVICE AND CAPACITY OF THE  
ROUNDBOUT INTERSECTION AT THE AV. SOLANO AND AV. REMIGIO  
CRESPO THROUGH THE IMPLEMENTATION OF A TURBO  
ROUNDBOUT**

**ABSTRACT**

The current investigation presents the analysis of a new alternative in Cuenca, which is called turbo roundabouts; to improve the transit of the current roundabouts. The main objective of this investigation was to analyze the level of service and capacity of the roundabout through simulations in the Aimsun program, and after, implement a turbo roundabout to optimize the actual conditions. To collect the data, a camera was used to film every vehicle that step in the roundabout to obtain traffic parameters, such as the number of vehicles and the destination of each one at a pre-feasibility level. After, we simulate in Aimsun and obtained these results: the turbo roundabout reduced approximately 10 seconds in the 75% of the accesses. It also increased the capacity in 6% for 2030 and reduced the average lane of vehicles 29% for 2030.

**Key words:** roundabout, turbo roundabout, level of service, Aimsun, Cuenca



**Camila Estefanía Espinoza Daquilema**

**Autora**



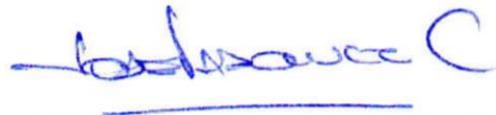
**Carlos Ramiro Molina Abad**

**Autor**



**Ing. Pablo Andrés Carvallo Corral**

**Director del trabajo de titulación**



**Ing. José Fernando Vásquez Calero**

**Director de carrera**

Translated by



**Camila Estefanía Espinoza Daquilema Espinoza & Carlos Ramiro Molina Abad**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	I
DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problemática .....	2
1.2. Justificación .....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. General.....	3
1.3.2. Específicos.....	3
2. Generalidades .....	4
2.1. Antecedentes .....	4
2.2. Planteamiento del problema.....	7
3. Marco teórico y metodología de desarrollo.....	8
3.1. Elementos de tránsito.....	8
3.1.1. Volumen de tráfico .....	8
3.2. Aforos vehiculares .....	9
3.2.1. Aforo Manual .....	9
3.2.2. Aforos automáticos.....	9
3.3. Ajuste de volúmenes de tráfico.....	9
3.3.1. Factor de ajuste horario (Fh) .....	10
3.3.2. Factor de ajuste diario.....	11

3.3.3.	Factor de ajuste semanal.....	11
3.3.4.	Factor de ajuste mensual.....	12
3.3.5.	Factor de hora pico .....	13
3.3.6.	Volumen horario de diseño (VHD) .....	14
3.4.	Rotonda convencional.....	14
3.4.1.	Criterios generales .....	15
3.4.2.	Criterios geométricos.....	16
3.4.3.	Criterios operacionales .....	18
3.4.4.	Nivel de servicio.....	19
3.4.5.	Capacidad .....	20
3.5.	Turbo rotonda.....	21
3.5.1.	Criterios generales .....	22
3.5.2.	Criterios geométricos.....	23
3.5.3.	Criterios operacionales .....	26
3.5.4.	Nivel de servicio.....	27
3.5.5.	Capacidad .....	27
3.6.	Metodología de desarrollo .....	29
3.6.1.	Conteo volumétrico .....	30
3.6.2.	Análisis de las matrices origen-destino .....	31
3.6.3.	Tráfico futuro.....	31
3.7.	Calibración y validación de modelos.....	33
4.	Estudio de caso: rotonda del estadio (Av. Fray Vicente Solano y Av. Remigio Crespo).....	35
4.1.	Área de estudio .....	35
4.1.1.	Ubicación.....	35
4.2.	Clasificación vial .....	36

4.3.	Descripción de la geometría actual .....	36
4.3.1.	Conteo automático .....	36
4.3.2.	Conteo volumétrico .....	37
4.3.3.	Matrices origen-destino .....	39
4.3.4.	Tráfico futuro.....	40
4.3.5.	Calibración y modelación.....	41
4.3.6.	Descripción de la geometría propuesta.....	42
4.3.7.	Verificación de trayectorias y maniobras .....	43
5.	Análisis de resultados .....	45
5.1.	Resultados de la modelación del escenario actual .....	45
5.2.	Resultado de la modelación: escenario propuesto .....	46
5.3.	Resultado de la modelación: escenario de la rotonda futuro .....	47
5.4.	Resultado de la modelación: escenario de la turbo rotonda futuro.....	48
5.5.	Discusión.....	49
6.	Educación vial .....	54
6.1.	Alternativas de señalización .....	54
6.1.1.	Señalización Horizontal.....	54
6.1.2.	Señalización Vertical.....	56
6.2.	Plan de concientización para el manejo de la propuesta.....	56
7.	Conclusiones.....	58
8.	Recomendaciones .....	59
9.	Bibliografía.....	60
10.	Anexos.....	62

## Índice de figuras

Figura 2.1: <i>Turbo rotonda Rotterdam (Holanda)</i> .....	4
Figura 2.2: <i>Turbo rotonda Oviedo (España)</i> .....	5
Figura 2.3: <i>Turbo rotonda Bogotá (Colombia)</i> .....	6
Figura 3.1: <i>Traslapo de trayectorias vehiculares</i> .....	18
Figura 3.2: <i>Tramo de una rotonda</i> .....	20
Figura 3.3: <i>Esquema de una turbo rotonda</i> .....	22
Figura 3.4: <i>Diseños de turbo rotondas: a. Óvalo; b. Rodilla; c. Espiral; d. Rotor.</i> 23	
Figura 3.5: <i>Tipos y capacidades de turbo rotondas</i> .....	24
Figura 3.6: <i>Geometría general de una turbo rotonda</i> .....	25
Figura 3.7: <i>Cámara instalada en la intersección</i> .....	29
Figura 3.8: <i>Video obtenido de la cámara instalada</i> .....	31
Figura 4.1: <i>Ramales de la rotonda</i> .....	35
Figura 4.2: <i>Geometría actual</i> .....	36
Figura 4.3: <i>Variación diaria del tráfico que ingresa a la rotonda</i> .....	37
Figura 4.4: <i>Variación horaria del tráfico que ingresa a la rotonda</i> .....	38
Figura 4.5: <i>Geometría propuesta de la turbo rotonda básica</i> .....	42
Figura 4.6: <i>Movimiento de vehículos dentro de la turbo rotonda</i> .....	43
Figura 4.7: <i>Maniobras del bus dentro de la turbo rotonda</i> .....	44
Figura 5.1: <i>Niveles de servicio escenario actual</i> .....	45
Figura 5.2: <i>Niveles de servicio escenario propuesto actualidad</i> .....	46
Figura 5.3: <i>Niveles de servicio rotonda 2030</i> .....	48
Figura 5.4: <i>Niveles de servicio turbo rotonda 2030</i> .....	49
Figura 5.5: <i>Flujo del viario actual (veh) año 2021</i> .....	50
Figura 5.6: <i>Volumen de vehículos (veh) año 2030</i> .....	50

Figura 5.7: <i>Tiempo de demoras (seg) año 2021</i> .....	51
Figura 5.8: <i>Tiempo de demoras (seg) año 2030</i> .....	51
Figura 5.9: <i>Longitud de cola promedio (veh) año 2021</i> .....	52
Figura 5.10: <i>Longitud de cola promedio (veh) año 2030</i> .....	53
Figura 6.1: <i>Acotación de señalización horizontal</i> .....	54
Figura 6.2: <i>Acotación de señalización horizontal para turbo rotondas.</i> .....	55
Figura 6.3: <i>Ensamblaje de señales aéreas con asignación de carril</i> .....	56
Figura 10.1: <i>Constantes a, b de la tasa de motorización</i> .....	66

## Índice de ecuaciones

Ecuación 3.1: <i>Flujo vehicular</i> .....	8
Ecuación 3.2: <i>Cálculo del TPDA</i> .....	10
Ecuación 3.3: <i>Factor horario</i> .....	10
Ecuación 3.4: <i>Factor diario</i> .....	11
Ecuación 3.5: <i>Factor de hora pico</i> .....	13
Ecuación 3.6: <i>Volumen horario de diseño</i> .....	14
Ecuación 3.7: <i>Capacidad vehicular</i> .....	21
Ecuación 3.8: <i>Capacidad vehicular con la oposición de dos carriles</i> .....	21
Ecuación 3.9: <i>Capacidad vehicular con dos carriles de entrada y conflicto</i> .....	21
Ecuación 3.10: <i>Tasa de motorización</i> .....	32
Ecuación 3.11: <i>Tráfico futuro</i> .....	32
Ecuación 3.12: <i>GEH</i> .....	33

## Índice de tablas

Tabla 3.1: <i>Factor semanal</i> .....	12
Tabla 3.2: <i>Cantidades promedio de consumo de combustible</i> .....	13
Tabla 3.3: <i>Criterios de nivel de servicio</i> .....	20
Tabla 3.4: <i>Medidas recomendadas para una turbo rotonda</i> .....	26
Tabla 3.5: <i>Capacidades para cada turbo rotonda</i> .....	28
Tabla 4.1: <i>Tasa de crecimiento vehicular</i> .....	40
Tabla 4.2: <i>TPDA</i> .....	41
Tabla 5.1: <i>Condiciones existentes</i> .....	45
Tabla 5.2: <i>Condiciones propuestas</i> .....	46
Tabla 5.3: <i>Condiciones rotonda año 2030</i> .....	47
Tabla 5.4: <i>Condiciones turbo rotonda año 2030</i> .....	48
Tabla 10.1: <i>Conteo automático</i> .....	62
Tabla 10.2: <i>Conteo volumétrico clasificado</i> .....	63
Tabla 10.3: <i>MÉTODO LOGIT</i> .....	64
Tabla 10.4: <i>Flujo vehicular por giro 2021</i> .....	67
Tabla 10.5: <i>Flujo vehicular por giro 2030</i> .....	67
Tabla 10.6: <i>GEH 2021</i> .....	68
Tabla 10.7: <i>GEH escenario propuesto 2021</i> .....	68

# 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, se ha evidenciado el crecimiento exponencial del parque automotor en todo el mundo, en especial en la urbe; ocasionando congestión vehicular y problemas de seguridad vehicular en las intersecciones. Por ende, las rotondas han sido utilizadas como alternativa para grandes intersecciones buscando solucionar estos problemas puesto que su geometría circular regula el tránsito, reduce la velocidad, evita giros bruscos y su funcionamiento en general es óptimo para resolver el congestionamiento.

Empero, esta alternativa tiene complicaciones operacionales y varios puntos de conflicto que afectan directamente a la seguridad de los usuarios; estos problemas son provocados por los mismos quienes ignoran la señalización horizontal, realizan cambios de carril, entre otros. Adicionalmente, cuando empieza a incrementarse el flujo vehicular, una de las soluciones más comunes es el aumento del número de carriles, que genera entrecruzamiento de las trayectorias de vehículos por cambios de carril y, por consecuencia, aumentan significativamente los puntos de conflicto.

En esta tesis de investigación se presenta una alternativa para solucionar los problemas de la rotonda convencional, esta solución se denomina turbo rotonda, que en esencia es un tipo de rotonda que tiene diferente geometría para optimizar su uso. Las turbo rotondas son una alternativa que surgió en los países bajos, Holanda específicamente en el año de 1996 (Silva et al., 2014a). Las turbo rotondas surgen como una innovación al sistema existente de la rotonda multicarril convencional con el objetivo de mejorar la seguridad de los usuarios (Pilko et al., 2019). Analizando los resultados obtenidos en Holanda, varios países de Europa, América del Sur, Canadá y Sudáfrica empezaron a optar por esta alternativa, adaptando sus necesidades a las diversas variantes de turbo rotondas (Elhassy et al., 2020a).

La implementación de este tipo de intersecciones permite que se solucionen los largos retrasos y trancones que se generan a raíz del congestionamiento vehicular debido a que su capacidad aumenta y, consecuentemente, las velocidades a las que pueden circular los usuarios (Orozco Reinaldo et al., 2016). Además, existe una disminución de puntos de conflicto a comparación de las rotondas convencionales. En la rotonda

convencional de dos carriles existe 24 puntos de conflicto presentes en su interior, mientras que en una turbo rotonda se desarrolla 14 puntos de conflicto, lo que disminuye significativamente la probabilidad de accidentes automovilísticos dentro de la intersección (Silva et al., 2014a). Las turbo rotondas están canalizadas en carriles diseñados para realizar las maniobras, los cuales están separados entre sí por divisores de carril e islas divisoras con el objetivo de evitar colisiones laterales. Los puntos de conflicto se reducen considerablemente, lo que provoca una disminución del 80% del riesgo de presentarse hechos fortuitos (Mauro & Branco, 2010).

### **1.1. Problemática**

El problema fundamental de la rotonda existente entre la Av. Fray Vicente Solano y Av. Remigio Crespo en la ciudad de Cuenca, Ecuador, es el uso inadecuado por parte de los usuarios al momento de ingresar a la misma y la geometría de la rotonda. Esto genera congestión vehicular que afecta directamente al nivel de servicio y provoca una falta de organización y descontrol en sus carriles, desarrollando molestias en los usuarios.

### **1.2. Justificación**

La falta de organización por parte de los usuarios, el congestión vehicular producido y el decaimiento de la calidad del nivel de servicio en esta rotonda han sido los principales factores para el estudio de nuevas alternativas que mejoren el uso y la calidad del nivel de servicio. Por este motivo, se plantea el análisis comparativo de otra alternativa para dar solución a todas las dificultades presentadas en el diseño geométrico actual; debido a numerosas ventajas que presenta este método, se cree que la turbo rotonda es una manera eficaz para solucionar estos problemas, que en otros lugares ha mejorado significativamente el nivel de servicio, control del congestión y el uso adecuado de los carriles para optimizar el viaje de los usuarios que circulan por esta rotonda.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. General**

- Analizar el nivel de servicio y capacidad de la rotonda considerando la implementación de una turbo rotonda para optimizar el flujo del tráfico de la misma.

### **1.3.2. Específicos**

- Identificar las ventajas y desventajas del uso de esta tipología de intersección.
- Determinar las características actuales de la intersección a analizar, representándolas mediante simulaciones dentro del software Aimsun.
- Analizar la alternativa de mejora a la intersección con la aplicación de turbo rotondas a partir de micro simulaciones.
- Diseñar a nivel de prefactibilidad la infraestructura vial a ser implementada.

## 2. Generalidades

### 2.1. Antecedentes

Las turbo rotondas nacieron como una alternativa a las rotondas existentes en Países Bajos en el año de 1996, este tipo de intersección surge con el objetivo de disminuir los problemas en la rotonda convencional y aumentar la seguridad de los usuarios. Desde entonces, se han realizado varios estudios para demostrar su comportamiento en comparación con las rotondas convencionales; demostrando así, que su uso genera una mayor capacidad dependiendo de las condiciones y el tráfico (Elhassy et al., 2020b).

Por ejemplo, el estudio realizado por Engelsman y Uken sugiere que con el cambio de una rotonda a una turbo rotonda puede incrementar entre el 25 al 35% la capacidad de la misma, con la condición que el volumen de vehículos no exceda entre 3000 a 3500 por hora. Además, otro estudio realizado en Eslovenia demuestra resultados exitosos con la implementación de la turbo rotonda que logró un aumento de capacidad por 38,000 a 42,000 vehículos por día sin generación de cuellos de botella. Adicionalmente, cabe destacar, el uso de esta alternativa en Latinoamérica, específicamente en Bogotá, Colombia; la capacidad de una intersección incrementó entre el 12 al 20% con la utilización de una turbo rotonda (Elhassy et al., 2020b). Por esta razón, en esta ciudad, el aumento de la capacidad brindó varias ventajas, como: buen nivel de servicio, disminución de accidentes graves, entre otros (BARBOSA et al., 2015).

