

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

**Simulación de Tráfico en el Tramo de la Av.
Interoceánica Comprendido entre la Calle González
Suárez y Francisco Pizarro**

Andrea Verónica Ayala Trujillo

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención
del título de Magíster en Matemáticas Aplicadas

Quito, Abril 2012

Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Posgrados

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Simulación de Tráfico en el Tramo de la Av.
Interoceánica Comprendido entre la Calle González
Suárez y Francisco Pizarro**

Andrea Verónica Ayala Trujillo

Carlos Jimenez, Ph.D.
Director de la Maestría en Matemática Aplicada
Director de Tesis

Eduardo Alba, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

Santiago Gangotena, Ph.D.
Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Victor Viteri, Ph.D.
Decano del Colegio de Posgrados

Quito, Abril 2012

© **Derechos de autor**
Andrea Verónica Ayala Trujillo
2012

Dedicado a mi familia, mis amigos que me han acompañado durante este tiempo y han sido un apoyo para dar este paso y a mis profesores de quienes he aprendido más cosas que las escritas en un libro.

Resumen

La Avenida Interoceánica ha sufrido un incremento en la congestión vehicular debido al crecimiento poblacional y a la carencia de infraestructura adecuada para soportar el parque automotor de los valles. Por este motivo, se piensa que una solución es modificar el tiempo de los semáforos o sincronizarlos para reducir la congestión.

El objetivo de este trabajo, es obtener ciclos óptimos que reduzcan la congestión vehicular, por lo cual se ha simulado un tramo de la Av. Interoceánica utilizando la interfaz de Netlogo. El tramo comprende cuatro intersecciones semaforizadas entre las calles González Suarez y Francisco Pizarro. Para la simulación se consideró los datos recolectados durante las horas de mayor afluencia de la mañana, con los cuales se obtuvo volúmenes de tráfico, distribuciones de llegada, parámetros de teoría de colas, rutas dominantes entre otros. El modelo simulado permite modificar los tiempos de los semáforos y observar posibles cambios en parámetros como: número de autos detenidos, tiempo de viaje y tiempo de espera.

Se simularon 4 escenarios y el escenario real, con estos se hizo una comparación entre las medias de los tres parámetros para determinar si existe una reducción en la congestión vehicular. Se observó que, en el mejor escenario, al prolongar los ciclos de semaforización y sincronizarlos, existe una reducción del 5% en el número de autos detenidos, mientras que los otros dos parámetros permanecen similares al real.

Abstract

Interoceanica Avenue has suffered a several increase on traffic due to population growth and also due to the lack of the appropriate infrastructure needed to support the permanent growing number of vehicles in these valleys. For this reason, modifying the time of traffic lights or synchronizing them might be a solution for this issue.

The objective of this thesis is to obtain optimal traffic light cycles for reducing traffic. In order to achieve this goal, a simulation of a section of the avenue evaluated was developed using Netlogo inter-phase. The section includes 4 traffic lights intersections between the streets Gonzalez Suarez and Francisco Pizarro. For the simulation, data was collected during rush hour in the morning. After data analysis, information regarding traffic volume, dominant routes, queue theory parameters, among others, was obtained. The simulation allows to modify traffic light cycles and to identify possible variations in parameters such as: number of stopped vehicles, travel time and waiting time.

Four scenarios were simulated plus the real one. A comparison between the average of the three parameters was made, in order to define if there is a reduction on the traffic jam. Results showed that, on the best scenario, extending the cycles of traffic lights and synchronizing them reduces 5% the number of stopped vehicles, while the other two parameters remain similar to the real scenario.

Índice general

Dedicatoria	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Índice general	vii
1. Introducción	1
1.1. Motivación del Trabajo	1
1.2. Delimitación del Tema de Estudio	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
2. Base Teórica de Ingeniería de Tránsito	4

2.1. Conceptos Básicos de Ingeniería de Tránsito	4
2.1.1. Tipos de Vehículos	4
2.1.2. Condiciones Ideales de Carretera	5
2.1.3. Tipos de Conflictos de Tránsito	6
2.1.4. Semáforos	7
2.1.5. Distribución de los Tiempos del Semáforo	9
2.1.6. Capacidad Vial (Q)	11
2.1.7. Vehículos Equivalentes.-	14
3. Simulación y Teoría de Colas	16
3.1. Teoría de Colas	16
3.1.1. Objetivos de la Teoría de Colas	17
3.1.2. Conceptos Básicos en Teoría de Colas	17
3.1.3. Medidas de Desempeño	19
3.1.4. Tipos de Colas	20
3.1.5. Distribuciones de Probabilidad Básicas para Teoría de Colas	21
3.2. Teoría de Simulación	26
3.2.1. Sistema	27

3.2.2. Modelo	27
3.2.3. Simulación	28
3.2.4. Ventajas y Desventajas de la Simulación	29
4. Descripción y Datos de la Zona de Estudio	30
4.1. Descripción de la Zona de Estudio	30
4.1.1. Descripción de Interseccion A	33
4.1.2. Descripción de Interseccion B	33
4.1.3. Descripción de Interseccion C	34
4.1.4. Descripción de Interseccion D	35
4.2. Recolección de Datos	35
4.2.1. Fecha y Hora para la Recolección de Datos	36
4.2.2. Entradas y Llegadas al Sistema	37
4.2.3. Análisis de Datos de Intersección A	38
4.2.4. Análisis de Datos de Intersección B	43
4.2.5. Análisis de Datos de Intersección C	46
4.2.6. Análisis de Datos de Intersección D	50
4.3. Ajuste de Distribuciones de Llegadas para cada Entrada del Sistema . .	54

5. Modelación y Análisis de Tráfico en Netlogo	56
5.1. Selección de Rutas	56
5.1.1. Rutas en Intersección A	57
5.1.2. Rutas en Intersección B	58
5.1.3. Rutas en Intersección C	59
5.1.4. Rutas en Intersección D	60
5.2. Entorno Netlogo	62
5.2.1. Interfaz del Modelo en Netlogo	62
5.2.2. Variables y Comandos de Programación	66
5.3. Validación del Modelo	74
5.3.1. Mapa de la Zona de Estudio	74
5.3.2. Tiempo y Espacio	75
5.4. Datos Obtenidos de Simulaciones	77
5.4.1. Simulación Escenario Real	78
5.4.2. Simulación Escenario Propuesto 1	80
5.4.3. Simulación Escenario Propuesto 2	82
5.4.4. Simulación Escenario Propuesto 3	85
5.4.5. Simulación Escenario Propuesto 4	88

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	xi
5.5. Comparación de Resultados entre Escenarios	92
6. Conclusiones y Recomendaciones	94
Anexo	98
A. Fases de Intersecciones A - D	99
A.1. Fases de la Intersección A	100
A.2. Fases de la Intersección B	102
A.3. Fases de la Intersección C	105
A.4. Fases de la Intersección D	107
B. Gráficos de Ajuste de Distribuciones de Llegada	110
C. Gráficas de Pareto para Discriminar Rutas	121
D. Análisis entre Medias Poblacionales de los Parámetros	126
Bibliografía	135
Indice de tablas	136
Índice de figuras	140

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación del Trabajo

Tumbaco, es un valle de la ciudad de Quito que se convirtió en parroquia el 8 de diciembre de 1670. Su población oscila alrededor de 38500 habitantes. Cuenta con transporte público, una de las empresas que brinda este servicio es el Ecovia con sus alimentadores cuya parada en Quito es en la avenida Río Coca, se calcula que el tiempo de viaje entre Quito y Tumbaco es de aproximadamente 40 minutos. Su vía principal es la Av. Interoceánica, la cual en un futuro cercano, será la vía de comunicación con el Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito (NAIQ), lo cual provocará un aumento en el flujo. Para evitar el colapso de la Av. Interoceánica la EPMMOP ha propuesto varias soluciones, como la construcción de la Ruta VIVA, la ampliación de la Vía Interoceánica y el mejoramiento de las rutas zonales y locales

Un estudio de la Corporación Aeropuerto de Quito (CORPAQ) determinó que por la vía Interoceánica circulan alrededor de 20000 automoviles diarios, a los cuales se suman 160 unidades de transporte público que transportan un promedio de 30 mil personas en un día. Uno de los principales motivos para que el flujo vehicular se haya visto incrementado en los últimos años, es el crecimiento poblacional que se calcula del 10% anual. Por estos motivos, la caotización del tráfico vehicular de la zona ha llevado a convertir un tramo de la Av. Interoceánica en la zona de estudio del presente trabajo, tramo comprendido desde las calles González Suárez y Francisco Pizarro a lo largo de la Avenida Interoceánica. Lo que se busca es modelar la situación actual del tráfico de la zona para luego establecer tiempos de semáforización óptimos para ayudar a la descongestión del tramo.