Figura 2.1: *Turbo rotonda Rotterdam (Holanda)*



Fuente: Google Maps 2021

En Zaragoza, España se ha demostrado que los usuarios reducen su velocidad en aproximadamente 10 km/h en una turbo rotonda a diferencia de una rotonda convencional, debido a que cuentan con divisores que tienen carriles curvos lo cual genera un radio de curvatura menor, por lo tanto los usuarios deben disminuir su velocidad (Silva et al., 2014b).

Uno de los aportes más significativos de la turbo rotonda que se puede evidenciar es el aumento de la capacidad en una intersección, logrando descongestionar la entrada y reduciendo la demora al momento de salir de la misma. Mediante un análisis realizado se comprobó que la capacidad de una turbo rotonda es de un 25% hasta un 35% mayor que la de una rotonda convencional de dos carriles, en el caso de que se reduzca un carril al pasar de una rotonda convencional a una turbo rotonda solamente se puede aumentar un 15% la capacidad, debido a que el número de carriles es inferior (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

Otra de las ventajas de las turbo rotondas es la seguridad vial; puesto que en las rotondas se concentran grandes cantidades de vehículos en un mismo punto, los riesgos de accidentes aumentan mucho más que en cualquier otro punto. Dentro de la rotonda existen tres puntos de conflicto: por entrada, por entrecruzamiento y por salida. A diferencia de la turbo rotonda que existe solo conflictos por entrada, pues una vez incorporado al carril correcto, se imposibilita los conflictos por cambio de carril o a la salida de la intersección (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

Figura 2.2: *Turbo rotonda Oviedo (España)*



Fuente: Google Maps

Los tipos de turbo rotondas se clasifican de acuerdo a varios parámetros, como: número de ramales, capacidad, forma y el número de carriles con los que cuenta cada ramal. Para determinar la selección de uno u otro tipo a diseñar se deben analizar los siguientes factores: grado de saturación, demora promedio, requerimiento de espacio y costos. De igual manera, se cuenta con elementos de diseño los cuales son indispensables para su estudio: seguridad vial, trayectorias vehiculares, velocidad, entre otros (BARBOSA et al., 2015).

Figura 2.3: *Turbo rotonda Bogotá (Colombia)*



Fuente: Google Maps 2021

Todos los estudios mencionados tienen en común el proceso de transformación de una rotonda convencional a una turbo rotonda para mejorar la capacidad y/o disminuir los tiempos de demora. Cada estudio presenta una turbo rotonda con doble carril de entrada y salida con dos carriles de circulación dentro de la misma (Elhassy et al., 2020b). La presente investigación evalúa los resultados de la implementación de este tipo de turbo rotonda para descubrir los efectos que tuviera su ejecución en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

## **2.2. Planteamiento del problema**

En la intersección tipo rotonda de la Av. Solano y Av. Remigio Crespo en la ciudad de Cuenca, Ecuador; se busca implementar una turbo rotonda para optimizar su capacidad y nivel de servicio, puesto que, en la actualidad, es evidente el congestionamiento vehicular y, consecuentemente, las pérdidas de tiempo que se genera debido a que recoge gran parte del tráfico del centro de la ciudad. Se debe tener en cuenta que no solamente circulan vehículos livianos sino también buses de transporte urbano y camiones de carga para abastecer distintos puntos de la ciudad, provocando una desorganización en sus carriles al momento de ingresar y salir de la rotonda, ocasionando pérdidas de tiempo y malestar en los usuarios que transitan por esta zona.

Con la implementación de la turbo rotonda esperamos optimizar el nivel de servicio y la capacidad de la intersección, con el objetivo de evitar el embotellamiento y malestar que se genera en los usuarios al momento de transitar. Además de repotenciar los principios operacionales y de seguridad, la turbo rotonda permitirá realizar recomendaciones, observaciones y/o complementaciones para optimizar la rotonda actual, las comprobaciones de estas hipótesis se verificarán mediante el uso del software Aimsun.

### 3. Marco teórico y metodología de desarrollo

Para representar la variación que tiene el tráfico dentro de la rotonda y la alternativa propuesta se debe tomar en cuenta varios factores como los descritos a continuación.

#### 3.1. Elementos de tránsito

##### 3.1.1. Volumen de tráfico

El volumen de tránsito tiene como objetivo conocer los datos reales de los movimientos vehiculares dentro una determinada intersección, carretera o vía, estos resultados deben ser expresados en función del tiempo. Específicamente, el volumen de tránsito es el número de vehículos que transitan por un punto o sección dados durante un período de tiempo (Reyes & Cárdenas Grisales, 1994). En la Ecuación 3.1 se determina la manera en cómo calcular el flujo de vehículos por unidad de tiempo.

Ecuación 3.1: *Flujo vehicular*

$$Q = N/T$$

Fuente: (Reyes & Cárdenas Grisales, 1994)

Donde:

Q: representa los vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/unidad de tiempo).

N: es el número total de vehículos que pasan.

T: indicador de periodo determinado (unidades de tiempo).

Existen diferentes tipos de volúmenes en base a diferentes periodos de tiempo. Para el presente estudio se determina el tráfico promedio diario anual o TPDA, el cual consiste en representar el volumen de tránsito promedio por día de un determinado año.

## **3.2. Aforos vehiculares**

Para determinar el tráfico promedio diario anual es necesario levantar la información en campo, puesto que su sobreestimación podría efectuar un sobredimensionamiento en las condiciones del tráfico y el modelo no tendría eficacia. Para la obtención del volumen se cuenta con dos tipos de conteos o aforos vehiculares, los cuales son el manual y automático.

### **3.2.1. Aforo Manual**

A través de este método es posible registrar y clasificar los vehículos que atraviesan la zona de estudio, además de obtener una representación más ajustada a la realidad, los viajes registrados, distribución de vehículos, entre otros parámetros de valoración como (PMEP, 2015): la variación en el tiempo del tráfico clasificado en livianos, buses, camiones (dos ejes o diferentes), entre otros; además, registro de giros y destinos.

### **3.2.2. Aforos automáticos**

El aforo automático representa la mejor recolección y obtención de levantamiento en campo de la información vehicular, ya que permite obtener con mayor exactitud y precisión el volumen total de vehículos que transcurren por una determinada sección. Este tipo de aforo nos permite obtener los factores de ajuste de tráfico.

## **3.3. Ajuste de volúmenes de tráfico**

Los volúmenes de tránsito son cíclicos y repetitivos por lo que se puede obtener un patrón para obtener un flujo medio en diferente escala de tiempo como: horario, diario, semanal, mensual y anual (Reyes & Cárdenas Grisales, 1994). La unidad de medida utilizada para la intersección, vía o carretera es el volumen del tráfico promedio diario anual (TPDA), cual equivale a un estándar del volumen diario correspondiente a un año calendario. Para determinar este análisis lo ideal sería disponer de todos los datos de la estación durante varios períodos del año. Empero, esta situación no es práctica, factible ni económica por lo que se opta por contar permanentemente una semana durante 24 horas diarias, por lo menos 4 días que incluyan sábado y domingo; aquí se emplea los aforos automáticos y manuales para determinar los factores de expansión. Estos factores

permitirán transformar un volumen vehicular de un conteo inferior a 24 horas a un volumen de tránsito promedio diario anual (MTOPI, 2003).

El TPDA se determina a través de:

Ecuación 3.2: *Cálculo del TPDA*

$$TPDA = T_a * F_h * F_d * F_s * F_m$$

Fuente: (MTOPI, 2003)

Donde

$T_a$ : tráfico aforado

$F_h$ : factor de ajuste horario

$F_d$ : factor de ajuste diario

$F_s$ : factor de ajuste semanal

$F_m$ : factor de ajuste mensual

### 3.3.1. Factor de ajuste horario ( $F_h$ )

Este permite transformar el tránsito registrado durante horas a un volumen diario promedio. Para determinar este factor es necesario el conteo o aforo automático del día calendario correspondiente al conteo o aforo manual dividido para el total de horas del conteo automático que corresponden al conteo manual (MTOPI, 2003).

Ecuación 3.3: *Factor horario*

$$F_h = \frac{TD}{TH}$$

Fuente: (Reyes & Cárdenas Grisales, 1994)

Donde

$F_h$ : factor de ajuste horario

TD: tráfico diario

TH: tráfico horario aforado

### 3.3.2. Factor de ajuste diario

El factor de ajuste diario permite obtener el volumen de tráfico medio semanal. Se obtiene entre la relación del volumen promedio diario de vehículos del aforo automático y el volumen diario del aforo automático correspondiente al conteo manual (MTOPI, 2003).

Ecuación 3.4: *Factor diario*

$$F_d = \frac{TPDS}{TD}$$

Fuente: (Reyes & Cárdenas Grisales, 1994)

Donde

$F_d$ : factor de ajuste diario

TPDS: tráfico promedio diario semanal

TD: tráfico diario

### 3.3.3. Factor de ajuste semanal

Este transforma el volumen semanal promedio de tráfico en volumen mensual promedio. Se obtiene de manera ideal de la relación entre el promedio del tráfico semanal del mes del conteo automático y el tráfico de la semana correspondiente al conteo manual (MTOPI, 2003). No obstante, cuando no se posee información se utiliza las semanas del mes. En la Tabla 3.1, se observa el factor  $F_s$  correspondiente a cada mes, el cual se obtiene de la relación entre los días del mes y siete (días de una semana); este resultado se lo divide entre cuatro (semanas promedio del mes). Su resultado es el factor  $F_s$ .

Tabla 3.1: *Factor semanal*

Mes	días	semanas	Fs
Enero	31	4.43	1.108
Febrero	28	4	1
Marzo	31	4.43	1.108
Abril	30	4.29	1.073
Mayo	31	4.43	1.108
Junio	30	4.29	1.073
Julio	31	4.43	1.108
Agosto	31	4.43	1.108
Septiembre	30	4.29	1.073
Octubre	31	4.43	1.108
Noviembre	30	4.29	1.073
Diciembre	31	4.43	1.108

Fuente: Propia

### 3.3.4. Factor de ajuste mensual

Este factor transforma el volumen mensual promedio en volumen de tráfico promedio diario anual (TPDA). Se obtiene de la variación mensual del tránsito de todo el año o el promedio mensual de combustibles del año (Reyes & Cárdenas Grisales, 1994). Por factibilidad, es la relación entre el promedio mensual de consumo de combustibles y el consumo del mes correspondiente al conteo manual. En la Tabla 3.2 se analiza las cantidades de combustibles utilizados en el Ecuador y el promedio de los mismos durante el último año 2019.

Tabla 3.2: *Cantidades promedio de consumo de combustible*

	<b>GASOLINA SUPER</b>	<b>ECOPAÍS (extra con etanol)</b>	<b>DIESEL PREMIUM</b>	<b>TOTAL</b>
<b>ENE</b>	311901	1168990	680062	2160953
<b>FEB</b>	124861	1074004	610500	1809365
<b>MAR</b>	373552	1173390	659987	2206929
<b>ABR</b>	267569	1161466	620708	2049743
<b>MAY</b>	249407	1228395	708736	2186538
<b>JUN</b>	258424	1167718	677467	2103609
<b>JUL</b>	129422	1249655	724890	2103967
<b>AGO</b>	212480	1288171	647282	2147933
<b>SEP</b>	233639	1191666	700260	2125565
<b>OCT</b>	244933	1146705	424549	1816187
<b>NOV</b>	166250	1203960	694344	2064554
<b>DIC</b>	284138.76	1326712.4	704910.33	2315761
	<b>PROMEDIO</b>			2090925

Fuente: (EP PETROECUADOR, 2020)

### 3.3.5. Factor de hora pico

El factor de hora pico es usado para la planificación y análisis del viario, se lo aplica en todos los movimientos de los vehículos durante la hora pico con el objetivo de evitar crear escenarios desproporcionados en relación a la realidad durante el período analizado (HCM, 2010).

Ecuación 3.5: *Factor de hora pico*

$$PHF = \frac{n_{60}}{4 * n_{15}}$$

Fuente: (HCM, 2010)

Donde

PHF: factor de hora pico

$n_{60}$ : número de vehículos registrados durante la hora de máxima demanda

$n_{15}$ : número de vehículos registrados durante los 15 minutos más cargados de la hora pico

### 3.3.6. Volumen horario de diseño (VHD)

Para esto se escoge el volumen de la hora trigésima, para esto se ordena de forma decreciente la circulación de los volúmenes horarios durante todo el año, 8760 horas, y se escoge el volumen asociado a la hora 30. En caso de no existir esta información se puede obtener este dato por la formulación empírica asociado al índice medio diario anual (Silvera, 2013).

Ecuación 3.6: *Volumen horario de diseño*

$$VHD \text{ año}_i = (0.12 - 0.18) * IMDA \text{ año}_i$$

Fuente: (Silvera, 2013)

Este sería el volumen horario de diseño, pero para realizar la simulación, calibración y validación se usa el volumen horario de máxima demanda con la finalidad de comprobar si los datos ingresados son correctos.

## 3.4. Rotonda convencional

Una rotonda convencional es un tipo de intersección generalmente de forma circular, caracterizada por sus beneficios tanto en la entrada como en la circulación alrededor de una isla central, este tipo de intersección son usadas en todo el mundo desde el siglo XX. (HCM, 2010)

Una de las características principales para la circulación es que siempre la isla central debe estar al lado izquierdo del conductor, teniendo siempre preferencia los usuarios que circulan por la intersección con los usuarios que desean entrar en ella. En este tipo de intersecciones, los vehículos tienden a generar puntos de divergencia, convergencia y cruce, ocasionando un conjunto de puntos de conflicto, los cuales dependerán del número de tramos con el que cuenta la rotonda convencional (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

### **3.4.1. Criterios generales**

Las rotondas son de mayor eficacia en unas condiciones que en otras, como: entorno o medio en que se emplea, tipos de acceso, velocidad, visibilidad y percepción. A continuación, se explica la influencia de cada uno en la rotonda:

#### **- Medio en el que se emplea**

La rotonda es más adecuada para implementarse en un medio suburbano, en el que el flujo varía en el transcurso del día, así como sus velocidades y otros factores. A diferencia de la implementación en medios periféricos, donde la adecuación de la rotonda se basa en la experiencia, situadas en las afueras de las ciudades (Azcutia, 2011).

En un medio interurbano se debe tener mucha precaución, ya que se genera una interrupción en el flujo vehicular, lo que provoca aumento de recorridos e impiden la prioridad de una carretera sobre otra que convergen en este punto. A pesar de esto, se ha tenido éxito en la implementación de esta alternativa en carreteras rurales (Azcutia, 2011).

En un medio urbano, las rotondas sin semáforos y con prioridad para los usuarios que están dentro de esta son de gran utilidad y resultan muy eficientes, aunque si existe un tráfico peatonal se debe buscar una solución como una semaforización para que no se vea afectada la eficacia de la rotonda por esta condición (Azcutia, 2011).

#### **- Tipos de acceso**

La rotonda es el único tipo de alternativa posible cuando el número de tramos excede de cuatro, en vías donde las opciones de rebaso son limitadas, este tipo de intersección es de gran ayuda para mejorar las alineaciones rectas y de esta manera se puede solucionar los adelantamientos sin que los usuarios aumenten la velocidad excesivamente (Azcutia, 2011).

#### **- Velocidad**

Al circular por una rotonda se obliga a los usuarios a disminuir su velocidad, permitiendo marcar un cambio en la sección de la calzada, pasar de una zona urbana o suburbana a otra fuera de poblado y lograr cambios grandes de alineación lo cual no se pudiera efectuar ni siquiera en curvas con radios menores a los mínimos (Azcutia, 2011).

- **Visibilidad y percepción**

Gran parte de los accidentes en la rotonda son ocasionados porque el conductor al llegar a la entrada no se da cuenta de la señalización, por lo que contar con una buena señalética es crucial para evitar accidentes. Al momento de llegar a la entrada, el usuario debe contar con una buena visión del panorama de la intersección, por esto se recomienda que la mínima visibilidad debe alcanzar hasta la entrada anterior (Azcutia, 2011).

### **3.4.2. Criterios geométricos**

La rotonda convencional cuenta con los siguientes elementos para su diseño:

- **Diámetro de círculo inscrito**

El diámetro debe tener el tamaño suficiente para lograr acomodar el vehículo de diseño manteniendo una velocidad más baja que la de los vehículos más pequeños, para una rotonda de dos carriles el diámetro mínimo es de 46 m, teniendo como rango un diámetro de 49 a 55 m como punto de partida para el diseño de rotondas de dos carriles. El diámetro de círculo inscrito es la suma del diámetro de la isla central más el doble del ancho de la calzada circulatoria.

Para determinar el tamaño de este tipo de intersecciones es crucial lograr un equilibrio entre contar con deflexiones y proporcionar trayectorias vehiculares naturales. En el caso de rotondas de un carril se debe contar con un diámetro mayor para lograr los objetivos de diseño. Por lo general para el diseño del círculo inscrito en una rotonda multicarril, el diámetro varía de 46 m hasta 76 m (Jaramillo Gonzaga, 2017).

- **Isla Central**

La isla central es el área elevada no traspasable rodeada por la calzada circulatoria. El tamaño es crucial para determinar la desviación en la trayectoria directa del vehículo, el cual depende del diámetro del círculo suscrito y el ancho de la calzada circulatoria (Jaramillo Gonzaga, 2017).

- **Ancho de entrada**

El ancho de entrada para cualquier diseño depende del número de carriles y del vehículo de diseño, un ancho común para entradas de dos carriles va de 7,3 m hasta 9.1 m y en el caso de entradas de tres carriles va de 3.7 m hasta 4.6 m por carril (Jaramillo Gonzaga, 2017).

- **Ancho de calzada circulatoria**

El ancho de la calzada está determinado en base a los criterios de diseño por los vehículos que circularán a través de la rotonda los cuales dependen netamente de las condiciones específicas de tránsito de la zona. Normalmente los anchos de carril varían de 4.3 m a 4.9 m, dándonos un total de 8.6 m a 9.8 m para calzadas de dos carriles y en el caso de tres carriles varía de 12.9 m a 14.7 m. El ancho de calzada generalmente puede ser variable dependiendo del número de carriles y la exigencia para girar el vehículo de diseño, se recomienda tomar la anchura mínima para lograr satisfacer las necesidades de carriles requeridos en partes específicas de la rotonda (Jaramillo Gonzaga, 2017).

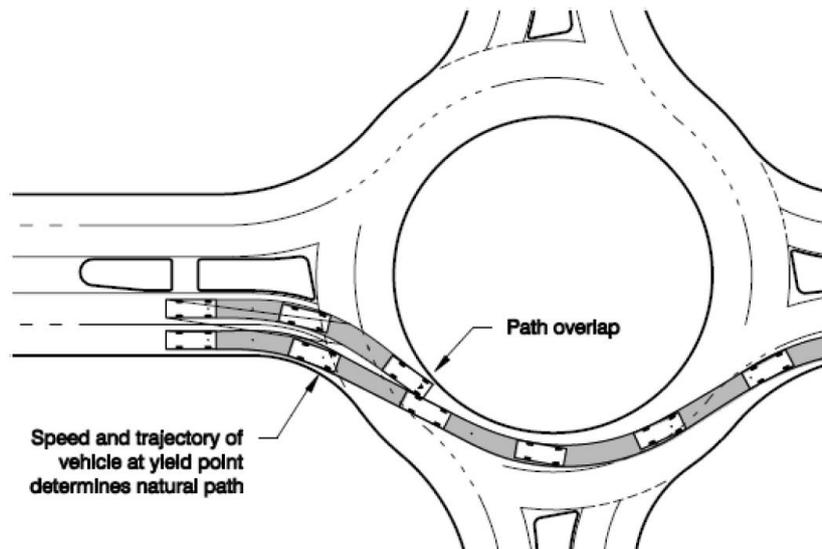
- **Geometría de la entrada**

En las rotondas multicarriles, para diseñar la curvatura de entrada se deben realizar varias iteraciones para determinar el tamaño adecuado, ubicación y alineamientos, con estos parámetros mencionados se busca controlar la velocidad y la necesidad de líneas de visibilidad adecuadas.

Los radios de entrada normalmente deben ser superior a los 20 m para lograr trayectorias adecuadas evitando accidentes de los usuarios a la entrada de la intersección, en los casos que se cuenta con radios inferiores a 13.7 m puede ocasionar problemas con el flujo vehicular adyacente, logrando una reducción de la capacidad.

El mal uso de los usuarios al momento de tomar su carril en la entrada de la intersección genera un traslapo de las trayectorias, ocasionando que los usuarios que circulan por el carril exterior tiendan a terminar circulando por el carril interior como se observa en la Figura 3.1, el cual también puede ocurrir en la salida de la intersección generando congestionamiento vehicular y disminución del nivel de servicio de la rotonda.

Figura 3.1: *Traslapo de trayectorias vehiculares*



Fuente: Fuente: (Jaramillo Gonzaga, 2017)

Por otro lado, las rotondas convencionales se clasifican de acuerdo a diferentes parámetros, como, según su geometría: estándar o normal, donde su diámetro de la isla central es mínimo de cuatro metros, permite entradas múltiples de vehículos y funciona perfectamente con tres tramos; otro tipo es la mini glorieta que el diámetro de la isla es menos de cuatro metros y mejoran la capacidad y seguridad, está condicionada para que la velocidad límite en todos los accesos sea 50 km/h (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

En referencia a lo expuesto, estas son los tipos más comunes utilizados en la ciudad de Cuenca, además existe otro tipo de clasificación de acuerdo a la ubicación de la rotonda, éstas pueden ser: interurbanas, se utilizan como intersección de carreteras; periurbanas, se utilizan cuando el usuario entra a una zona poblada; por último, las urbanas, la cuales la rotonda de estudio, por el tráfico y limitación de espacio funcionan generalmente mal (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

### **3.4.3. Criterios operacionales**

El objetivo principal de una rotonda es dar prioridad a los vehículos que circulan por ella en relación a los vehículos que pretenden entrar a ella, siempre y cuando esta no cuente con algún tipo de señalética interna específica que indique lo contrario. Las

rotondas por lo general cuentan con tres o cuatro tramos, abarcando una gran cantidad de vehículos. Los usuarios ingresan cada vez que ven un espacio para entrar a la rotonda teniendo en cuenta una distancia con los vehículos que transitan por ella; esto demuestra una gran influencia, la distancia entre una entrada y la salida siguiente como también la anchura de la calzada.

La anchura de cada entrada será la encargada de determinar la capacidad de acceso de a la rotonda la cual dependerá del medio en el que está ubicada la misma, ya que por lo general en rotondas implementadas en una zona urbana es mayor que en zonas periféricas. Por otro lado, el giro que debe realizar el vehículo al momento de entrar en la rotonda influye en su velocidad y seguridad para él y los demás usuarios, debido a que en varios casos al no tener que realizar un giro prominente, los usuarios ingresan con velocidades altas en las rotondas (Azcutia, 2011).

Para obtener un mejor rendimiento en la entrada de la rotonda, se recomienda que todos los accesos tengan un flujo similar, ya que, de lo contrario, si el tráfico es muy desequilibrado, los usuarios de la zona más desfavorecida tendrán dificultades para encontrar el hueco y entrar a la rotonda lo que generaría un congestionamiento en dicho acceso.

#### **3.4.4. Nivel de servicio**

HMC define el nivel de servicio LOS (Level Of Service) como una medida para obtener la calidad del servicio de la intersección analizada. Para la rotonda, se define mediante un control de retardo, y sus criterios se enumeran en la Tabla 3.3; se asigna un nivel de servicio F si la relación de volumen-capacidad es superior a 1 sin importar el control de retraso Sin embargo, para rotondas multicarril el nivel de servicio depende exclusivamente de las demoras por vehículo (HCM, 2010).

Tabla 3.3: *Criterios de nivel de servicio*

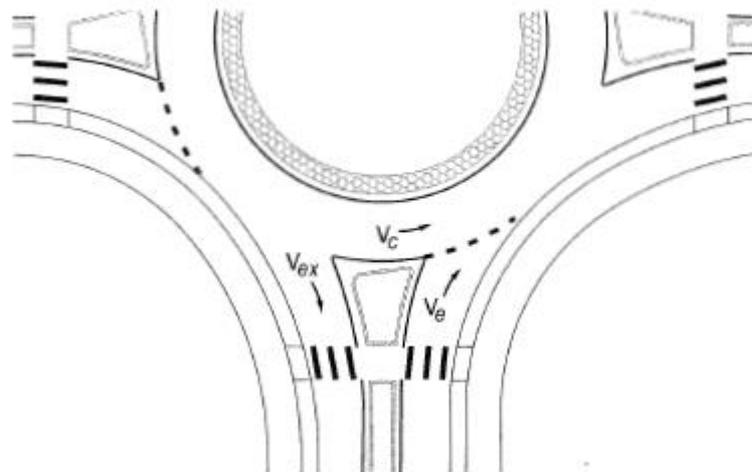
Control de retraso (s/veh)	Nivel de Servicio por relación volumen-capacidad	
	$v/c < 1.0$	$v/c > 1.0$
0-10	A	F
> 10-15	B	F
> 15-25	C	F
> 25-35	D	F
> 35-50	E	F
>50	F	F

Fuente: (HCM, 2010)

### 3.4.5. Capacidad

La capacidad de una rotonda depende directamente de tres tipos de flujo: flujo entrante, flujo circulante y flujo de salida como se observa en la Figura 3.2 (HCM, 2010). En el caso de rotondas multicarril, la intersección cuenta con más de un carril en al menos una entrada y una salida de la misma, el número de carriles suele variar tanto en la entrada, circulación y salida, ocasionando una mayor complejidad que en las rotondas de un solo carril (HCM, 2010).

Figura 3.2: *Tramo de una rotonda*



Fuente: (HCM, 2010)

En la Ecuación 3.7 podemos apreciar como calcular la capacidad cuando se cuenta con un solo carril de entrada en conflicto con un carril de circulación (HCM, 2010).

Ecuación 3.7: *Capacidad vehicular*

$$C_{e,veq} = 1130e^{(-1.0 \times 10^{-3})V_{c,veq}}$$

Fuente: (HCM, 2010)

Donde:

$C_{e,veq}$ : capacidad de carril, ajustada para vehículos pesados (veq/h)

$V_{c,veq}$ : flujo de tasa conflictivo (veq/h)

En el caso de contar con un carril de entrada con la oposición de dos carriles en conflicto se debe usar la Ecuación 3.8 (HCM, 2010).

Ecuación 3.8: *Capacidad vehicular con la oposición de dos carriles*

$$C_{e,veq} = 1130e^{(-0.7 \times 10^{-3})V_{c,veq}}$$

Fuente: (HCM, 2010)

Donde:

$C_{e,veq}$ : capacidad de carril, ajustada para vehículos pesados (veq/h)

$V_{c,veq}$ : flujo de tasa conflictivo (veq/h)

Cuando se cuenta con dos carriles en la entrada de la rotonda y con dos carriles de conflicto se debe ocupar la Ecuación 3.9 tanto para el carril de la izquierda como el de la derecha (HCM, 2010).

Ecuación 3.9: *Capacidad vehicular con dos carriles de entrada y conflicto*

$$C_{e,veq} = 1130e^{(-0.7 \times 10^{-3})V_{c,veq}}$$

Fuente: (HCM, 2010)

### **3.5. Turbo rotonda**

Las turbo rotondas son una alternativa que surgió en los países bajos, Holanda específicamente en el año de 1996 (Silva et al., 2014b). Estas surgen como una innovación al sistema existente de la rotonda multicarril convencional con el objetivo de mejorar la

seguridad de los usuarios (Pilko et al., 2019). En la Figura 3.3 se muestra un esquema de una turbo rotonda de dos carriles.

Figura 3.3: *Esquema de una turbo rotonda*



Fuente: (REALE SEGUROS, 2018)

Como una novedad respecto al uso de la rotondas, se tiene que en este tipo de intersección el carril exterior pierde su preferencia, debido a que ya no se puede realizar giros a la izquierda, con lo que cada carril guía al usuario a su salida (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

Las turbo rotondas nacen de la necesidad de resolver los conflictos ocasionados por las rotondas convencionales, en especial las multicarril. Para que la turbo rotonda sea más eficaz a la rotonda convencional debe regirse por tres condiciones: no exista cambio de carril, no es necesario tener más de dos carriles y que los usuarios manejen despacio mientras se encuentren en la rotonda (Fortuijn, 2009).

### **3.5.1. Criterios generales**

Esta nueva alternativa obliga a los usuarios a tomar un carril específico de acuerdo a su destino y permanezcan en el mismo durante toda su trayectoria, no se permita el cambio de carril dentro de la turbo rotonda o cerca de las entradas y salidas. Además, la velocidad disminuye considerablemente por los divisores de carril. Algunos diseños

constan en que la calzada tiene carriles continuos con bordillos para separarlos dentro y fuera de la rotonda (Silva et al., 2010).

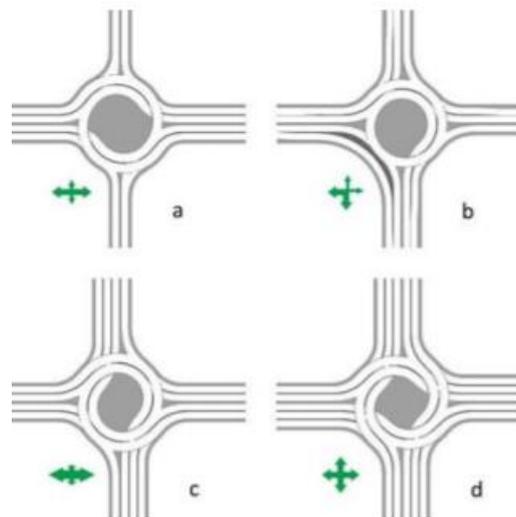
Para dirigir el tráfico en las turbo rotondas se lo realiza en forma espiral a diferencia de las rotondas que se hace de manera circular, por lo que el usuario al momento de ingresar a la rotonda ya debe tener definido su trayecto, ya que no puede cambiarse de carril en ningún momento (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

### 3.5.2. Criterios geométricos

#### Tipos de diseños

Para diseñar una turbo rotonda se debe analizar varios parámetros como: demanda de tráfico, distribución de carriles, capacidad, nivel de servicio de la calzada, entre otros. Dependiendo del beneficio que se requiera, existen varios diseños. Empero, el criterio más importante para elegir el diseño se basa en el flujo dominante, a continuación, en la Figura 3.4 se presenta los diseños más comunes de turbo rotondas utilizados en diversas partes del mundo (Silva et al., 2010).