1.2. Delimitación del Tema de Estudio

El trabajo tiene como objetivo realizar un modelo del trafico vehicular de la zona de Tumbaco, comprendido entre las calles Gonzáles Suárez y Francisco Pizarro a lo largo de la Avenida Interoceánica. Se incluirán en el estudio las cuatro intersecciones semaforizadas que se tienen en el tramo. El estudio se realizará durante las horas pico de la mañana, es decir, de 7h00 a 9h00. Lo que se busca es una solución del trafico vehicular en función del tiempo de los ciclos de semáforo a través de la simulación.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Establecer tiempos de semaforización óptimos para reducir la congestión vehicular en el tramo de la Avenida Interoceánica delimitado por las calles Gonzáles Suárez y Francisco Pizarro.

1.3.2. Objetivos Específicos

Recopilar bibliografía referente a Ingeniería de Tránsito y Teoría de Colas.

Realizar una descripción detallada del tramo de estudio.

Obtener datos de la llegada de vehículos al sistema para su análisis estadístico.

Analizar los datos a partir de factores dispuestos por la Ingeniería de Tránsito.

Modelar el sistema actual utilizando Netlogo.

Simular escenarios variando el tiempo de los semáforos de las intersecciones.

Obtener datos acerca de los siguientes parámetros: número de autos detenidos, tiempos de espera y tiempos de viaje, para todas las simulaciones.

Analizar y comparar los parámetros para establecer el tiempo óptimo de ciclo.

Capítulo 2

Base Teórica de Ingeniería de Tránsito

2.1. Conceptos Básicos de Ingeniería de Tránsito

La Ingeniería de Tránsito se ocupa del estudio del componente espacial del tráfico urbano, es decir la vía. Para este estudio es necesario conocer algunos de los conceptos básicos:

2.1.1. Tipos de Vehículos

Los vehículos en proyectos de tránsito se clasifican como livianos y pesados (carga y transporte público), es importante mencionar que al realizar un proyecto se considera

un vehículo de proyecto, el cual es un vehículo equivalente, de modo que se facilite el cálculo. A continuación se presentan las características principales de los tres tipos de vehículos a ser considerados en la investigación:

Característica	Liviano	Carga	Pesado
Longitud Promedio	5m	7m	10.6m
Longitud entre Ejes	3m	4m	6.4m
Altura Promedio	1.50m	2.80m	3.20m

Tabla 2.1: Vehículos Pesados y Livianos

2.1.2. Condiciones Ideales de Carretera

Como se menciona en Cerquera, Flor (2007) existen condiciones ideales que se esperan de una vía o carretera para asegurar un flujo de tránsito constante como son:

- Repartición del tránsito por igual en ambos sentidos.
- Carriles de no menos de $3.65m$
- Una distancia de $1.8m$ entre el borde de la calzada exterior y los obstáculos u objetos adyacentes a la vía o separador.
- Velocidad de proyecto de $100km/h$ para vías de 2 carriles y de $110km/h$ para vías multicarril y autopista.
- Flujo constituido por vehículos ligeros. Ausencia de vehículos pesados.

- Superficie de rodadura en condiciones óptimas.
- Visibilidad adecuada para adelantar.
- Señalización horizontal y vertical óptima.
- Terreno llano y rasante horizontal.

2.1.3. Tipos de Conflictos de Tránsito

Durante el tránsito de vehículos existen ciertos conflictos que deben regularizarse, como lo cita James Gibson (2011), la presencia de un vehículo condiciona la circulación de otros, y por este motivo aparecen tres tipos de conflictos: Concurrenciales, direccionales y funcionales. Los conflictos concurrenciales se producen entre vehículos que circulan en la misma vía y sentido pero a velocidades diferentes, los direccionales ocurren en las intersecciones, y por último los conflictos funcionales que ocurren cuando diferentes vehículos hacen uso antagónico de un sector de la vía.

Estos conflictos tienen como consecuencia final el congestionamiento, el cual para ser evaluado considera los siguientes criterios:

- a) La suma de las longitudes de las colas de cada vía, las cuales se generan cuando los usuarios llegan a una estación de servicio, como es el caso de los semáforos.
- b) El tiempo de espera

- c) El largo de la cola más larga o una combinación de ella

2.1.4. Semáforos

Los semáforos son dispositivos electromagnéticos y electrónicos proyectados específicamente para facilitar el control del tránsito vehicular y peatonal. Las ventajas y desventajas de su uso se encuentran descritas en la siguiente tabla:

Ventajas	Desventajas
Ordena circulación de tránsito Reduce accidentes Promueve una circulación constante Dispositivo de control más económico	Gastos injustificados Causan demoras por el tiempo de la luz roja Pérdidas de tiempo cuando no se requiere control Ocasiona accidentes por cambios tempestivos de color

Tabla 2.2: *Ventajas y Desventajas del Uso de Semáforos, Secretaría de Comunicación y Transportes 1984*

Estos dispositivos de tránsito tienen sus etapas delimitadas en función del color que presenten, ya sea este amarillo, rojo o verde. La combinación de las luces de los semáforos dependen del *ciclo del semáforo*, explicado por Pedreira, Luis y Lema, Carmen (1998) se debe estudiar el ciclo del semáforo según tres puntos de vista diferentes:

La longitud en tiempo completo de los semáforos.- La duración del ciclo tiene que estar comprendida entre los límites que fija la psicología del conductor, es decir no deben ser ciclos menores a *35seg.* ni mayores a *120seg.* ya que según lo menciona Sánchez-Toscano Barbero (2003) no se acomodan a la mentalidad del usuario.

El porcentaje de tiempo indicado para cada una de las fases.- Es decir el porcentaje del tiempo indicado a cada una de las combinaciones de cambios de luz que permiten uno o varios movimientos simultáneos en la intersección.

Las transiciones entre semáforos consecutivos.- Indican el tiempo desde que un semaforo pasa a estado verde hasta que el siguiente semáforo pasa a verde.

Estas etapas de los semáforos, pueden ser dispuestas en tiempos fijos o pueden variar en función del flujo vehicular. Por su parte, los semáforos de tiempo fijo, se adaptan en las intersecciones donde los patrones de tránsito son estables, tienen algunas ventajas:

- Facilitan la coordinación con semáforos adyacentes.
- No dependen de detectores.
- El costo de un semáforo de tiempo fijo es menor que el del equipo accionado por el tránsito y su conservación es más sencilla.

Mientras que los semáforos que fijan su ciclo en función del flujo vehicular de cada instante, se denominan semáforos inteligentes y tienen dispositivos de control que verifican el tamaño de cola a cada instante, para enviar esta información al semáforo el cual se activa o desactiva en función de dicha información.

2.1.5. Distribución de los Tiempos del Semáforo

Al momento de definir los tiempos de los semáforos el unico fin es obtener el mínimo de demoras, por lo que cada fase debería incluir el mayor número de movimientos simultáneos. La distribución de tiempos depende principalmente del volúmen de tránsito. La distribución da como resultado el *ciclo del semáforo*, que no es mas que el tiempo necesario para que se realice una revolución completa, es decir que se tenga una secuencia completa de todas las fases del semáforo, este ciclo queda determinado por:

- **Fase.**- Parte del ciclo asignada a cualquier combinación de movimientos.

- **Secuencia de fases.**- Orden en que ocurren las fases del ciclo.

- **Reparto.**- Porcentaje de la longitud del ciclo para cada fase.

- **Intervalo todo rojo.**- Tiempo de exposición de una indicación roja para todo el transito que se prepara a circular.

•**Intervalo de cambio de fase.**- Intervalo que consiste de la fase de amarillo más la fase de rojo.