Figura 3.4: Diseños de turbo rotondas: a. Óvalo; b. Rodilla; c. Espiral; d. Rotor

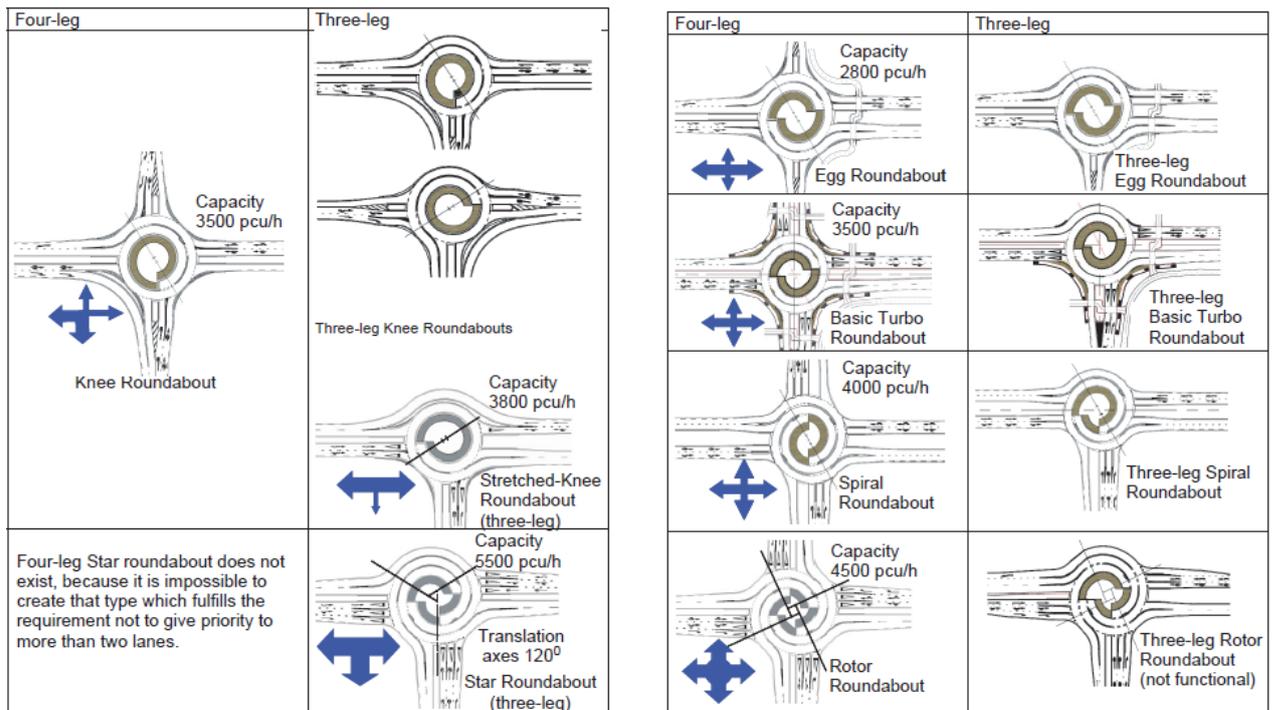


Fuente: (Silva et al., 2010)

De acuerdo al tráfico y funcionamiento de la rotonda, se toma un tipo de diseño como muestra la Figura 3.4: tipo óvalo se diseña cuando la demanda en el ramal secundario es baja; el tipo rótula se usa cuando existe un gran número de usuarios que giran a la derecha; el tipo espiral es frecuente cuando la rotonda tiene una alta demanda de tráfico dentro de la misma y también los giros en ambas direcciones (derecha e izquierda); por último, el tipo rotor se utiliza cuando el flujo es elevado en todos sus ramales (Silva et al., 2010).

Otro parámetro para el diseño detallado son los accesos y carriles que une a la rotonda. Para esto es preferible evaluar la intersección donde se va a implementarla. Si la rotonda recoge el viario entre tres a cuatro vías puede realizar un diseño tipo huevo, básico, espiral, rótula y rotor; mientras que si solo se tiene tres vías es preferible usar una rótula alargada o tipo estrella para optimizar recursos (Fortuijn, 2009). En la Figura 3.5 se representa los diseños mencionados con anterioridad, además de especificar la capacidad en vehículos por hora que tiene cada turbo rotonda.

Figura 3.5: Tipos y capacidades de turbo rotondas

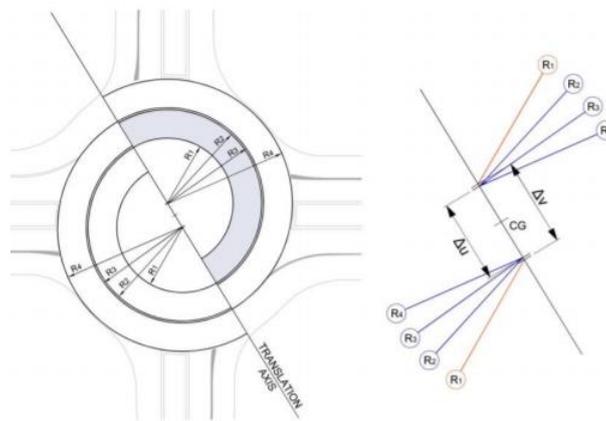


Fuente: (Fortuijn, 2009)

## Diseño geométrico

En la Figura 3.6 se aprecia la forma geométrica más común en la turbo rotonda; la cual está dada por dos espirales anidadas cada una con tres arcos cuyos radios crecen gradualmente de acuerdo al eje o la línea de traslación para asegurarse que el ancho del carril permanezca continuo. El diagrama de todas las espirales sobre el eje de traslación se denomina turbo-bloque, el cual delimita el carril dentro de la turbo rotonda. El límite de velocidad dentro de la turbo rotonda debe ser 40 km/h, por ende, se debe elegir el ancho y el radio de curvatura del carril que cumpla con este parámetro (Silva et al., 2010).

Figura 3.6: Geometría general de una turbo rotonda



Fuente: (Silva et al., 2010)

En la Tabla 3.4 podemos observar las medidas para los radios dentro de la turbo rotonda, en la cual se presentan dos opciones: la primera con un diámetro mayor de 49.95 m y la segunda con un diámetro mayor de 55.35 m; para las dos opciones mencionadas se cuenta con las medidas de cada parte de la turbo rotonda, teniendo en cuenta que existen valores que son constantes para las dos opciones (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

Tabla 3.4: *Medidas recomendadas para una turbo rotonda*

Parámetro	Parámetro Radios y medidas (m)			
Radio interno de la isla central	R1	12.00		15.00
Radio externo, carril interno	R2	17.15		20.00
Radio interno, carril externo	R3	17.45		20.30
Radio externo, carril externo	R4	22.45		25.20
Ancho inicial, carril interno		5.30		5.15
Ancho final, carril interno		5.00		4.90
Ancho, carril externo		5.00		4.90
Diferencia entre el ancho de carril y el ancho entre líneas de demarcación			0.65	
Ancho del separador de carriles			0.30	
Distancia entre los puntos centrales para el traslado del carril interno		5.35		5.15
Distancia entre los puntos centrales para el traslado del carril externo		5.05		4.95
Diámetro inscrito mayor		49.95		55.35
Diámetro inscrito menor		45.18		50.64
Radio de entrada y radio de salida			10.00	
Radio de entrada del separador de carril			12.00	
Radio de giro del separador de carril			15.00	
Sobrecancho remontable de la isla central (vehículos de más de 22m de largo)			5.00	
Sobrecancho remontable en las esquinas de la intersección (giros derechos)			1.50 - 3.00	
Ancho remontable de la plataforma (vehículos de más de 22m de largo)			5.00	

Nota: Velocidad de paso de los vehículos livianos en la intersección (km/h)= 37-39.

Fuente: (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015)

### 3.5.3. Criterios operacionales

Las turbo rotondas tiene como ventajas principales la reducción de puntos de conflicto, disminución de velocidad mientras el usuario se encuentre en la rotonda y una baja probabilidad de tener accidentes laterales entre usuarios (Silva et al., 2010).

Un criterio importante a considerar es la seguridad que presenta esta solución puesto que, a lo largo de los años, tras varios estudios se ha determinado que puede llegar a reducir hasta un 70% de un choque automovilístico a comparación de la rotonda

convencional. Además de la reducción de puntos de conflicto y, por ende, el aumento de la seguridad también a las turbo rotondas se le atribuye una reducción en la velocidad hasta de 10 km/h cuando los usuarios ingresan, se mantienen y salen de las mismas (Silva et al., 2010).

Al momento de ingresar en la rotonda se debe tener en cuenta que los giros solamente se pueden realizar hacia la derecha, por lo que los usuarios deberán elegir de manera adecuada el carril al tomar al momento de ingresar en la intersección, puesto que una vez tomado su carril no podrán cruzarse al otro carril ni realizar otro tipo de giro (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

La manera para que las turbo rotondas sean efectivas es de acuerdo a la señalización correcta para que los usuarios sepan que carril deben tomar para llegar a su destino puesto que dentro de la turbo rotonda es imposible cambiarse del mismo. Por ende, la señalética debe ser informativa y dar tiempo suficiente para que el usuario la lea y analice el carril correcto.

#### **3.5.4. Nivel de servicio**

HMC define el nivel de servicio LOS (Level Of Service) como una medida para obtener la calidad del servicio de la intersección analizada. Para la rotonda, se define mediante un control de retardo, y sus criterios se enumeran en la Tabla 3.3; se asigna un nivel de servicio F si la relación de volumen-capacidad es superior a uno sin importar el control de retraso. Sin embargo, para rotondas multicarril el nivel de servicio depende exclusivamente de las demoras por vehículo (HCM, 2010).

#### **3.5.5. Capacidad**

Para los diseños estándares y para algunas condiciones del flujo vehicular se ha demostrado que las turbo rotondas superan la capacidad de una rotonda convencional multicarril. Esto ocurre debido en varias situaciones como: un aumento significativo de giros a la derecha por parte del carril secundario; el flujo que avanza dentro de la rotonda aumenta; o, por último, dentro de todos los carriles, salidas y entradas de la rotonda tienen un mismo flujo (Silva et al., 2010).

Para la selección de una turbo rotonda se necesita analizar varios parámetros como la intensidad media de los vehículos que entran a las rotondas. En la Tabla 3.5 se muestra que según el tipo de turbo rotonda, existe una capacidad máxima de vehículos por hora.

Tabla 3.5: *Capacidades para cada turbo rotonda*

<b>TIPO</b>	<b>N° RAMALES</b>	<b>CAPACIDAD (veh/h)</b>
Ovoide	3	-
	4	2800
Rótula	3	3300
	4	3500
Básico	3	-
	4	3500
Rótula alargada	3	3800
	4	-
Espiral	3	-
	4	4000
Rotor	3	No funcional
	4	4500
Estrella	3	5500
	4	Solución no posible por permitir paso a más de dos carriles

Fuente: (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015)

### 3.6. Metodología de desarrollo

Para analizar, evaluar y conocer la operabilidad y desarrollo de las turbo rotondas existen varios métodos como todo proceso de ingeniería. No obstante, para la presente investigación se tomará el análisis mediante la micro simulación con el software Aimsun.

Primero se realiza la obtención de datos mediante conteos automáticos y manuales. El conteo automático se lo obtuvo mediante fuentes secundarias de un conteo realizado en el año 2012. Segundo, se realiza el conteo manual, el cual para éste se utilizó una cámara instalada en la intersección que registra toda la información durante 160 horas, al procesar los videos se obtiene el flujo vehicular que tiene la rotonda durante este tiempo. Mediante un conteo automático se determina el día de máxima demanda, es decir el día crítico, y, así, se procede a realizar el conteo manual de 12 horas consecutivas para determinar el volumen horario de máxima demanda.

Figura 3.7: Cámara instalada en la intersección



Fuente: Propia

Posteriormente, se escoge la hora crítica y se analizan los giros durante esta hora para determinar las matrices origen-destino. Finalmente, con todos los datos obtenidos, se procede a simular en el software Aimsun para analizar las condiciones actuales del viario.

### **3.6.1. Conteo volumétrico**

Una vez establecido el día crítico, por medio del conteo automático obtenido de datos de estudios anteriores, se establece un conteo volumétrico manual clasificado de 12 horas consecutivas; este se analiza mediante los videos obtenidos de la cámara. El conteo que se realice se clasifica en diferentes tipos de vehículos como livianos, pesados y camiones de dos ejes que transitan por la rotonda cada 15 minutos. Cabe destacar que esta clasificación debe ser procesada manualmente y lograr diferenciar la hora pico o crítica del día. Cuando los usuarios entran a la turbo rotonda pueden realizar cuatro maniobras posibles: giro a la derecha, seguir su camino, giro a la izquierda y circunvalar.

El conteo volumétrico manual clasificado se realizó en base a los videos obtenidos y se dividió en tres categorías: livianos, buses y camiones de dos ejes. La cámara fue instalada el día martes 25 de mayo de 2021 y recopiló datos e información hasta el día sábado 29 de mayo de 2021, un total de 160 horas continuas. Se determinó el día crítico, el cual fue el día viernes que presentaba 58192 vehículos registrados durante todo el día. A continuación, se procede a calcular el flujo cada 15 minutos durante 12 horas consecutivas de todas las entradas a la rotonda; este conteo empezó desde las 7h30 hasta las 19h30, con el objetivo de determinar el volumen horario de máxima demanda, el cual dio como resultado que este está comprendido entre las 11h30 a 12h30.

Figura 3.8: Video obtenido de la cámara instalada



Fuente: Propia

### 3.6.2. Análisis de las matrices origen-destino

Una vez determinado el volumen horario de máxima demanda, se determina los destinos de los viajes de cada vehículo durante la hora pico por medio de los videos para saber la entrada y salida de cada tipo de vehículo que circulaba por la rotonda, para determinar los viajes en el viario. A cada viaje se lo ubica en una matriz donde indique el origen y destino del vehículo.

### 3.6.3. Tráfico futuro

El pronóstico de volumen y composición del tráfico se basa en datos actuales. Para un diseño y comportamiento debe basarse en datos futuros como a 15, 20 o más años. Las proyecciones se utilizan para conocer el comportamiento y uso de la intersección para saber si esta abastecerá una demanda futura.

Para obtener el crecimiento del tráfico debemos relacionarlo con diversos factores como el crecimiento poblacional y del parque automotor. Con estos datos se procede a determinar la tasa de motorización (número de vehículos por cada mil habitantes) para vehículos livianos y pesados. Se utilizan diversos modelos y ecuaciones de proyección,

una de ellos es el NOBEL LOGIT, con el que se determina la Ecuación 3.10 de ajuste y proyección para la tasa de motorización con tasas de saturación (MTOPI, 2003).

Ecuación 3.10: *Tasa de motorización*

$$Tm = \frac{Ts}{1 + e^{a+b*t}}$$

Fuente: (MTOPI, 2003)

Donde

Tm: tasa de motorización

Ts: tasa de saturación

a, b: constantes a determinar

t: tiempo en años

Para la obtención del Tm se debe poseer datos históricos del crecimiento poblacional y de matriculación en un periodo de tiempo grande. Luego, obtengo la tasa de motorización de los años correspondientes; despejo las variables a y b, imponiéndose un valor de Ts. Con la ayuda de un gráfico de año versus la ecuación de despeje determino la línea de tendencia como ecuación lineal iterando Ts hasta obtener  $R^2$  máximo. Por último, calculo los valores de Tm ajustados para los vehículos livianos por cada mil habitantes. Empero, si no existe información estadística se puede hacer las proyecciones a basa de la tasa del crecimiento poblacional o consumo de combustible como lo es en el caso de camiones y buses. En la Ecuación 3.11 se observa el crecimiento en cuanto a la población; despejo i para obtener la tasa de crecimiento de los buses y camiones (MTOPI, 2003).

Ecuación 3.11: *Tráfico futuro*

$$Tf = Ta * (1 + i)^n$$

Fuente: (MTOPI, 2003)

Donde

Tf: tráfico o población futura

Ta: tráfico o población actual

i: tasa de crecimiento

n: número de años

### 3.7. Calibración y validación de modelos

Para establecer el correcto levantamiento de información de la situación actual se tomaron en cuenta varios parámetros para proyectarlos en el programa Aimsun en los diferentes escenarios. Estos parámetros son: ancho de los carriles, velocidades permitidas, flujo de máxima demanda, entre otros; todos estos permitieron calibrar y validar el modelo. Una vez ingresados todos los datos se tiene que validar el modelo, es decir, hacer que este se asemeje en lo posible a la realidad. Para esto se toma velocidades, tiempos de demoras y tiempos de colas en campo; estos se comprueban con los modelados para poner las solicitudes reales.

De acuerdo al parámetro de calibración se lo realizó utilizando la demanda del flujo horario de máxima demanda y se compara con los flujos vehiculares obtenidos en el programa. Para conocer y mejorar la capacidad y condiciones del modelo que este se asemeje a la realidad se utiliza el indicador Geoffrey E. Havers (GEH), el cual es un indicador estadístico para evaluar los valores observados y modelados. En la Ecuación 3.12 se puede obtener estos valores para cada contador

Ecuación 3.12: *GEH*

$$GEH = \sqrt{\frac{2 * (M - C)^2}{M + C}}$$

Fuente: (Valenzuela-ñañez, 2017)

Donde

M: volumen obtenido del modelo

C: volumen medido en campo (aforo o contador)

El valor que se obtiene de esta ecuación tiene tres criterios de aceptación: si el GEH es menor a 5, el modelo está correspondido entre los valores observados y modelados y está calibrado; si es mayor a 5 pero menor a 10, falta análisis, pero se puede justificar una investigación; por último, si es mayor a 10 existe un problema con el modelo de demanda o de viajes o, inclusive, los datos (Valenzuela-ñañez, 2017).

## 4. Estudio de caso: rotonda del estadio (Av. Fray Vicente Solano y Av. Remigio Crespo)

### 4.1. Área de estudio

El presente trabajo se ejecutó en la intersección de la avenida Fray Vicente Solano y Remigio Crespo, ciudad de Cuenca, Ecuador.

#### 4.1.1. Ubicación

El área de influencia de la rotonda se encuentra afectada por cuatro ramales; los cuales son vías de acceso a distintos puntos de la ciudad: Avenida Fray Vicente Solano, vía arterial que opera en dos sentidos de circulación, donde cada sentido cuenta con una vía principales de tres carriles que une el sur y centro de la ciudad; y la Avenida Remigio Crespo, vía arterial que opera en dos sentidos de circulación, donde cada sentido cuenta con una vía principal de dos carriles que une el oeste y este de la ciudad. En la Figura 4.1 se aprecia el número de ramales y carriles que conforman la rotonda, además de sus vías de acceso.

Figura 4.1: *Ramales de la rotonda*



Fuente: Propia

## 4.2. Clasificación vial

En la ciudad de Cuenca la clasificación vial está regida por el PMEPE de Cuenca, el cual dicta que el nuevo sistema viario de Cuenca está basado en el grado de importancia, volumen del tráfico y número de carriles. La intersección estudiada está compuesta por vías 40, puesto que su velocidad máxima permitida es 40 km/h en su geometría cuentan con dos carriles para la circunvalación (PMEPE, 2015).

## 4.3. Descripción de la geometría actual

En la Figura 4.2 se observa la geometría actual de la rotonda; esta está compuesta por una isla central de 27 metros y una calzada de un total de 15 metros alrededor del anillo. La rotonda tiene cuatro ramales de acceso, la avenida Solano es el único ramal de entrada y salida que cuenta con más de dos carriles.

Figura 4.2: *Geometría actual*



Fuente: Propia

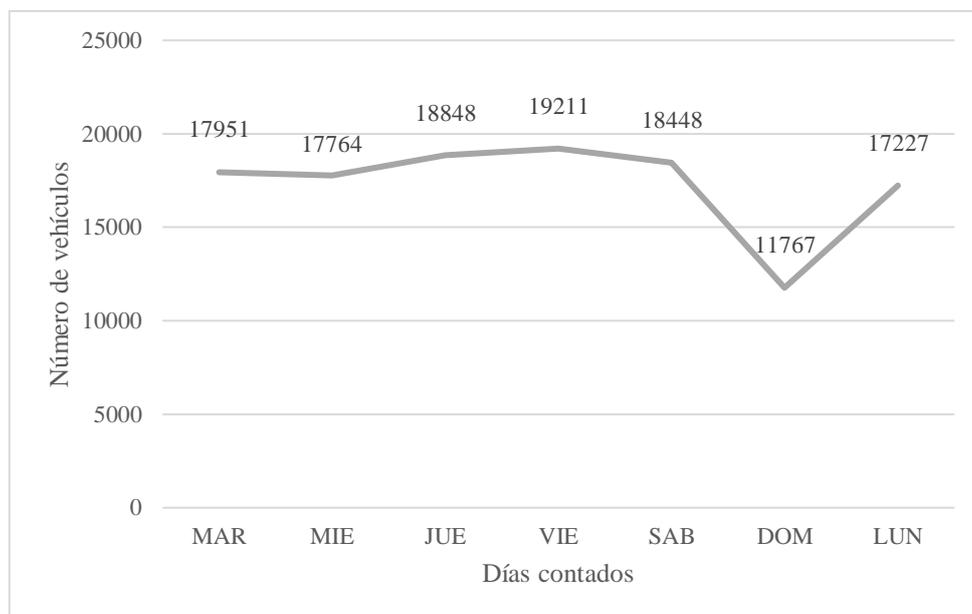
### 4.3.1. Conteo automático

El conteo automático se tomó de un levantamiento de información de la Avenida Remigio Crespo realizado en el año 2012. Para lograr transformarlo a un conteo actual, se utilizó el último índice de crecimiento registrado para proyectar los valores del conteo

y así tener valores referenciales de esta avenida. El conteo solo tomó en cuenta el aforo vehicular, no el peatonal. El contador automático realizó durante siete días, las 24 horas del día, la numeración de los vehículos que transitaban por esta avenida. En la Tabla 10.1 se demuestra los datos obtenidos del contador, este empezó el día martes a las 24 horas y terminó el día lunes a las 24 horas.

En la Figura 4.3 se puede observar las fluctuaciones que tiene la avenida diariamente durante toda una semana. Aquí podemos observar que el día que posee el volumen de máxima demanda es el viernes con un total de 19211 vehículos que transitaron durante todo el día.

Figura 4.3: Variación diaria del tráfico que ingresa a la rotonda



Fuente: Propia

#### 4.3.2. Conteo volumétrico

Una vez obtenido el día de máxima demanda se procede a realizar el conteo volumétrico clasificado durante 12 horas, su clasificación es de vehículos livianos, buses y camiones de dos ejes. En la Figura 4.4 se puede observar la variación del tráfico durante el día de máxima demanda; el período de conteo manual se lo realizó entre las 07:30 a 19:30, pues como se observa es durante todo el transcurso de este período que se logra obtener la mejor variación de tráfico.

Figura 4.4: Variación horaria del tráfico que ingresa a la rotonda



Fuente: Propia

La metodología empleada para el conteo manual es dividiendo el período de 12 horas en intervalos de 15 minutos, donde se contabiliza los vehículos livianos, buses y camiones de dos ejes que entran a la rotonda por los cuatro accesos. El conteo manual se lo realizó por medio de cámara de vigilancia, para obtener toda la información. Como se muestra en la Tabla 10.2, los vehículos livianos, buses y camiones contabilizados y el formato de la encuesta de flujo vehicular utilizada para clasificar al tránsito.

De acuerdo a la Tabla 10.2 se puede obtener el volumen horario de máxima demanda, el cual es la hora pico que se encuentra entre las 11:30 y 12:30, con un total de 4295 vehículos que transitan en toda la rotonda. Una vez obtenidos los datos se procede a calcular los diversos factores para obtener el TPDA 2021 y el tránsito futuro. Anteriormente, en la Ecuación 3.2, se establece que para calcular el tráfico promedio diario anual (TPDA) se necesita cuatro factores: factor horario, diario, semanal y mensual.

Para la obtención del factor horario ( $F_h$ ) se utiliza la Ecuación 3.3 el día viernes con un total de vehículos 19211 y los registrados en las 12 horas de conteo manual 13286, el cual nos da un factor horario de 1,446.

$$F_h = \frac{19211}{13286} = 1,446$$

Posteriormente se determinó el factor diario utilizando la Ecuación 3.4, donde el promedio de vehículos fue de 17317 y el flujo diario fue de 19211; esto nos da como resultado un factor diario de 0,901.

$$F_d = \frac{17317}{19211} = 0,901$$

El factor semanal se determina por medio de la Tabla 3.1, utilizamos el factor del mes de mayo en el cual se realizó el conteo; obteniendo un factor de 1,108. Por último, el factor mensual utilizamos la Tabla 3.2 para obtener el consumo promedio mensual de combustibles y el consumo de mayo; los cuales serían 2090925,374 y 2186538, respectivamente, concluyendo con un valor de 0,956.

$$F_m = \frac{2090925,374}{2186538} = 0,956$$

Una vez obtenidos todos los factores, se procede a calcular el TPDA 2021 de la rotonda en base a la Ecuación 3.2. A su vez, para obtener el tráfico aforado se utiliza la Ecuación 3.1 que nos da como resultado 45299 vehículos que ingresan a la rotonda diariamente y el TPDA es de 62513 vehículos en total.

$$TPDA = 45299 * 1,446 * 0,901 * 1,108 * 0,956 = 62513$$

#### **4.3.3. Matrices origen-destino**

Para realizar la simulación se procede a determinar todos los viajes durante la hora pico de los vehículos livianos, buses y camiones. Aquí se utiliza la matriz origen destino sin mayorar para poder realizar la calibración y validación del modelo. Luego utilizamos la Ecuación 3.5 para calcular el factor de hora pico, dando un resultado de 0,975 y dividimos las matrices para este factor para transformar en un volumen horario de diseño.

$$PHF = \frac{4295}{4 * 1101} = 0,975$$

En la Tabla 10.4 se observa la matriz de origen destino con todos los movimientos permitidos del viario actual para simular el estado de la rotonda.

#### 4.3.4. Tráfico futuro

Como se explicó con anterioridad, utilizamos el método LOGIT para la proyección de los vehículos livianos. Mediante la Tabla 10.3 obtenemos los datos para determinar la tasa de saturación óptima y así, mediante la Ecuación 3.10, la tasa de motorización. En la Figura 10.1 se observa los resultados de las constantes a, b de esta ecuación; cuyos valores son 147,86 y -0,0736 respectivamente.

Mediante los livianos ajustados de la Tabla 10.3 despejamos la tasa de crecimiento (i) de la Ecuación 3.11 y obtenemos el índice de crecimiento para vehículos livianos. De la misma manera mediante la población obtenemos el índice de crecimiento poblacional que es la misma tasa para buses y camiones. En la Tabla 4.1 se observa el índice de crecimiento de la clasificación estudiada (vehículos livianos, buses y camiones de dos ejes) hasta el año 2030.

Tabla 4.1: *Tasa de crecimiento vehicular*

Tasa de crecimiento vehicular				
Período años		Livianos	Buses	Camiones
2012	2021	4,72%	1,94%	1,94%
2021	2025	3,93%	1,94%	1,94%
2021	2030	3,68%	1,94%	1,94%
2025	2030	3,48%	1,94%	1,94%

Fuente: Propia

Con los índices de crecimientos obtenidos para los vehículos livianos, buses y camiones obtenemos el TPDA de los años siguientes hasta el 2030, el cual es el año de estudio. En la Tabla 4.2 se observa el crecimiento de los vehículos que transitan por la rotonda y los que transitarán hasta el año de estudio, el cual aumentará en 190% a comparación el TPDA actual.

Tabla 4.2: *TPDA*

Clase	To 2021	TPDA 2021	TPDA 2025	TPDA 2030
Livianos	43533	60076	70093	83187
Buses	813	1122	1212	1334
Camiones	953	1316	1421	1564

Fuente: Propia

Con los índices obtenidos en la Tabla 4.1 para el año 2030; 3,68% vehículos livianos, 1,94% buses y camiones, obtenemos la matriz referencial de origen destino que circulará en este año de estudio. La Tabla 10.5 detalla los vehículos que circularán en este año, con un incremento promedio del 39% en nueve años.

#### 4.3.5. Calibración y modelación

En cuanto a la calibración y validación del modelo, para la calibración del flujo circulante, se lo realizó en base a la demanda y se compararon los observados en campo y los simulados. En la Tabla 10.6 podemos observar el conjunto de datos reales y los datos de simulación, mediante la cual Aimsun calcula automáticamente la diferencia absoluta y la diferencia relativa de cada valor para analizar las desviaciones en cada detector utilizado en el ajuste, valores que no superan el 14% de diferencia. Adicionalmente se puede observar, en la columna final, el cálculo del valor de la estadística GEH valores que son óptimos para validación (menores a 5). Utilizando la Ecuación 3.12 obtenemos que el GEH promedio es de 2,682.

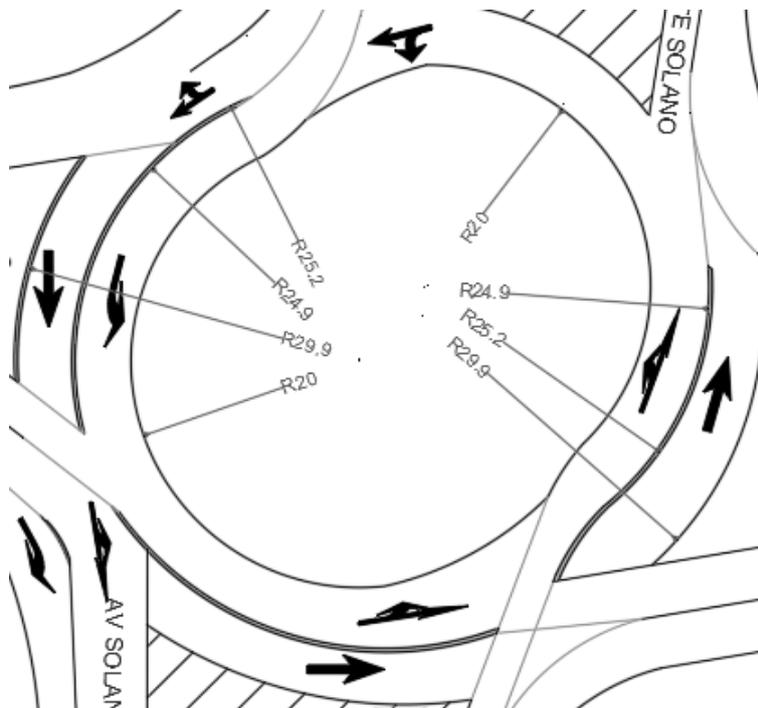
De la misma manera, en la Tabla 10.7 para el escenario propuesto el GEH promedio es de 3,999 lo que nos indica que el modelo propuesto es válido puesto que transitan la misma cantidad de vehículos. Según Steer Davies Gleave, el indicador GEH nos indica que un modelo está satisfactoriamente calibrado si: al menos el 60% de los arcos tienen un GEH inferior a 5.0, el 95% de los arcos tienen un GEH inferior a 10.0, todos los arcos tienen un GEH inferior a 12.0 (Valenzuela-ñañez, 2017).

#### 4.3.6. Descripción de la geometría propuesta

Para el diseño geométrico se ha propuesto la turbo rotonda tipo básica debido a la similitud de geometría del viario que tenemos en la ciudad, tiene una capacidad teórica de 3500 veh/hr. Para el trazado del diseño geométrico de la turbo rotonda se utilizó el programa AutoCAD.

Las características geométricas de la turbo rotonda presenta en su mayoría dos carriles de entrada, exceptuando el acceso norte el cual presenta tres, y dos carriles de salida. En la Figura 4.5 se presenta la geometría propuesta para la turbo rotonda de la intersección; la isla central tiene un radio de 20 m, ancho de carril circulante de 4,9 m y separadores de carril de 0,30 m y todos los radios de curvatura son superiores a 20 m, como se había explicado en el capítulo anterior para evitar accidentes. Además, existe un carril extra en la salida hacia el sur y oeste que permite que los vehículos no entren a la turbo rotonda si vienen por los accesos norte y oeste.

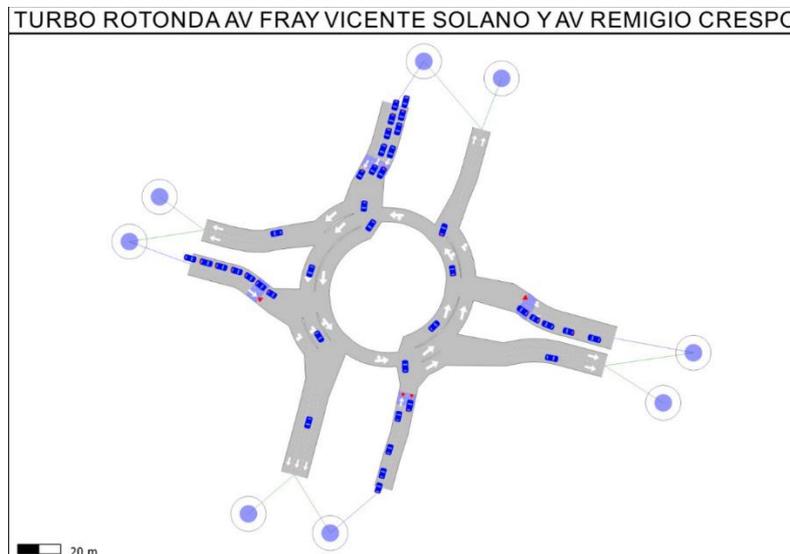
Figura 4.5: Geometría propuesta de la turbo rotonda básica



Fuente: Propia

Con respecto al análisis de giros se realizó con el programa Aimsun y en la Figura 4.6 se puede observar todas las maniobras que tienen los vehículos dependiendo de entrada y acceso y fueron evaluados para que todo acceso tenga una salida a cualquier parte de la ciudad, sea Norte, Sur, Este u Oeste.