En una intersección semaforizada, se tiene los siguientes puntos a considerarse, para modelar la disipación de las colas que se forman. Durante el período rojo la tasa de descarga es nula, al comenzar el periodo verde los vehículos empiezan a salir de la cola y rápidamente se tiene una tasa constante, al inicialr el amarillo disminuye hasta el cero donde se inicia el rojo. La tasa de descarga durante el verde se denomina flujo de saturación S . Es necesario obtener el tiempo del verde efectivo y rojo efectivo para cada intersección dado por:

•**Verde Efectivo.**- Dado por $V_e = V + \lambda_1 + \lambda_2$

•**Rojo Efectivo.**- Dado por $R_e = C - V_e$ donde:

$\lambda_1 =$ Pérdida de verde

$\lambda_2 =$ Ganancia de amarillo

$C =$ Tiempo de ciclo del semáforo dado por $C = V + A + R$, donde V , es la etapa verde, A es la etapa de luz amarilla, y R es la etapa de luz roja.

F.V. Webster (1958) demostró que la demora mínima de todos los vehículos en una intersección con semáforo, se puede obtener para una longitud de ciclo óptimo de:

$$C_o = \frac{1.5T + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\varphi} Y_i} \quad (2.1)$$

Donde: C_O = Tiempo óptimo de ciclo s

T = Tiempo total perdido por ciclo s

Y_i = Máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso de la fase i

φ = Número de fases

Se puede notar que el tiempo óptimo de ciclo depende del tiempo perdido por la reacción del conductor. Es evidente que el tiempo perdido de ciclo, es mayor dependiendo del número de fases que se tenga en el sistema, por este motivo el tiempo óptimo se incrementará al incrementar las fases.

2.1.6. Capacidad Vial (Q)

La capacidad es la tasa máxima de flujo que puede soportar una vía, es decir es el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto de una vía en un intervalo de tiempo dado. Para determinar la capacidad vial, se debe tomar un lapso de tiempo de 15 minutos, el cual es el tiempo necesario para obtener un flujo estable, además que se debe determinar cuál es la infraestructura vial de la zona y las condiciones de tránsito a la que está expuesta la vía, teniendo en cuenta estos elementos la capacidad de la vía da lugar a las siguientes características:

⇒ Existe una circulación continua, cuando la infraestructura no cuenta con ele-

mentos fijos externos al flujo de tránsito, tales como semáforos que podrían producir interrupciones en el mismo.

⇒ Existe una circulación discontinua, si existen elementos fijos que producen dichas interrupciones periódicas en el flujo vehicular.

Volúmen de Tránsito.-

El volúmen de tránsito es el número de vehículos que pasan por un punto de una calzada durante un periodo determinado de tiempo. Se define por la siguiente función:

$$Q = \frac{N}{T} \quad (2.2)$$

Donde: Q = Vehículos que pasan por cada unidad de tiempo *vph*

N = Número de vehículos que pasan en un tiempo determinado

T = Período determinado *UnidadesdeTiempo*

El volúmen de tránsito depende del período de tiempo durante el cuál se lo calcula, por este motivo se puede calcular el volúmen de transito anual, mensual, semanal, diario y horario.

En este estudio, se obtendrá el total de vehículos que pasan por una intersección durante 15 minutos, es decir, se obtendrá la tasa de flujo (q). Específicamente las tasas

de flujo (q) sirven para analizar flujos máximos, analizar variaciones del flujo dentro de las horas de máxima demanda, analizar las limitaciones de capacidad en el flujo de tránsito y analizar las características de los volúmenes máximos.

Variación de Volumen de Tráfico en la Hora de Máxima Demanda.-

Es importante conocer cuál es el volumen de tránsito a la hora de máxima demanda para cuantificar la duración de los flujos máximos y poder realizar una planeación de los controles de tránsito tales como la disposición de los tiempos de los semáforos lo cuál es de interés durante esta investigación.

El volumen horario de máxima demanda, se obtiene a partir de un período corto de hora ($5, 10, 15 \text{ min}$) en el cual la tasa de flujo es mucho mayor al resto de la hora. A partir de este volumen, se obtiene el factor de la hora de máxima demanda FHMD, que no es más que la relación entre el *volumen horario de máxima demanda*, VHMD, y el *flujo máximo*, q_{max} :

$$FHMD = \frac{VHMD}{N(q_{max})} \quad (2.3)$$

Donde:

N = Número de períodos durante la hora de máxima demanda.

Cal, Rafael (2000) señala la importancia de considerar períodos inferiores a una

hora en el análisis de flujos vehiculares, pues su frecuencia de paso es mucho mayor que la de los volúmenes horarios.

2.1.7. Vehículos Equivalentes.-

Si en una intersección semaforizada se tendría que todos los vehículos continúan de frente, las tasas de flujo serían máximas, además que si se considerara vehículos equivalentes también se lograría maximizar dicha tasa. Para ello se requiere calcular en una primera instancia el factor de ajuste por efecto de vehículos pesados:

$$f_{VP} = \frac{100}{100 + P_C(E_C - 1) + P_B(E_B - 1)} \quad (2.4)$$

Donde:

f_{VP} = Factor de ajuste por efecto de vehículos pesados

P_C = Porcentaje de camiones

P_B = Porcentaje de autobuses

E_C = Automóviles equivalentes a un camión

E_B = Automóviles equivalentes a un autobús

El factor anterior, permite convertir el volumen de vehículos, en vehículos equivalentes. De modo que se pueda simplificar aumentando el número de vehículos, pero

sin diferenciar entre camiones, autobuses y livianos.

Del mismo modo, se puede convertir los vehículos en vehículos directos. Al hacer esto, se considera que los vehículos no dan vuelta, a continuación se muestra este cálculo:

$$q_{ADE} = \frac{VHMD}{FHMD} \frac{1}{f_{VP}E_V} \quad (2.5)$$

Donde:

VHMD= Volumen horario de máxima demanda

f_{VP} = Factor de equivalencia de vehículos pesados

E_V = Factor de giro, tomado en este trabajo como 1.2.

En la ecuación, se puede ver que para calcular vehículos equivalentes, se divide el volumen horario de máxima demanda para el factor de equivalencia, giro y factor de hora de máxima demanda. Al realizar este cálculo, el número de vehículos se incrementa, reemplazando *longitudes de vehículos pesados y el tiempo de espera producido por los giros de los vehículos* por un número superior de vehículos, considerándolos como vehículos equivalentes. En el trabajo esto permitirá modelar para un solo tipo de vehículo.

Capítulo 3

Simulación y Teoría de Colas

3.1. Teoría de Colas

La teoría de colas, como lo menciona Cooper (1981), se basa en el estudio de las colas o líneas de espera, a través de un sinnúmero de modelos matemáticos utilizados para caracterizarlas cualitativa y cuantitativamente, de modo que se pueda optimizar el tiempo de espera en la cola. Un estudio de Estados Unidos concluyó que una persona promedio pasa alrededor de cinco años de su vida esperando en distintas líneas de espera, y de esos cinco años, al menos seis meses esperando que cambie la luz en los semáforos.

3.1.1. Objetivos de la Teoría de Colas

Los objetivos de la Teoría de Colas, dados por Moskowitz y Wright (1991), consisten en:

- Identificar el nivel óptimo del sistema que minimiza el costo total del servicio del mismo.
- Evaluar las alternativas de modificación a diferentes aspectos del sistema que podrían modificar el costo del mismo.
- Lograr un equilibrio entre los aspectos cuantitativos como son el costo del servicio y los aspectos cualitativos del servicio.

3.1.2. Conceptos Básicos en Teoría de Colas

Entre los conceptos importantes a manejarse, como

Cola.-Una cola está formada por el número de clientes que esperan recibir el servicio, su tamaño puede ser finito o infinito y según su el orden en el que se atiende a los clientes puede ser: FIFO (El primero entrar es el primero en recibir el servicio), aleatoria y por prioridad.

Clientes.- Los clientes son quienes entran al sistema, el número de clientes que acceden al sistema se conoce como el “Tamaño de la Población”, $N(t)$, puede definirse como finito o infinito.

Llegada.- Las llegadas tienen un patrón estadístico generado por el arribo de clientes al sistema a través del tiempo. Por lo general, se asume que los clientes llegan al sistema según un proceso de Poisson, es decir que la llegada al sistema entre dos clientes consecutivos sigue una distribución exponencial. La tasa media de llegadas (siendo el número esperado de llegadas por unidad de tiempo al sistema) se define como λ_n , cuando hay n clientes en el sistema. El tiempo entre llegadas esperado estaría dado por $\frac{1}{\lambda}$.