Figura 4.6: *Movimiento de vehículos dentro de la turbo rotonda*



Fuente: Propia

#### 4.3.7. Verificación de trayectorias y maniobras

Una vez propuesta la geometría de la turbo rotonda, se verifica que el vehículo de diseño, bus urbano, pueda maniobrar dentro de la misma y salir con éxito sin ningún percance. Por este motivo, se verifica mediante el *Vehicle Tracking* de AutoCAD que el bus si puede realizar todas las maniobras dentro la turbo rotonda y salir sin ningún inconveniente como se demuestra en la Figura 4.7.

Figura 4.7: Maniobras del bus dentro de la turbo rotonda



Fuente: Propia

## 5. Análisis de resultados

### 5.1. Resultados de la modelación del escenario actual

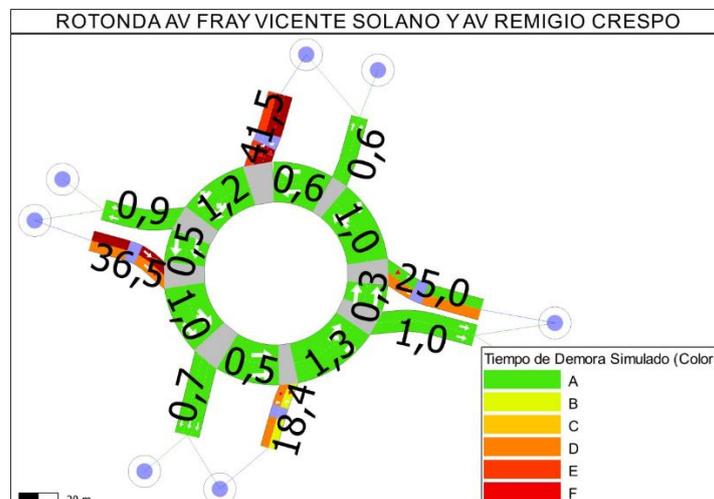
Para la obtención de demoras promedio por vehículos para cualificarlo por nivel de servicio se realizó cinco corridas de calibración con el objetivo de tener un acercamiento a la actualidad. En la Tabla 5.1 se observa las condiciones actuales del nivel de servicio en base a los criterios expuestos en la Tabla 3.3, mientras que en la Figura 5.1 se observa los diferentes niveles de servicio en los accesos y salidas de la rotonda.

Tabla 5.1: *Condiciones existentes*

Resultados	Accesos			
	Norte	Sur	Este	Oeste
Volumen (veh)	3862			
Número de carriles	3	2	2	2
Longitud promedio de cola (veh)	30,35			
Demora promedio (seg/veh)	41,5	18,4	25	36,5
Nivel de servicio	E	C	C	E

Fuente: Propia

Figura 5.1: *Niveles de servicio escenario actual*



Fuente: Propia

## 5.2. Resultado de la modelación: escenario propuesto

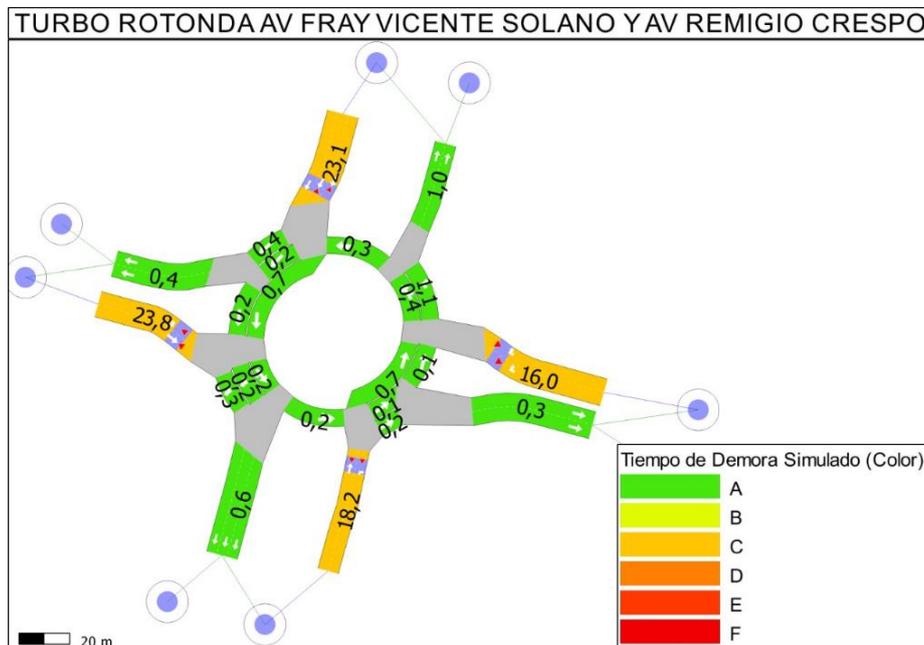
Para la obtención de demoras promedio por vehículos, para cualificarlo por nivel de servicio, se realizó cinco corridas de calibración con el objetivo de tener un mayor acercamiento al escenario propuesto. En la Tabla 5.2 se observa las condiciones propuestas en la turbo rotonda del nivel de servicio en base a los criterios expuestos en la Tabla 3.3, mientras que en la Figura 5.2 se observa los diferentes niveles de servicio en los accesos y salidas de la rotonda.

Tabla 5.2: *Condiciones propuestas*

Resultados	Accesos			
	Norte	Sur	Este	Oeste
Volumen (veh)	3761			
Número de carriles	3	2	2	2
Longitud promedio de cola (veh)	19,84			
Demora promedio (seg/veh)	23,1	18,2	16	23,8
Nivel de servicio	C	C	C	C

Fuente: Propia

Figura 5.2: *Niveles de servicio escenario propuesto actualidad*



### 5.3. Resultado de la modelación: escenario de la rotonda futuro

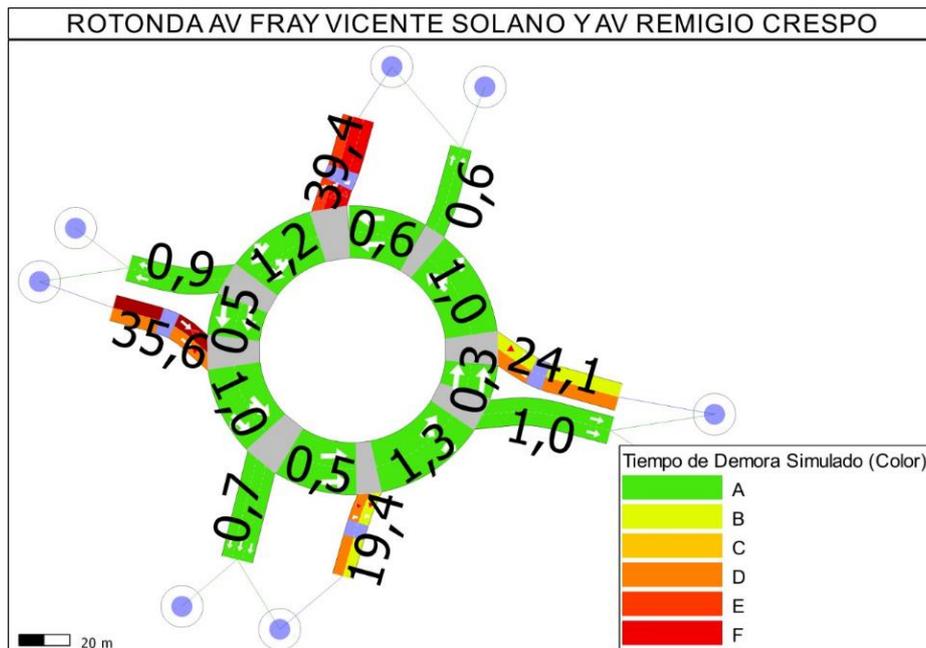
Para la obtención de demoras promedio por vehículos para cualificarlo por nivel de servicio se realizó cinco corridas de calibración con el objetivo de tener un mayor acertamiento al escenario propuesto. En la Tabla 5.3 se observa las condiciones propuestas en la rotonda para el año 2030, mientras que en la Figura 5.3 se observa los diferentes niveles de servicio en los accesos y salidas de la rotonda.

Tabla 5.3: *Condiciones rotonda año 2030*

Resultados	Accesos			
	Norte	Sur	Este	Oeste
Volumen (veh)	4101			
Número de carriles	3	2	2	2
Longitud promedio de cola (veh)	32,16			
Demora promedio (seg/veh)	39,4	19,4	24,1	35,6
Nivel de servicio	E	C	C	E

Fuente: Propia

Figura 5.3: Niveles de servicio rotonda 2030



Fuente: Propia

#### 5.4. Resultado de la modelación: escenario de la turbo rotonda futuro

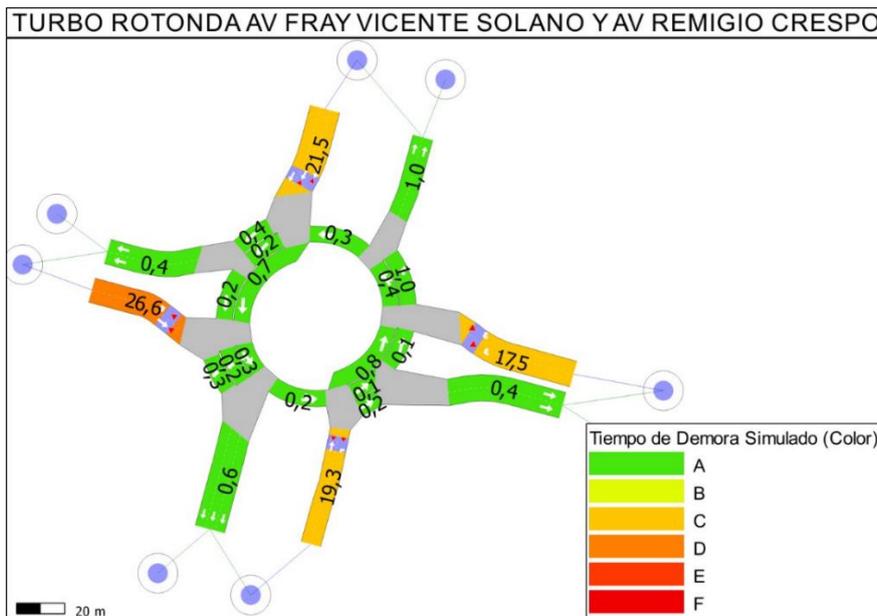
Para la obtención de demoras promedio por vehículos para cualificarlo por nivel de servicio se realizó cinco corridas de calibración con el objetivo de tener un mayor acertamiento al escenario propuesto. En la Tabla 5.4 se observa las condiciones propuestas en la turbo rotonda para el año 2030, mientras que en la Figura 5.4 se observa los diferentes niveles de servicio en los accesos y salidas de la rotonda.

Tabla 5.4: Condiciones turbo rotonda año 2030

Resultados	Accesos			
	Norte	Sur	Este	Oeste
Volumen (veh)	4355			
Número de carriles	3	2	2	2
Longitud promedio de cola (veh)	22,79			
Demora promedio (seg/veh)	21,5	19,3	17,5	26,6
Nivel de servicio	C	C	C	D

Fuente: Propia

Figura 5.4: Niveles de servicio turbo rotonda 2030

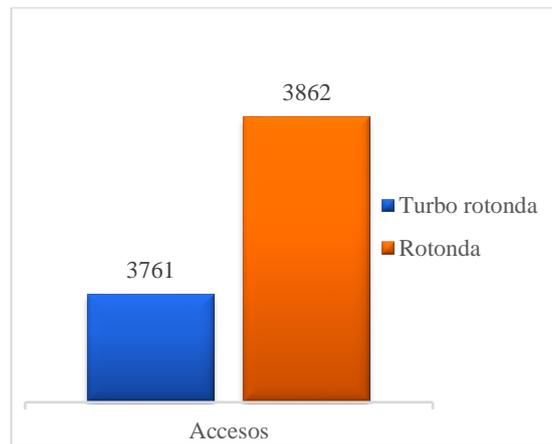


Fuente: Propia

## 5.5. Discusión

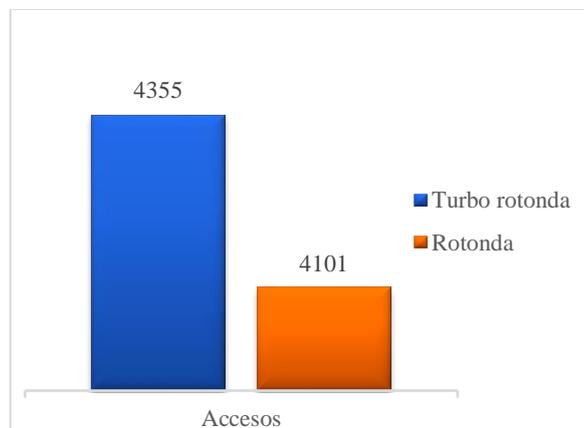
En la Figura 5.5 se observa que, en las condiciones actuales del viario, la turbo rotonda tiene la capacidad de ingresar el 97% de los vehículos que normalmente ingresan a la rotonda, es decir en la turbo rotonda ingresan alrededor de 3761 vehículos mientras que en la rotonda ingresan 3862. Empero, en la Figura 5.6 se observa que para el año 2030 la turbo rotonda tiene la capacidad de ingresar 4355 vehículos mientras que la rotonda ingresa 4101, es decir, la turbo rotonda supera en un 6% la capacidad de la rotonda.

Figura 5.5: *Flujo del viario actual (veh) año 2021*



Fuente: Propia

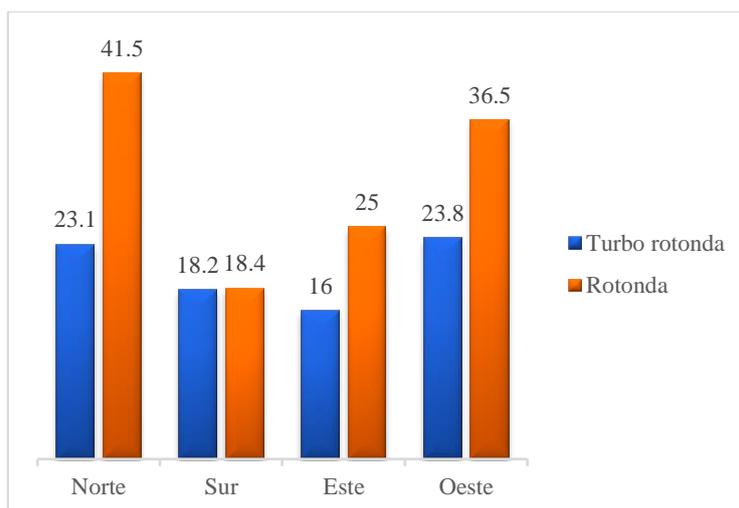
Figura 5.6: *Volumen de vehículos (veh) año 2030*



Fuente: Propia

En la Figura 5.7 se observa que, en las condiciones actuales del viario, la turbo rotonda experimenta una notable mejoría en los tiempos de demora y, por ende, el nivel de servicio; logrando disminuir todos los tiempos de demora de los accesos de la rotonda en el año 2021: en el acceso norte se redujo 18,4 segundos; en el acceso sur se redujo 0,2 segundos; en el acceso este 9 segundos; y, por último, en el acceso oeste 12,7 segundos.

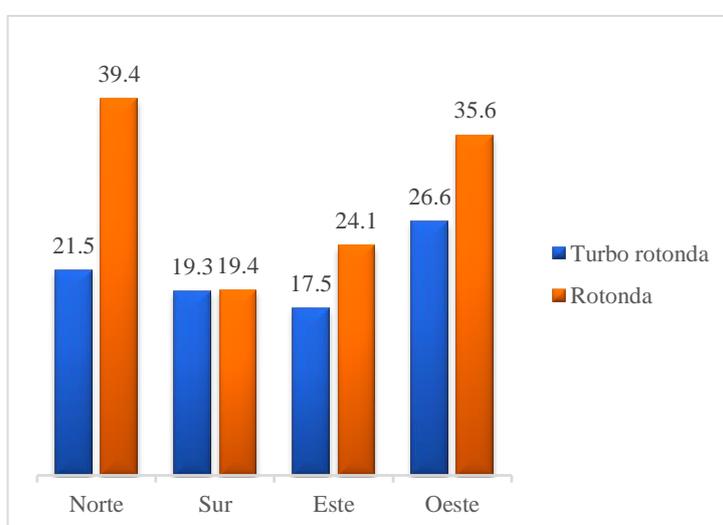
Figura 5.7: Tiempo de demoras (seg) año 2021



Fuente: Propia

En la Figura 5.8 se observa que, en las condiciones futuras del viario, la turbo rotonda experimenta una notable ventaja a comparación de la rotonda demostrada en los tiempos de demora y, por ende, el nivel de servicio. Mientras que la ronda actual llega al límite en sus niveles de servicio antes de colapsar en el año 2030, la turbo rotonda aún presenta niveles de servicio óptimos para la circulación; esta logra disminuir todos los tiempos de demora: en el acceso norte se redujo 17,9 segundos; en el acceso sur se redujo 0,1 segundos; en el acceso este 6,6 segundo; y, por último, en el acceso oeste 9 segundos.

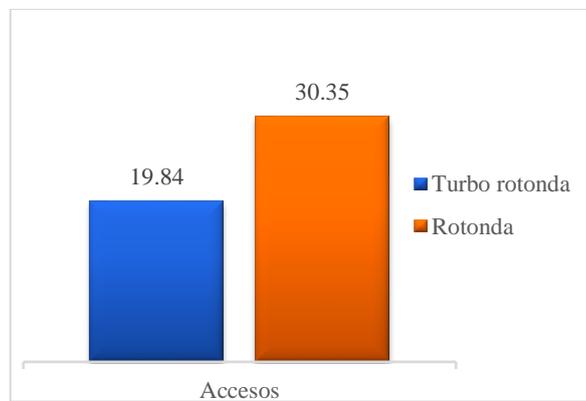
Figura 5.8: Tiempo de demoras (seg) año 2030



Fuente: Propia

En la Figura 5.9 se observa que, en las condiciones actuales del viario, la turbo rotonda experimenta una notable mejoría a comparación de la rotonda demostrada en la longitud de cola promedio. La turbo rotonda presenta una disminución del 35% en la cola promedio de vehículos a comparación de la rotonda en el año 2021.

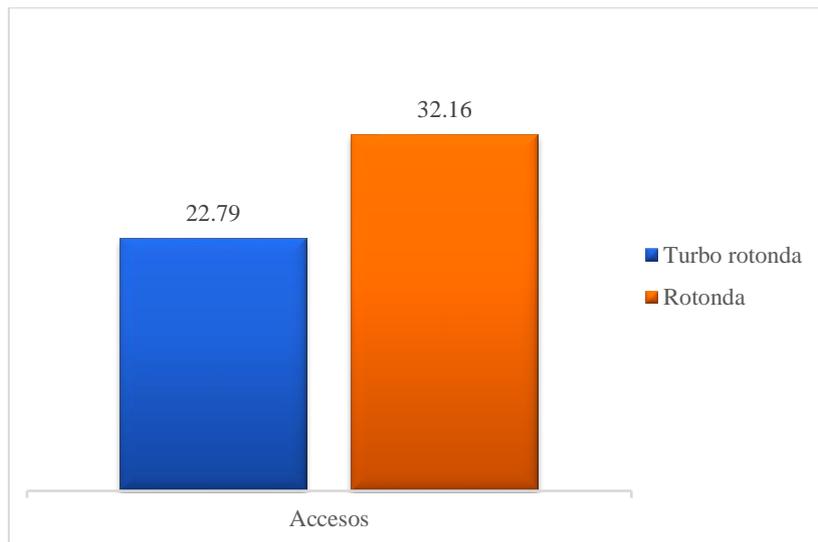
Figura 5.9: *Longitud de cola promedio (veh) año 2021*



Fuente: Propia

En la Figura 5.10 se observa que, en las condiciones futuras del viario, la turbo rotonda conserva ventaja a comparación de la rotonda demostrada en la longitud de cola promedio. La turo rotonda presenta una disminución del 29% en la cola promedio de vehículos a comparación de la rotonda en el año 2030.

Figura 5.10: Longitud de cola promedio (veh) año 2030



Fuente: Propia

## 6. Educación vial

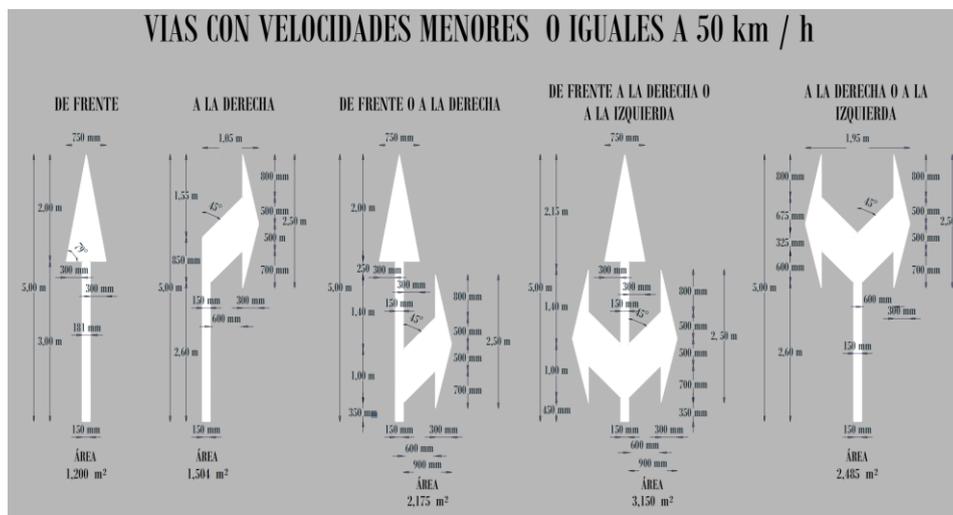
### 6.1. Alternativas de señalización

#### 6.1.1. Señalización Horizontal

Debido a que la turbo rotonda es un nuevo tipo de intersección que todavía no ha sido empleada en la ciudad, se recomienda no usar la señalización estándar, ya que si hay algo que caracteriza a esta intersección es su señalización horizontal, dibujando el radio exterior de la turbo rotonda y señalando sus salidas (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015). Este tipo de señalización deberá ser lo más clara y sencilla posible, ya que su objetivo es que los usuarios unos metros antes de ingresar a la intersección puedan tener claro el carril por el que deben transitar para lograr tomar la salida correcta según su destino evitando congestionamientos en la entrada de la turbo rotonda (Rodrigo Muñoz Barbero, 2015).

Para las medidas que tendrá este tipo de señalización nos basaremos en la normativa del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) en el cual se indica las medidas tanto del ancho y largo máximo de este tipo de señalización para vías iguales o menores a 50 km/h como se observa en la Figura 6.1.

Figura 6.1: Acotación de señalización horizontal

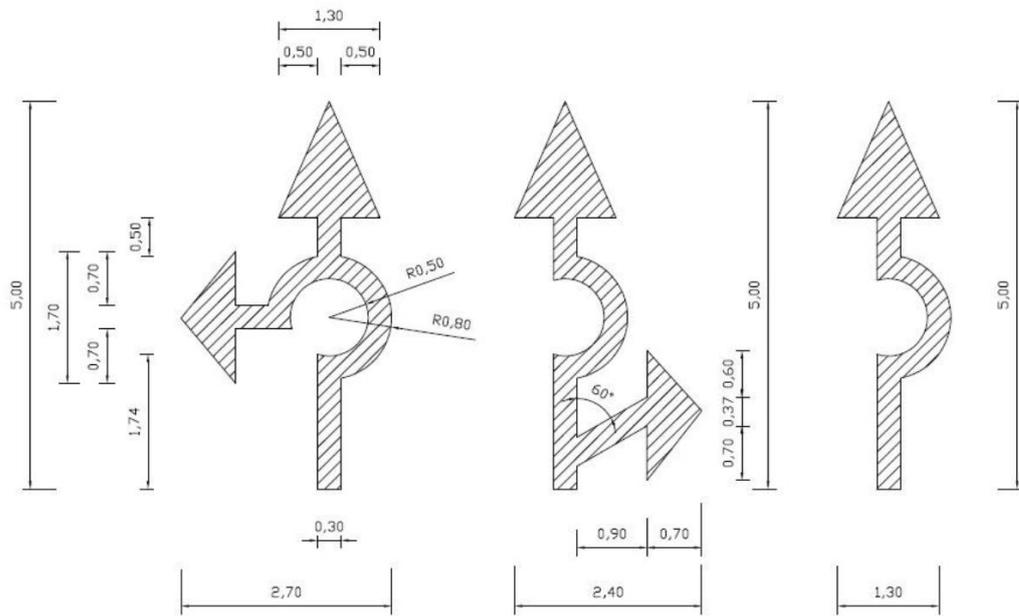


Fuente: (INEN, 2011)

Este tipo de señales deben ser de color blanco y se ubican horizontalmente sobre el pavimento en el centro del carril, debido a que el conductor ve primero la parte inferior del símbolo se recomienda que sean más alargadas en el sentido longitudinal para que el usuario pueda darse cuenta el sentido que deberá seguir al transitar por ese carril (INEN, 2011).

Para el caso de las turbo rotondas la señalización varía en relación a las de las rotondas debido a que en este nuevo tipo de intersección solo pueden tomar dos salidas por carril dependiendo el que tomen a la entrada de la intersección, debido a que no existe en el INEN medidas establecidas para este tipo de intersección se han adecuado de acuerdo a las medidas establecidas para la rotonda como se puede ver en la Figura 6.2.

Figura 6.2: Acotación de señalización horizontal para turbo rotondas.



Fuente: Propia

### 6.1.2. Señalización Vertical

Este tipo de señalización también es de gran importancia al momento de tomar la decisión del carril por el cuál transitar según su destino antes de llegar a la intersección, actualmente dentro de la intersección existen señales de ceda el paso, paso de peatones y señales de ciclovía, estas señales no serán modificadas ya que también son de importancia y se debe tomar en cuenta al momento de transitar por la zona.

Dentro de esta intersección además de las señales mencionadas anteriormente se deben implementar otro tipo de señales para que los usuarios tengan más facilidad al momento de tomar su carril, en estas señales se pondrá la ruta a la que puede acceder dependiendo del carril por el que transiten como se puede observar en la Figura 6.3.

Figura 6.3: *Ensamblaje de señales aéreas con asignación de carril*



Fuente: (INEN, 2011)

El número de letreros que se muestra en la Figura 6.3 varía de acuerdo al punto en el que se encuentre el ensamblaje, debido a que los usuarios que entran a la rotonda desde la Av. Solano dirección Sur-Norte y Av. Remigio Crespo solo cuentan con dos carriles.

## 6.2. Plan de concientización para el manejo de la propuesta

Para implementar esta alternativa en la ciudad de Cuenca, se considera oportuno y de gran importancia la realización de un plan para el manejo de esta propuesta; debido a que la mayoría de los usuarios desconoce su funcionamiento. De esta manera se logra que las personas que circulen por la turbo rotonda se familiaricen con la misma para evitar accidentes.

Dentro de las propuestas a considerar para el plan de manejo se encuentran:

- Implementar señalización horizontal, la cual será pintada sobre la vía y ayudará a una mejor orientación; de esta manera los usuarios podrán saber los giros que podrían realizar en base a su carril correspondiente.
- Colocar letreros como parte de la señalización vertical para saber cada uno de los destinos a los que les lleva el carril correspondiente que tomaron o deseen tomar antes de entrar a la intersección.
- Realizar material videográfico sobre el uso adecuado de la turbo rotonda y subirlo a las diferentes plataformas, en las cuales se indicará el correcto funcionamiento de la turbo rotonda para evitar accidentes y confusiones en los usuarios al momento de transitar por dicha intersección.
- Colocar pantallas led en las entradas de la intersección para que los usuarios puedan observar el funcionamiento de la misma y circulen de manera correcta.

## 7. Conclusiones

El propósito principal del estudio fue comparar los resultados de la modelación vehicular entre el escenario actual (rotonda) y el escenario propuesto (turbo rotonda); de esta manera, analizar la funcionalidad y efectividad de la propuesta usando el micro simulador Aimsun para comprobar si las condiciones se optimizan y mejora el nivel de servicio de la intersección, el cual comprobó que las condiciones mejoraron significativamente. Esto se evidenció que además de las mejores presentadas, los puntos de conflicto disminuyeron puesto que teóricamente la rotonda convencional tiene 24 puntos de conflicto y la turbo rotonda se desarrolla 14 puntos, esto mejora la seguridad vial dentro de la intersección por evitar entrecruzamientos y cambios de carril.

Debido a la geometría y las secciones transversales de las avenidas, se ha elegido el modelo de turbo rotonda básica para satisfacer estos parámetros, con una capacidad teórica de 3500 veh/hr. En base al diseño a nivel de prefactibilidad, se han aumentado un carril en los accesos este y oeste.

Este tipo de alternativa presenta ventajas y desventajas, basándonos en los resultados y discusiones del estudio se puede deducir que la turbo rotonda presenta mejoras funcionales tanto en el nivel de servicio, tiempo de demora, longitud de cola promedio y capacidad.

Por último, el estudio demostró que la turbo es una alternativa que provee una alternativa sostenible con una mejora significativa de la funcionalidad, optimización y rendimiento a comparación de la geometría actual de la intersección.

## **8. Recomendaciones**

Esta alternativa es relativamente nueva en el mundo, aún más en Latinoamérica; por lo que es imperativo que se realicen más estudios y profundicen la investigación para un diseño geométrico. Otro parámetro a considerar es las condiciones del viario en el cual se quiere implementar, es más factible utilizarlo en ciudades con alto flujo vehicular para que justifique su implementación y se optimice su uso.

Es necesario realizar más investigación en base a esta propuesta para optimizar el espacio dentro de la rotonda y observar si una solución factible es el aumento de carril en algunas zonas dentro de la turbo rotonda.

Además, para efectivizar y asegurar el funcionamiento adecuado de la turbo rotonda, es necesaria la educación vial, mejorar las condiciones de seguridad e implementación de separadores viales para evitar entrecruzamientos. Igualmente, es circunstancial la implementación de una adecuada señalética, tanto horizontal como vertical, que guíe al usuario por la correcta trayectoria para su destino. En el plano al final del documento se puede apreciar la señalización propuesta para la turbo rotonda.