Servicio.- El servicio está dado por el tiempo que transcurre entre el inicio del servicio para un cliente hasta su salida del sistema, estos tiempos son caracterizados por una distribución de probabilidad, entre las más comunes se tiene la distribución exponencial, distribución determinística (en caso de tener tiempos de servicio constantes) y la distribución Erlang, más conocida como Gamma. La tasa media del tiempo de servicio μ_n , es el número esperado de clientes que completan su servicio por unidad de tiempo cuando hay n clientes en el sistema. El tiempo de servicio esperado estaría dado por $\frac{1}{\mu}$

Número de Servidores.- El servicio que se ofrece depende el número de servidores s que tenga el sistema, estos servidores pueden estar dispuestos en serio o en paralelo.

3.1.3. Medidas de Desempeño

Entre las medidas de desempeño importantes son las siguientes:

•**Factor de Utilización.-** El factor de utilización ρ , define la fracción esperada de tiempo que los servidores están ocupados. Se obtiene dividiendo la tasa media de llegadas para la tasa media de servicio.

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu}, \text{ donde } s \text{ es el número de servidores.}$$

•**Estado Estable.-** El estado estable se alcanza cuando el sistema guarda ciertos patrones fijos, entre los cuales se asume lo siguiente:

• P_n Es la probabilidad de que haya exactamente n clientes en el sistema.

•**L.-** Número de clientes esperados en el sistema.

•**L_q=** Longitud esperada de la cola sin tomar en cuenta los clientes que están siendo atendidos.

•**W.-** Tiempo de espera en el sistema para cada cliente.

•**W_q.**— Tiempo de espera en el sistema para cada cliente.

Existen relaciones fundamentales entre las medidas de desempeño, es decir relaciones entre L , W , L_q y W_q :

$$L = \lambda W \quad L_q = \lambda W_q \quad W = W_q + 1/\mu \quad L = L_q + \rho$$

3.1.4. Tipos de Colas

En la siguiente gráfica se muestran los tipos de colas existentes según el número de servidores que existan:

La figura 3.1.

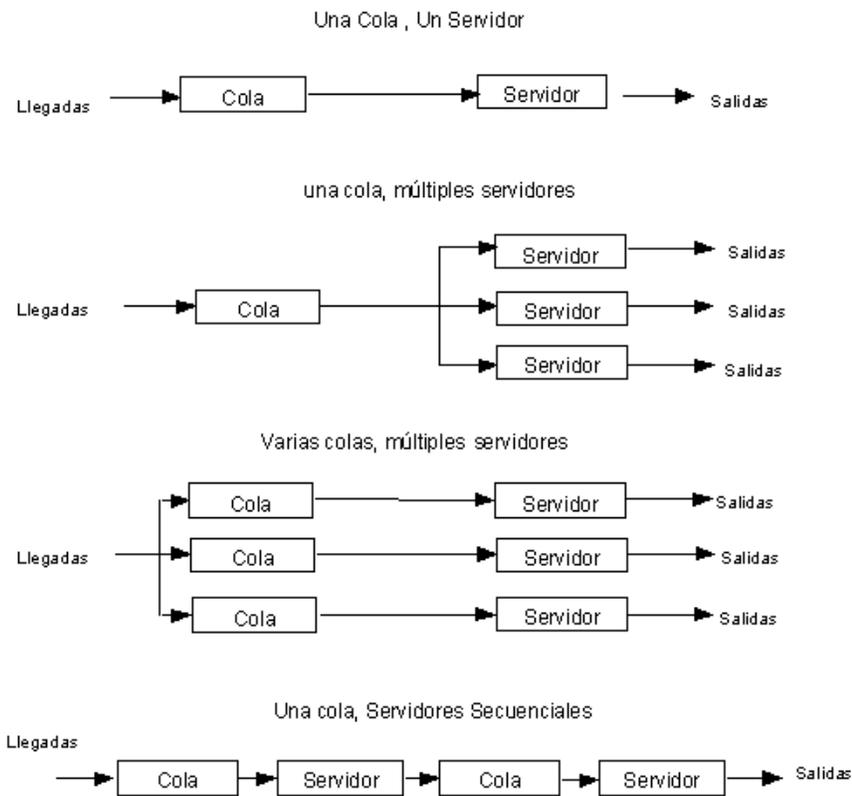


Figura 3.1: Tipos de Colas. Gestión de Sistema de Colas. Ribera, Jaime. 2001.

•Esquema de Cola Simple.- En este sistema, se tiene un solo servidor el cuál

atenderá a todos los clientes que lleguen al sistema.

•**Una cola, servidores secuenciales.-** El cliente llega al sistema, es atendido por el primer servidor, luego pasa a otra cola en donde espera ser atendido por el siguiente servidor y así sucesivamente.

•**Una cola, múltiples servidores.-** Los clientes llegan al sistema formando una sola cola, la cuál luego se atiende a través de varios servidores, un ejemplo claro de esto es lo que ocurre en las líneas de espera de un banco.

•**Varias Colas Múltiples Servidores.-** En este caso se tienen varias colas, los clientes escogen la línea de espera y son atendidos por diferentes servidores dependiendo de la línea de espera escogida, un ejemplo podría ser lo que ocurre en una intersección semaforizada de varios carriles.

3.1.5. Distribuciones de Probabilidad Básicas para Teoría de Colas

Para la siguiente descripción de distribuciones se basará en lo expuesto por Cooper, Robert (1981). Se ha tomado en cuenta las distribuciones más representativas o más utilizadas al momento de realizar un estudio basado en Teoría de Colas, entre estas distribuciones están la distribución de Poisson, la distribución Exponencial y la distribución Gamma.

Distribución Exponencial

La distribución exponencial, cuenta con la propiedad markoviana por lo cual es un modelo adecuado para describir la distribución de probabilidad del tiempo de espera entre dos hechos que sigan un proceso de Poisson. Para la distribución exponencial, la variable aleatoria (continua) a considerarse es el tiempo que tarda en producirse un evento. Por su naturaleza puede describir la distribución del tiempo de espera entre eventos de un proceso de Poisson, así también como el tiempo que transcurre hasta que se produzca un fallo (siempre y cuando la probabilidad de que exista un fallo no dependa del tiempo transcurrido). A continuación se muestran las propiedades principales de la Distribución Exponencial, en donde x (la variable aleatoria) toma valores no negativos.

Propiedad	Ecuación Utilizada
Función de Densidad	$f(x) = \alpha e^{-\alpha x}$
Función de Distribución	$F(x) = 1 - e^{-\alpha x}$
Media	$\mu = 1/\alpha$
Varianza	$\sigma^2 = 1/\alpha^2$

Tabla 3.1: *Propiedades de la Distribución Exponencial*

En la figura se muestran distintas distribuciones de Erlang al variar su parámetro:

La figura 3.2.

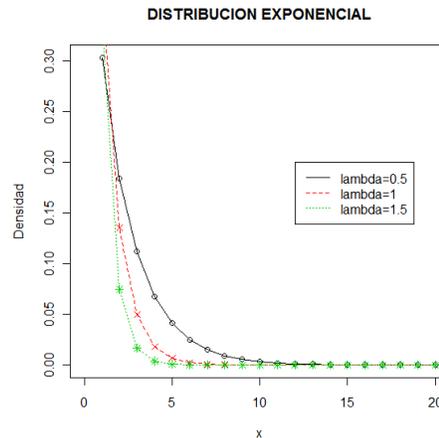


Figura 3.2: *Distribución Exponencial*

Distribución de Poisson

Generalmente, se asume que la distancia entre puntos sucesivos es independiente, idénticamente y exponencialmente distribuidos, si se asume la variable aleatoria $X_k = T_k - T_{k-1}$ donde $k = 1, 2, 3, \dots$, tiene la distribución:

$$P(X_k > t) = e^{-\lambda t}$$

Por otra parte, si $N(t)$ es el número de puntos que ocurren en el lapso $(0, t)$, entonces se tiene que $P(N(k) = k) = P_k(t)$. Si se asume que los espacios de tiempo entre puntos son independientes y que responden a una distribución exponencial,

entonces al probabilidad que un punto ocurra está dada por: $P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$. La cuál corresponde a una Distribución de Poisson, generalizando se tienen las siguientes propiedades de la distribución y gráfica al variar los parámetros:

Propiedad	Ecuación Utilizada
Función de Densidad	$f(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$
Función de Distribución	$F(x) = \frac{\Gamma(k+1, \lambda)}{k!}$
Media	λ
Varianza	λ

Tabla 3.2: Propiedades de la Distribución de Poisson

La figura 3.3.

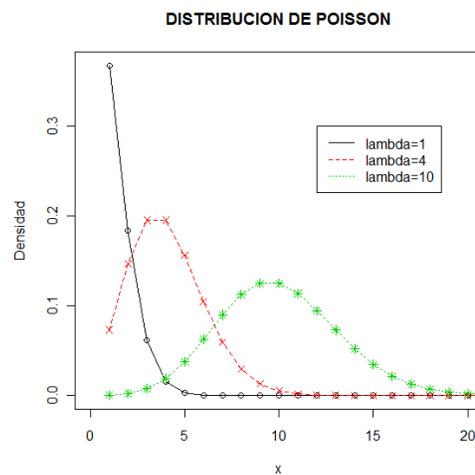


Figura 3.3: Distribución de Poisson

Distribución de Erlang

En este caso se describe una distribución que corresponda a la suma de la distancia que existe entre las llegadas de los puntos. Es decir, se busca la distribución de $S_n = X_1 + X_2 + \dots + S_n$, donde n es el número de variables aleatorias independiente, idéntica y exponencialmente distribuidas; y S_n , es la suma de los tiempos de llegada, por lo tanto:

$$P(S_n \leq x) = P(N(x) \geq n) = \sum_{k=n}^{\infty} \frac{(\lambda x)^k}{k!} e^{-\lambda x}$$

La función de distribución $F(x) = P(S_n \leq x)$, entonces se tiene la siguientes función de distribución:

$$F(x) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda x)^k}{k!} e^{-\lambda x}$$

Generalizando se tienen las siguientes propiedades de la Distribución de Erlang:

Propiedad	Ecuación Utilizada
Función de Densidad	$f(x) = \frac{\lambda^n}{x^{n-1}} e^{-\lambda x} (n-1)!$
Función de Distribución	$F(x) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda x)^k}{k!} e^{-\lambda x}$
Media	n/λ
Varianza	n/λ^2

Tabla 3.3: *Propiedades de la Distribución Erlang*

En la figura se muestran distintas distribuciones de Erlang al variar sus parámetros:

La figura 3.4.

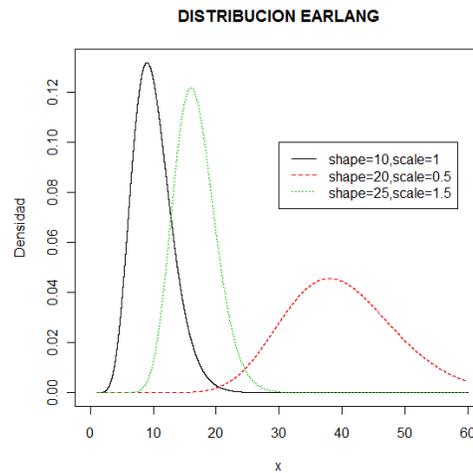


Figura 3.4: *Distribución Earlang*

3.2. Teoría de Simulación

Al hablar de simulación, se refiere a modelos que representen la realidad, con el fin de obtener soluciones viables que sean aplicables al sistema real. Cuando se ha logrado obtener el modelo, la estrategia que se utiliza para llegar a diferentes conclusiones es la simulación. Uno de los objetivos de la simulación es realizar cambios en el sistema y probarlos en el modelo, lo cuál permitirá elegir la mejor alternativa para hacer frente a una realidad.

Para realizar una simulación existen tres definiciones básicas a considerarse: sistema, modelo, y simulación.

3.2.1. Sistema

El sistema es el conjunto de elementos cuya interacción interesa estudiar, puede estar conformado por subsistemas. El comportamiento del sistema depende de la interacción y relaciones que existan entre los subsistemas.

3.2.2. Modelo

El modelo permite averiguar que sucedería en el sistema si se llevan a cabo ciertos cambios, es decir, a través del modelo se puede realizar predicciones a futuro sobre un sistema. Este modelo, debe tomar en cuenta todos los parámetros significativos del sistema, de modo que sea un modelo válido, es decir una descripción del sistema y de las reglas que lo gobiernan. Los modelos pueden ser físicos (modelos de aviones) o pueden ser abstractos (modelo económico). Sutherland, John señala que prácticamente todos los fenómenos del mundo pueden ser modelizados según tres direcciones de análisis:

- El nivel de las variables de estado, donde se trata de investigar los principales aspectos estructurales o cualitativos del sistema.

- El nivel paramétrico, que implica la asignación de valores numéricos específicos a las variables de estado.

- El nivel de los coeficientes en que se asignan valores numéricos específicos a los conjuntos de las variables de estado.

3.2.3. Simulación

Una vez que se ha creado el modelo, se pasa a la simulación. Esta etapa consiste en modificar ciertas características del sistema con el fin de obtener resultados a las hipótesis que se han planteado. En sí, el objetivo principal de la simulación es la predicción. Esta técnica debe ser utilizada, en caso que no existan otros recursos para analizar un problema.

La simulación incluye dos fases: construir el modelo y ensayar alternativas para mejorar el sistema, para ello se debe definir el sistema con el máximo de detalle, elegir el método adecuado para realizar el estudio, definir cuáles serán las variables a ser consideradas en el modelo, recolectar y analizar los datos del sistema, predeterminar la estructura del modelo, programar el modelo, validar el modelo, analizar y criticar los resultados.

3.2.4. Ventajas y Desventajas de la Simulación

Realizar un estudio utilizando la estrategia de la simulación trae ciertas ventajas y desventajas como lo menciona Coss, Raúl (2003). En la siguiente tabla se resumen las mismas:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Adquirir una rápida experiencia a muy bajo costo y sin riesgos	No se lo debe utilizar si existen técnicas analíticas que permitan resolver el problema
Identificar en un sistema complejo los "cuellos de botella "	No es posible asegurar que el modelo sea válido
Estudio sistemático de alternativas	No existe criterio científico de selección de alternativas a simular
Ensayar estrategias y maniobras	Existe el riesgo de utilizar el modelo fuera de los límites para los cuales fue construido
No tiene límite en cuanto a la complejidad	_____
Se puede aplicar en sistemas nuevos	_____

Tabla 3.4: *Ventajas y Desventajas de la Simulación*

En este trabajo, la simulación se realizará utilizando el lenguaje y la interfaz de Netlogo, el cual permite obtener datos de varios parámetros variando una o varias características del sistema a la vez.

Capítulo 4

Descripción y Datos de la Zona de Estudio

4.1. Descripción de la Zona de Estudio

La zona de estudio, mostrada en la lámina adjunta 1 de 3, consta de cuatro intersecciones semaforizadas, las cuales juegan un papel importante en el desempeño de una red vehicular, estas son las causantes de cuellos de botellas y determinan la capacidad vehicular, eficiencia y seguridad de la misma. Estas intersecciones, se encuentran muy próximas entre si, esta proximidad al no tener semáforos sincronizados y calibrados según el tráfico afluente hacia ellos, provoca estancamientos y cuellos de botella en las horas pico del día, dificultando evidentemente la movilidad en la zona. Por facilidad se nombrará las intersecciones de estudio como se indica a continuación:

- Intersección de la Av. Interoceánica y Gonzalez Suarez $\Rightarrow A$
- Intersección de la Av. Interoceánica y Eloy Alfaro $\Rightarrow B$
- Intersección de la Av. Interoceánica y Pasaje Rumiñahui $\Rightarrow C$
- Intersección de la Av. Interoceánica y Francisco Pizarro $\Rightarrow D$

El siguiente cuadro muestra la distancia que existe entre las intersecciones:

Tramo de la Vía Delimitado por Intersecciones	Distancia m
$A - B$	497m
$B - C$	551m
$C - D$	214m
Total	1131.80m

Tabla 4.1: *Distancia entre Intersecciones (m)*

Por otra parte, este tramo de la vía tiene características geométricas que pueden afectar su seguridad, comodidad y costos de utilización. Existen tres factores principales que deben ser considerados: curvatura, inclinación y materiales utilizados en su construcción.

• **Curvatura** En el caso de la curvatura se define a la vía a partir de la siguiente clasificación:

Curvatura Media /km	Calificación m
0 – 25	Rectilíneo
25 – 50	Normal
50 – 75	Regular
> 75	Sinuoso

Tabla 4.2: *Geometría de la Vía por Curvatura, Safety at Road Geometry Standards in some European Countries*

Inclinación Al hablar de inclinación, la clasificación de la vía se ha realizado teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

Inclinación Media	Calificación
0 – 8	Llano
8 – 20	Ondulado
20 – 30	Accidentado
> 30	Montañoso

Tabla 4.3: *Geometría de la Vía por Inclinación, Safety at Road Geometry Standards in some European Countries*

El tramo de estudio, sobre la Avenida Interoceánica se cataloga como **rectilínea** y **llano**, ya que existen curvas casi imperceptibles en el tramo de estudio, estos no superan los 25/m en promedio y su inclinación promedio no supera el 8.