## 9. Bibliografía

- Azcutia, A. M. (2011). *Gestión técnica del tráfico*. 27.
- BARBOSA, Y. A. A., TUNARROSA, J. A. O., & UN. (2015). *IMPLANTACIÓN DEL DISEÑO DE UNA TURBO GLORIETA COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN DE MOVILIDAD EN LA INTERSECCIÓN DE LA AV BOYACA CON CARRERA 1 EN EL BARRIO YOMASA, LOCALIDAD DE USME*. Universidad Católica de Colombia.
- Elhassy, Z., Abou-Senna, H., Shaaban, K., & Radwan, E. (2020a). The implications of converting a high-volume multilane roundabout into a turbo roundabout. *Journal of Advanced Transportation*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5472806>
- Elhassy, Z., Abou-Senna, H., Shaaban, K., & Radwan, E. (2020b). The implications of converting a high-volume multilane roundabout into a turbo roundabout. *Journal of Advanced Transportation*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5472806>
- EP PETROECUADOR. (2020). Informe estadístico anual, 2019. *Cuadernos de Trabajo Social*, 33(2), 441–441.
- Fortuijn, L. G. H. (2009). Turbo roundabouts Design Principles and Safety Performance. *Transportation Research Record*, 2096, 16–24. <https://doi.org/10.3141/2096-03>
- HCM. (2010). Highway Capacity Manual 2010 - Volume 3: Interrupted Flow. In *Environmental Protection*.
- INEN. (2011). *REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO Primera revisión*. 2(SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL), 103.
- Jaramillo Gonzaga, C. (2017). *ANALISIS Y REFORMA GEOMETRICA DE LA INTERSECCION ENTRE CIRCUNVALACION SUR Y LA VIA MONAY-BAGUANCHI*. 142.
- Mauro, R., & Branco, F. (2010). Comparative analysis of compact multilane roundabouts and turbo-roundabouts. *Journal of Transportation Engineering*, 136(4), 316–322. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000106](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000106)
- MTOP. (2003). Normas de Diseño Geometrico de Carreteras. *Mtop*, 2, 475. [https://snavarro.files.wordpress.com/2011/08/manual-dedisec3b1o-de-carretera\\_2003-ecuador.pdf](https://snavarro.files.wordpress.com/2011/08/manual-dedisec3b1o-de-carretera_2003-ecuador.pdf)
- Orozco Reinaldo, B., Rivera Sergio, T. D., Segura Edgar, S. Y., Aranzales Willan Germán, M., & Gómez Mary Luz, P. (2016). *Modelación Virtual: Un Medio Para Recrear Escenarios Del Mundo Real Y Solucionar Factores Que Afectan La Movilidad En Una Rotonda*.
- Pilko, H., Šarić, Ž., & Zovak, G. (2019). Turbo roundabouts: A brief safety, efficiency and geometry design review. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 52, pp. 3–12). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98618-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98618-0_1)

- PMEP. (2015). *Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca, 2015-2025*. <https://n9.cl/mi0a>
- Reyes, R. C. y M., & Cárdenas Grisales, J. (1994). *INGENIERÍA DE TRANSITO-FUNDAMENTOS Y APLICACIONES- Rafael Cal y Mayor Reyes + James Cardenas Grisales.pdf* (p. 532).
- Rodrigo Muñoz Barbero. (2015). *ESTUDIO DE IMPLANTACIÓN DE UNA TURBO ROTONDA EN ZARAGOZA*. ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA.
- Silva, A. B., Santos, S., & Gaspar, M. (2010). Turbo-roundabout use and design. *CITTA 6th Annual Conference on Planning Research*, 1–14.
- Silva, A. B., Vasconcelos, L., & Santos, S. (2014a). Moving from Conventional Roundabouts to Turbo-roundabouts. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *111*, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.046>
- Silva, A. B., Vasconcelos, L., & Santos, S. (2014b). Moving from Conventional Roundabouts to Turbo-roundabouts. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *111*, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.046>
- Silvera, M. (2013). *Ingeniería de Tránsito*. [https://issuu.com/bertoni\\_salazar/docs/clase\\_4\\_-\\_ing.\\_de\\_transito](https://issuu.com/bertoni_salazar/docs/clase_4_-_ing._de_transito)
- Valenzuela-ñañez, J. (2017). *DISEÑO COMPARATIVO COMO ALTERNATIVA ENTRE TURBO ROTONDA CONVENCIONAL, MEDIANTE LA MICROSIMULACIÓN DE TRÁNSITO*.

## 10. Anexos

Tabla 10.1: *Conteo automático*

HORAS	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB	DOM	LUN
00:00 - 01:00	90	87	146	373	614	512	38
01:00 - 02:00	28	50	60	191	491	365	26
02:00 - 03:00	20	37	37	78	443	279	13
03:00 - 04:00	8	5	19	67	237	176	5
04:00 - 05:00	38	26	34	26	126	82	19
05:00 - 06:00	52	49	50	114	87	58	90
06:00 - 07:00	556	531	514	487	219	97	543
07:00 - 08:00	1011	1064	1014	974	479	232	1023
08:00 - 09:00	1183	1111	1139	1165	726	299	1106
09:00 - 10:00	1124	1191	1238	1132	1017	403	1220
10:00 - 11:00	1241	1156	1194	1138	1109	531	1170
11:00 - 12:00	1159	1173	1159	1136	1114	671	1126
12:00 - 13:00	1159	1108	1068	1170	1227	805	1088
13:00 - 14:00	983	1029	995	1082	1068	803	1086
14:00 - 15:00	1089	1077	1056	1097	883	773	1145
15:00 - 16:00	1263	1174	1276	1286	958	818	1108
16:00 - 17:00	1273	1221	1238	1108	1094	912	1250
17:00 - 18:00	1192	1085	1077	1039	1029	827	1064
18:00 - 19:00	1103	1061	1014	959	1086	803	1030
19:00 - 20:00	1088	1018	1033	877	892	747	995
20:00 - 21:00	953	961	1020	882	1021	687	853
21:00 - 22:00	664	767	923	909	941	462	646
22:00 - 23:00	446	490	932	998	905	293	393
23:00 - 24:00	228	293	612	923	682	132	190
Total	17951	17764	18848	19211	18448	11767	17227
%	14.81%	14.65%	15.55%	15.85%	15.22%	9.71%	14.21%

Fuente: Propia

Tabla 10.2: *Conteo volumétrico clasificado*

<b>CONTEO VOLUMETRICO CLASIFICADO</b>				
<b>INTERSECCION:</b>		<b>AV SOLANO Y AV REMIGIO CRESPO</b>		
<b>FLUJO C/15 MINUTOS</b>		<b>LIVIANOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>CAMIONES</b>
7:30	7:45	546	14	11
7:45	8:00	766	17	25
8:00	8:15	868	20	23
8:15	8:30	813	16	22
8:30	8:45	847	19	35
8:45	9:00	890	19	26
9:00	9:15	884	19	22
9:15	9:30	906	18	28
9:30	9:45	866	14	20
9:45	10:00	866	19	21
10:00	10:15	888	18	32
10:15	10:30	899	19	26
10:30	10:45	938	15	32
10:45	11:00	992	17	31
11:00	11:15	991	17	28
11:15	11:30	920	17	34
11:30	11:45	1056	17	28
11:45	12:00	1025	20	19
12:00	12:15	1023	13	19
12:15	12:30	1030	19	26
12:30	12:45	942	18	20
12:45	13:00	998	17	18
13:00	13:15	1058	17	20
13:15	13:30	1000	18	16
13:30	13:45	922	19	18
13:45	14:00	874	19	16
14:00	14:15	835	18	17
14:15	14:30	859	17	9
14:30	14:45	882	14	10
14:45	15:00	999	18	18
15:00	15:15	935	16	24
15:15	15:30	937	18	22
15:30	15:45	883	16	21
15:45	16:00	908	15	15
16:00	16:15	882	14	15
16:15	16:30	833	16	16
16:30	16:45	845	16	19

16:45	17:00	814	15	16
17:00	17:15	803	12	15
17:15	17:30	794	17	12
17:30	17:45	860	16	18
17:45	18:00	868	16	19
18:00	18:15	932	15	15
18:15	18:30	960	17	11
18:30	18:45	953	22	9
18:45	19:00	973	19	12
19:00	19:15	977	15	14
19:15	19:30	993	16	10

Fuente: Propia

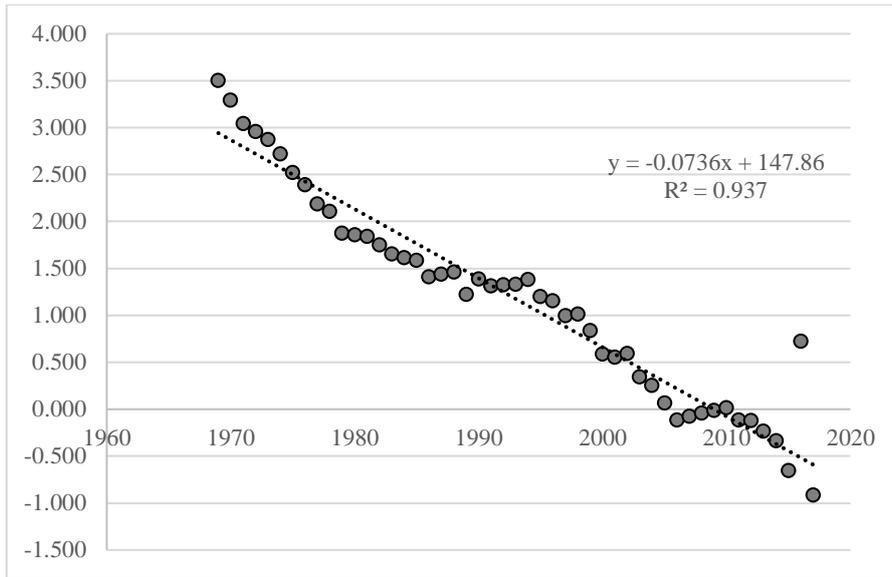
Tabla 10.3: *MÉTODO LOGIT*

LIVIANOS						
AÑOS	HAB.	VEHLI VIANOS	TM 1000*VEH/HA B	Ln (TS/TM-1)	Tm ajustado	Livianos ajustados
1969	324452.9226	1935	5.964	3.501	10.208	3312
1970	332491.207	2435	7.324	3.288	10.945	3640
1971	340787.2215	3173	9.311	3.038	11.733	3999
1972	349350.9847	3529	10.102	2.953	12.574	4393
1973	358192.9449	3921	10.947	2.868	13.471	4826
1974	367324	4638	12.626	2.716	14.427	5300
1975	375599.8295	5710	15.202	2.517	15.445	5802
1976	384154.3547	6588	17.149	2.386	16.529	6350
1977	392999.1391	8106	20.626	2.183	17.682	6949
1978	402146.2604	8877	22.074	2.107	18.907	7604
1979	411608.3338	11193	27.193	1.870	20.208	8318
1980	421398.5363	11632	27.602	1.853	21.587	9097
1981	431530.6322	12070	27.970	1.837	23.049	9947
1982	442019	13383	30.276	1.745	24.597	10873
1983	449307.6576	14695	32.706	1.654	26.234	11788
1984	456789.4747	15453	33.830	1.613	27.962	12773
1985	464470.5064	16113	34.691	1.583	29.785	13835
1986	472357.0054	18887	39.985	1.409	31.706	14977
1987	480455.428	18847	39.226	1.433	33.727	16205
1988	488772.4411	18806	38.476	1.457	35.849	17522
1989	497314.9288	23028	46.305	1.223	38.075	18936
1990	506090	20648	40.799	1.384	40.406	20450
1991	513256.9827	22202	43.257	1.310	42.843	21990
1992	520664.1636	22353	42.932	1.320	45.385	23631

1993	528319.5222	22504	42.595	1.330	48.034	25378
1994	536231.303	21940	40.915	1.380	50.787	27234
1995	544408.0242	25658	47.130	1.200	53.644	29205
1996	552858.4873	27067	48.958	1.150	56.603	31294
1997	561591.7861	30957	55.124	0.991	59.659	33504
1998	570617.3163	31006	54.338	1.011	62.810	35841
1999	579944.7862	35703	61.563	0.836	66.051	38306
2000	589584.2261	42924	72.804	0.586	69.377	40904
2001	599546	44586	74.366	0.553	72.781	43636
2002	611107.7474	44282	72.462	0.593	76.258	46602
2003	622895.5397	52737	84.664	0.340	79.800	49707
2004	634913.8543	56664	89.247	0.248	83.398	52951
2005	647167.2588	63779	98.551	0.064	87.044	56333
2006	659660.4118	71180	107.904	-0.120	90.730	59851
2007	672398.066	71206	105.899	-0.081	94.445	63505
2008	685385.0688	71232	103.930	-0.042	98.180	67292
2009	698626.3654	71599	102.485	-0.013	101.925	71208
2010	712127	71965	101.056	0.015	105.669	75251
2011	725892.1181	78243	107.789	-0.118	109.404	79416
2012	739926.9684	79906	107.992	-0.122	113.117	83699
2013	754236.9054	85904	113.895	-0.239	116.800	88096
2014	768827.3907	91431	118.923	-0.340	120.444	92601
2015	783703.9958	105061	134.057	-0.656	124.039	97210
2016	798872.4044	53259	66.668	0.720	127.577	101918
2017	814338.4142	118441	145.444	-0.917	131.049	106719
2018	830107.9394				134.449	111607
2019	846187.0134				137.769	116579
2020	862581.7908				141.004	121628
2021	879298.5499				144.149	126751
2022	896343.6955				147.199	131941
2023	913723.7614				150.151	137197
2024	931445.4126				153.001	142513
2025	949515.4487				155.748	147885
2026	967940.8058				158.389	153312
2027	986728.5601				160.925	158790
2028	1005885.93				163.355	164317
2029	1025420.28				165.679	169891
2030	1045339.122				167.898	175511

Fuente: Propia

Figura 10.1: *Constantes a, b de la tasa de motorización*



Fuente: Propia

Tabla 10.4: *Flujo vehicular por giro 2021*

	Giros	Norte				Sur				Este				Oeste			
		Der.	Frente	Izq.	"U"	Der.	Frente	Izq.	"U"	Der.	Frente	Izq.	"U"	Der.	Frente	Izq.	"U"
Tipo	Livianos	375	647	314	28	420	339	227	32	156	324	368	11	257	499	78	64
	Buses	11	32	0	0	11	14	0	0	0	0	2	0	0	4	0	0
	Camiones	4	22	8	2	8	4	8	4	3	10	8	0	7	14	4	0
	Total	390	701	322	30	439	357	235	36	159	334	378	11	264	517	82	64
	%	27%	49%	22%	2%	41%	33%	22%	3%	18%	38%	43%	1%	28%	56%	9%	7%

Fuente: Propia

Tabla 10.5: *Flujo vehicular por giro 2030*

	Giros	Norte				Sur				Este				Oeste			
		Der.	Frente	Izq.	"U"	Der.	Frente	Izq.	"U"	Der.	Frente	Izq.	"U"	Der.	Frente	Izq.	"U"
Tipo	Livianos	520	896	435	39	582	470	315	45	217	449	510	16	356	691	109	89
	Buses	14	39	0	0	14	17	0	0	0	0	3	0	0	5	0	0
	Camiones	5	27	10	3	10	5	10	5	4	12	10	0	9	17	5	0
	Total	539	962	445	42	606	492	325	50	221	461	523	16	365	713	114	89
	%	27%	48%	22%	2%	41%	33%	22%	3%	18%	38%	43%	1%	28%	56%	9%	7%

Fuente: Propia

Tabla 10.6: *GEH 2021*

Volumen horario de máxima demanda					
Acceso	Modelado	Campo	Diferencia absoluta	Diferencia relativa (%)	GEH
	Flujo entrada (veh/he)	Flujo entrada (veh/hr)			
Norte	1207.2	1401	-193.8	-13.833	5.367
Sur	954.6	1034	-79.4	-7.679	2.518
Este	788.2	854	-65.8	-7.705	2.296
Oeste	897.2	899	-1.8	-0.2	0.06
Media	962	1047	-85	-8.138	2.682

Fuente: Propia

Tabla 10.7: *GEH escenario propuesto 2021*

Volumen horario de máxima demanda					
Acceso	Modelado	Campo	Diferencia absoluta	Diferencia relativa (%)	GEH
	Flujo entrada (veh/hr)	Flujo entrada (veh/hr)			
Norte	1220.6	1401	-180.4	-12.88%	4.983
Sur	951.4	1034	-82.6	-7.99%	2.622
Este	818.6	854	-35.4	-4.15%	1.224
Oeste	695.6	899	-203.4	-22.63%	7.203
Media	921.55	1047	-125.45	-11.98%	3.999

Fuente: Propia