Material La capa de rodadura es asfalto durante todo el tramo seleccionado, de calidad media.

Después de haber realizado una descripción general del tramo de estudio, a continuación se describen las intersecciones incluidas en este trabajo.

4.1.1. Descripción de Intersección A

La primera intersección es la intersección semaforizada entre la Av. Interoceánica y la calle Gonzalez Suárez. En este tramo la Av. Interoceánica es de doble sentido, con dos carriles en cada dirección, mientras que la calle Gonzalez Suarez es doble vía y consta de un solo carril en cada dirección. Como dispositivos de control de tránsito, existen seis semáforos que controlan el tráfico de los doce carriles en dos fases diferentes. Los posibles movimientos para cada fase están adjuntas en el apéndice A.1. Los tiempos de las fases y el cambio de luz de los semáforos de la intersección A son los siguientes:

Fase	Tiempo	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	1min2seg	V	V	V	V	R	R
2	28seg	R	R	R	R	V	V

Tabla 4.4: *Tiempos y Fases de la Intersección A*

4.1.2. Descripción de Intersección B

La segunda intersección corresponde a la Av. Interoceánica y la calle Eloy Alfaro. Al igual que en la primera intersección, la Av. Interoceánica es de doble sentido, con dos carriles en cada dirección, sin embargo, cuenta en ambas direcciones con una bahía en caso que el conductor desee virar hacia la izquierda para tomar la calle Eloy Alfaro. Esta bahía, no se puede contar como un carril exclusivo, ya que al estar los autos esperando girar obstruyen el paso de los automoviles que quieren seguir un movimiento directo. Para el control de la intersección se tienen cinco semáforos los cuales regulan

los 10 carriles en tres fases, cuyos posibles movimientos para cada fase están descritos en las figuras del apéndice A2. Los tiempos de las fases del ciclo de semáforos en la intersección B se muestran en la siguiente tabla:

Fase	Tiempo	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
1	1min2seg	V	R	V	R	R
2	20seg	R	V	V	R	R
3	26seg	R	R	R	V	V

Tabla 4.5: *Tiempos y Fases de la Intersección B*

4.1.3. Descripción de Intersección C

La tercera intersección semaforizada se ubica en la Av. Interoceánica y la calle Juan Montalvo. La Av. Interoceánica continua con las mismas características que en las intersecciones anteriores. La calle Juan Montalvo en el sentido norte-sur es de una sola vía, mientras que en el otro sentido es de doble vía, además de contar con un parter que permite la movilidad en dirección de la Av. Interoceánica exclusivamente.

La intersección está controlada por seis semáforos, cuyo ciclo se ejecuta en dos fases, descritas en el apéndice A3. Los tiempos de las fases del ciclo de los semáforos en la intersección C se muestra en la siguiente tabla:

Fase	Tiempo	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	1min2seg	V	V	V	V	R	R
2	35seg	R	R	R	R	V	V

Tabla 4.6: *Tiempos y Fases de la Intersección C*

4.1.4. Descripción de Intersección D

La última intersección de estudio semaforizada, se da en la Av. Interoceánica y la calle Francisco Pizarro. En este caso, la Av. Interoceánica, es de doble sentido, con dos carriles en cada dirección, mientras que la calle Francisco Pizarro es doble vía en ambos sentidos, en el sentido sur-norte la calle es un pasaje que carece de señalización adecuada. La intersección está regulada por seis semáforos, los cuales controlan la movilidad en tres fases, como se muestra en el apéndice A4. A continuación se muestra los semáforos y tiempos que se tienen en cada fase:

Fase	Tiempo	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	1min2seg	V	V	V	V	R	R
2	15seg	V	V	R	R	R	R
2	30seg	R	R	R	R	V	V

Tabla 4.7: *Tiempos y Fases de la Intersección D*

4.2. Recolección de Datos

En función de los objetivos que se desean alcanzar a través del modelo de simulación de la recta de la Av. Interoceánica Cumbaya-Tumbaco, se han determinado ciertas variables como son: Tiempo de llegada a las entradas principales del sistema, tiempo que tardan los vehículos en salir del sistema, número de vehículos livianos y pesados que ingresan al sistema por cada una de las entradas, distribución de destinos para los vehículos.

Con este fin, se predeterminaron ciertos aspectos como son:

1. Fecha y hora de los días en los que se realiza el levantamiento de datos.
2. Entradas Principales y Secundarias al Sistema

4.2.1. Fecha y Hora para la Recolección de Datos

La recolección de los datos, debido a limitaciones de tiempo, se realizaron los días martes y jueves del mes de octubre y noviembre, con el único fin de poder obtener datos congruentes para todas las intersecciones y todas las entradas consideradas. Se asume en este caso que el comportamiento del día Martes es similar al del día Jueves, por lo que todos los datos recolectados serán asumidos como obtenido el mismo día.

Para la toma de datos se considerará las horas de mayor flujo vehicular en la mañana, es decir de 7h00 a 9h00 de la mañana. Según se indica en la teoría se modelará el sistema vehicular considerando los 15 minutos de mayor flujo vehicular del sistema.

En la siguiente tabla se muestra los días que se asistió a realizar el levantamiento y los puntos observados por día, es importante tener en cuenta que hubiese sido ideal tomar los datos en un mismo día y a una misma hora, sin embargo al ser un trabajo realizado por la autora, se ha recolectado los datos en cuatro días diferentes, procurando sean los mismos horarios y días de semejantes características respecto al flujo vehicular:

Intersección	Día	Hora
Intersección A	Jueves 27 de Octubre del 2011	7h00 - 9h00
Intersección B	Jueves 3 de Noviembre del 2011	7h00 - 9h00
Intersección C	Jueves 11 de Noviembre del 2011	7h00 - 9h00
Intersección D	Jueves 27 de Noviembre del 2011	7h00 - 9h00

Tabla 4.8: *Horarios de Recolección de Datos*

4.2.2. Entradas y Llegadas al Sistema

Como entradas se refiere a aquellos puntos donde existe llegada de vehículos, sin que estas provengan del mismo sistema (de otra intersección considerada en el estudio). Como llegadas al sistema, se considerarán las entradas de las intersecciones que provienen de intersecciones consideradas en el estudio que las anteceden o preceden. En la siguiente tabla se describen qué puntos han sido considerados como entradas y cuáles como llegadas:

Tipo	Identificación	Carriles	Ubicación
Entrada	1A	2	Av. Interocéánica Hacia Tumbaco
Entrada	2A	1	Av. Interocéánica y González Suárez <i>Norte – Sur</i>
Entrada	3A	1	Av. Interocéánica y González Suárez <i>Sur – Norte</i>
Llegada	4A	2	Av. Interocéánica Hacia Cumbaya
Llegada	1B	2	Av. Interocéánica Hacia Tumbaco
Entrada	2B	1	Av. Interocéánica y Eloy Alfaro <i>Norte – Sur</i>
Entrada	3B	1	Av. Interocéánica y Eloy Alfaro <i>Sur – Norte</i>
Llegada	4B	2	Av. Interocéánica Hacia Cumbaya
Llegada	1C	2	Av. Interocéánica Hacia Tumbaco
Entrada	2C	1	Av. Interocéánica y Juan Montalvo <i>Norte – Sur</i>
Entrada	3C	1	Av. Interocéánica y Juan Montalvo <i>Sur – Norte</i>
Llegada	4C	2	Av. Interocéánica Hacia Cumbaya
Llegada	1D	2	Av. Interocéánica Hacia Tumbaco
Entrada	2D	1	Av. Interocéánica y Francisco Pizarro
Entrada	3D	1	Av. Interocéánica y Pasaje J
Entrada	4D	2	Av. Interocéánica Hacia Cumbaya

Tabla 4.9: *Entradas y Llegadas al Sistema*

4.2.3. Análisis de Datos de Intersección A

A partir de las observaciones que se han tomado en la intersección A, a continuación se muestran las tablas de frecuencia relativa de vehículos que aparecen tanto en las entradas como en las llegadas de esta intersección, así como el cálculo de las variables que corresponden al análisis de Ingeniería de Tránsito y el análisis de las variables de Teoría de Colas que intervienen en las entradas de la intersección y servirán como referente para la modelación del sistema.

Tipos de Vehículos en la Intersección A

Como se había mencionado dentro de la teoría de Ingeniería de Transito es importante conocer el porcentaje de cada tipo de vehículos que utilizan la intersección, durante los 15 ciclos de estudio.

Para las entradas de A, se tiene un 64.69 % de vehículos livianos, contra un 6 % buses que ingresan al sistema, por otra parte se un 5 % entre buses y camiones invaden el carril izquierdo al ingresar al sistema por esta entrada, como se muestra en la siguiente tabla.

Entrada	Livianos	Buses	Camiones
Entrada 1A-der	85.38	5.66	8.49
Entrada 1A -izq	95.14	3.12	2.35
Entrada 2A	98.21	0	1.79
Entrada 3A	100	0	0

Tabla 4.10: *Frecuencias Relativas para las Entradas de Intersección A*

Según el movimiento que realizan cada uno de los vehículos al llegar a la intersección, se puede ver en la tabla siguiente que por las entradas de la calle Gonzalez Suárez, es decir la entrada 2A, y 3A, ingresan vehículos al sistema que en su mayoría alimentan al sistema a lo largo de la Av. Interoceánica, en ambos casos alrededor del 60 % de vehículos giran hacia la izquierda o derecha para continuar su viaje por la Av. Interoceánica. Por otra parte, los vehículos que viajan a los largo de la Av. Interoceánica siguen la misma dirección, a excepción de 33 % de vehículos que viajan por el carril

derecho de la entrada 1A que giran por la calle Gonzalez Suárez:

Entrada	Recto	Giro Izquierda	Giro Derecha
Entrada 1A-der	66.98	0.00	33.02
Entrada 1A- izq	100.00	0.00	0.00
Entrada 2A	42.86	17.86	39.29
Entrada 3A	37.19	0.00	62.81

Tabla 4.11: *Movimientos de Vehículos en cada Entrada*

En el caso de la llegada 4A, la frecuencia de vehículos según su tipo muestra una presencia de camiones y buses similar, que rodean el 8% del total de vehículos que viajan por esta vía, sin embargo la presencia de vehículos livianos representa más del 80% del parque vehicular que transitan por esta llegada. Por otra parte, se permite el giro de los vehículos que viajan por el carril derecho, hacia la derecha en dirección a la calle González Suárez. Durante los ciclos observados existieron 16 vehículos que hicieron este giro, correspondiente al 2% de los vehículos que viajan por este carril.

Tipo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Livianos	83.45	94.82
Camiones	8.10	1.22
Buses	8.45	3.96

Tabla 4.12: *Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 4A*

Capacidad Vial y Vehículos Equivalentes para Intersección A

Para analizar la capacidad de la vía, se realizó una tabla a partir de los datos observados, los cuales incluyen el volumen de tránsito, el flujo máximo, el volumen horario de máxima demanda, el factor de la hora de máxima demanda, el factor de ajuste por efecto de vehículos pesados y el volumen de vehículos equivalentes para cada entrada, a continuación la tabla de resumen:

Entrada	Q(vph)	qmax(vph)	VHMD	FHMD	fvp	qADE
Entrada 1A-der	569	617	569	0.92	0.999	618
Entrada 1A-izq	777	786	777	0.99	0.999	786
Entrada 2A	301	360	301	0.84	0.999	360
Entrada 3A	325	381	325	0.85	1	389

Tabla 4.13: Cuadro de Resumen de Capacidad para Entradas de Intersección A

La capacidad vehicular por hora, durante los ciclos de estudio, concide con el volumen horario de máxima demanda, debido a que se realizó la obtención de datos en hora pico, por el mismo motivo el factor de la hora de máxima demanda es cercano a 1. Por otro lado, se ha calculado los vehículos equivalentes, de modo que en el modelo que se realice los buses y camiones sean reemplazados por vehículos equivalentes, es por esto que el volumen del carril derecho de la entrada 1A, no será de 569 vehículos por hora, sino de 618 vehículos equivalentes por hora.

Factores de Teoría de Colas de las Entradas de Intersección A

Al hablar de Teoría de Colas, se debe manejar ciertos factores como la tasa media de llegadas, la tasa media de salidas, el tiempo esperado de llegadas, el tiempo esperado de salidas y el factor de utilización, las tablas que se muestran resumen los factores de teoría de colas así como la media y la varianza de los tiempos de llegada para las entradas de esta intersección:

Entrada	λ	μ	$1/\lambda$	$1/\mu$	ρ
Entrada 1A-der	602	574	0.002	0.002	1.05
Entrda 1A-izq	818	774	0.001	0.001	1.06
Entrada 2A	303	301	0.003	0.003	1.01
Entrada 3A	329	325	0.003	0.003	1.01

Tabla 4.14: *Factores de Teoría de Colas para Entradas de Intersección A*

Entrada	Tiempos de Llegada		Tiempos de Salida	
	Media	Varianza	Media	Varianza
Entrada 1A-der	6.19	31.89	6.291	79.28
Entrda 1A-izq	5.34	43.76	6.02	65.32
Entrada 2A	11.88	117.02	11.960	509.75
Entrada 3A	10.98	134.21	11.09	478.63

Tabla 4.15: *Medias y Varianzas para Tiempos de Llegada y Salida en Intersección A*

Cabe recalcar que el factor de utilización para todas las entradas es mayor que 1, por lo que la demanda es mayor a la oferta del servicio, lo que ocasiona colas más largas y caotiza el tráfico principalmente en las entradas de la Avenida Ineroceánica. El tiempo esperado de servicio y el tiempo esperado de llegada, coincide en las entradas

de la calle Gonzalez Suárez, siendo este alrededor de 10s, mientras que a lo largo de la avenida interoceánica este tiempo es hasta de 6.2s. La varianza de los tiempos de llegada se casi es el doble en las entradas de las calles secundarias, esto se debe a que los vehículos tienen un tiempo de rojo efectivo mas largo que en el sentido de la Av. Interoceánica.

4.2.4. Análisis de Datos de Intersección B

La recopilación de los datos de la intersección B, al igual que para la intersección A ha permitido al igual que en la intersección anterior, obtener tablas de frecuencia por tipo de vehículo, variables de teoría de colas e ingeniería de tránsito las cuales ayudarán a modelar el sistema.

Tipos de Vehículos en la Intersección B

En la entrada 3B, existe ausencia total de buses, mientras que un 92.36 % de vehículos son livianos y el resto de automotores son camiones.

Entrada	Livianos	Buses	Pesados
Entrada 3B	92.36	0	7.63

Tabla 4.16: *Frecuencias Relativas en Entrada 3B*

Según el movimiento que realizan cada uno de los vehículos al llegar a la intersección, se ha obtenido la siguiente tabla, en la cual se observa que del total de vehículos

que ingresan al sistema por la Calle Eloy Alfaro, un 60 % giran por la Avenida Interoceánica hacia Tumbaco, otro 23 % hacia Cumbaya y solamente un 18 % siguen recto por la Eloy Alfaro.

Entrada	Recto	Giro Izquierda	Giro Derecha
Entrada 3B	17.56	22.90	59.54

Tabla 4.17: *Movimientos de Vehículos en Entrada 3B*

Por otra parte, la intersección B, cuenta con dos llegadas, la llegada 1B en sentido de la Av. Interoceánica hacia Tumbaco y la llegada 4B, en sentido de la Av. Interoceánica hacia Cumbaya, por la llegada 1B se tiene que la mayoría de vehículos son livianos, oscilando entre 85 % y 90 % dependiendo del carril, por ambos carriles viajan buses y camiones. Por el carril derecho, los vehículos pesados representan un 14 %. En el izquierdo viajan 5 % de este tipo de vehículos.

Tipo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Livianos	85.62	95.15
Camiones	8.50	3.24
Buses	5.88	1.62

Tabla 4.18: *Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 1B*

Al igual que en la entrada 1B, la llegada 4B presenta el porcentaje más grande de vehículos lo tienen los livianos, en ambos carriles existe la presencia de camiones, sin embargo, se puede notar que en el carril izquierdo la presencia de buses es casi nula, es decir todos los buses viajan por el carril derecho cumpliendo con el reglamento.

Tipo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Livianos	85.35	94.64
Camiones	8.42	4.76
Buses	6.23	0.60

Tabla 4.19: *Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 4B*

Capacidad Vial y Vehículos Equivalentes para Intersección B

Para analizar la capacidad de la vía, se realizó una tabla a partir de los datos observados, los cuales incluyen el volumen de tránsito, el flujo máximo, el volumen horario de máxima demanda, el factor de la hora de máxima demanda, el factor de ajuste por efecto de vehículos pesados y el volumen de vehículos equivalentes para cada entrada, a continuación la tabla de resumen:

Entrada	Q(vph)	qmax(vph)	VHMD	FHMD	fvp	qADE
Entrada 3B	278	285	278	0.97	0.99	285

Tabla 4.20: *Cuadro de Resumen de Capacidad para Entrada 3B*

Para esta entrada el factor de vehículos pesados, así como el factor de hora de máxima demanda son cercanos a 1, es decir la presencia de vehículos pesados no es considerable y el flujo máximo prácticamente coincide con el tiempo que se analizó. Por último, se trabajará con 285 vehículos equivalentes para esta entrada.

Factores de Teoría de Colas de la Entrada 3B

A continuación se presenta el cuadro de resumen de tasa media de llegadas, tasa media de salidas, tiempo esperado de llegadas, tiempo esperado de salidas, factor de utilización:

Entrada	λ	μ	$1/\lambda$	$1/\mu$	ρ
Entrada 3B	290	277	0.003	0.004	1.048

Tabla 4.21: Factores de Teoría de Colas para Entrada 3B

Entrada	Tiempos de Llegada		Tiempos de Salida	
	Media	Varianza	Media	Varianza
Entrada 3B	12.78	107.40	11.48	409.44

Tabla 4.22: Medias y Varianzas para Tiempos de Llegada y Salida en Intersección B

Cabe recalcar que el factor de utilización para la entrada 3B es mayor que 1, por lo que se tiene una mayor demanda que oferta del servicio, además la diferencia entre entradas y salidas es de 13 vehículos, por lo que siempre existen vehículos en la cola, lo que caotiza el tráfico.

4.2.5. Análisis de Datos de Intersección C

Con los datos recolectados en la intersección C, se ha procedido igual que en las otras intersecciones, para presentar las tablas de resultado a continuación.

Tipos de Vehículos en la Intersección C

Las frecuencias en la siguiente tabla, muestra el número de vehículos de cada tipo que estuvieron presentes en cada una de las entradas durante los ciclos de estudio:

En las entradas 2C y 3C existe una gran afluencia de vehículos livianos, alcanzando el 90 %, del total de vehículos que transitan por estas entradas, el resto corresponde a camiones.

Entrada	Livianos	Bus	Camion
Entrada 2C	92.70	0	7.30
Entrada 3C	91.55	0	8.45

Tabla 4.23: *Frecuencias Relativas para las Entradas de Intersección C*

Según el movimiento que realizan cada uno de los vehículos al llegar a la intersección, se puede ver que por las entradas de la calle Juan Montalvo, entrada 2C y 3C ingresan vehículos al sistema que en su mayoría continúan su movimiento a lo largo de la Av. Interoceánica. Un 83.21 % de los vehículos que ingresan por la entrada 2C, se desplazan por la Av. Interoceánica hacia Cumbaya, mientras que el 75.35 % de vehículos que ingresan por la entrada 3C, se dirigen por la Av. Interoceánica hacia Tumbaco.

Entrada	Recto	Giro Izquierda	Giro Derecha
Entrada 2C	6.57	10.22	83.21
Entrada 3C	0.00	24.65	75.35

Tabla 4.24: *Movimientos de Vehículos en cada Entrada*

Por otra parte, la intersección C, cuenta con dos llegadas, 1C y 4C. En el caso de la llegada 1C, los vehículos en su mayoría son livianos que se dirigen hacia Tumbaco, el porcentaje de camiones y buses está alrededor del 13% , y existe un número considerable de buses y camiones que transitan por el carril izquierdo de la avenida Interoceánica hacia Tumbaco:

Tipo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Livianos	86.51	95.95
Camiones	7.27	2.80
Buses	6.23	1.25

Tabla 4.25: *Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 1C*

En el caso de la llegada 4C, las condiciones son similares a lo expuesto en 1C:

Tipo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Livianos	86.64	95.34
Camiones	6.85	3.21
Buses	6.51	1.46

Tabla 4.26: *Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 4C*

Capacidad Vial y Vehículos Equivalentes para Intersección C

El cuadro de resumen calcula factores tales como el volumen de tránsito, el flujo máximo, el volumen horario de máxima demanda, el factor de la hora de máxima demanda, el factor de ajuste por efecto de vehículos pesados y el volumen de vehículos equivalentes para cada entrada:

Entrada	Q(vph)	qmax(vph)	VHMD	FHMD	fvp	qADE
Entrada 2C	332	348	332	0.95	0.999	349
Entrada 3C	343	361	343	0.95	0.999	361

Tabla 4.27: *Cuadro de Resumen de Capacidad para Entradas de Intersección C*

El factor de máxima demanda y el factor de vehículos pesados aproximadamente son iguales a 1, lo que quiere decir que el tiempo que se ha tomado como estudio coincide con el flujo máximo de esas entradas y que el porcentaje de vehículos pesados en las entradas puede ser despreciable. Se asumirá que por hora los vehículos equivalentes para la entrada 2C son 349, mientras que para la entrada 3C será de 361.

Factores de Teoría de Colas de las Entradas de Intersección C

En el siguiente cuadro se resume los factores de teoría de colas para la intersección C, como son la media de llegadas, la tasa media de salidas, el tiempo esperado de llegadas, el tiempo esperado de salidas y el factor de utilización:

Entrada	λ	μ	$1/\lambda$	$1/\mu$	ρ
Entrada 2C	352	331	0.003	0.003	1.06
Entrada 3C	360	344	0.003	0.003	1.05

Tabla 4.28: *Factores de Teoría de Colas para Entradas de Intersección C*

Entrada	Tiempos de Llegada		Tiempos de Salida	
	Media	Varianza	Media	Varianza
Entrada 2C	10.88	301.31	10.83	407.25
Entrada 3C	10.91	385.95	10.48	360.22

Tabla 4.29: *Medias y Varianzas para Tiempos de Llegada y Salida en Intersección C*

Para estas entradas, el factor de utilización también es mayor que 1 para ambos casos, explicando el caos vehicular que existe en estas entradas.

4.2.6. Análisis de Datos de Intersección D

Por último a partir de los datos obtenidos en la intersección D, se presentan los resultados de la misma al igual que se realizó para las intersecciones precedentes.

Tipos de Vehículos en la Intersección D

En las entradas D, al igual que en las otras intersecciones de estudio, existe un porcentaje alto de livianos. Por la entrada 3D, la cual llega desde la calle Francisco Pizarro no existe la presencia de buses, mientras que por el Pasaje J, entrada 2D, existió la presencia de un bus, sin embargo esto fue ocasional, ya que este pasaje no conecta con ninguna población, los vehículos presentes en la hora pico se deben a que existe un gimnasio ubicado en este pasaje.

Entrada	Livianos	Buses	Pesados
Entrada 2D	89.72	0.93	8.41
Entrada3D	80.00	0.00	20.00
Entrada 4D-der	76.17	11.91	11.49
Entrada 4D-izq	88.60	2.93	8.47

Tabla 4.30: *Frecuencias Relativas para las Entradas de Intersección D*

Al hacer referencia a los movimientos que se realizan los vehículos que ingresan por las entradas D, se puede notar que los vehículos que ingresan por la calle Francisco Pizarro, se distribuyen en las tres direcciones casi en los mismos porcentajes, mientras que los vehículos que salen por el pasaje J viajan por la avenida Interoceánica en dirección a Puenbo. Por otra parte, los vehículos que viajan por la Avenida Interoceánica hacia Cumbaya mantienen su dirección a excepción de un 3% que giran por la calle Francisco Pizarro.

Entrada	Recto	Giro Izquierda	Giro Derecha
Entrada 2D	3.73	19.63	76.54
Entrada 3D	40.00	30.00	30
Entrada 4D-der	96.59	0.43	2.93
Entrada 4D-izq	1.00	0.00	0.00

Tabla 4.31: *Movimientos de Vehiculos en cada Entrada*

En el caso de la llegada 1D, por ambos carriles, el porcentaje de vehículos livianos es alto, en su mayoría buses y camiones viajan por le carril derecho, con una excepción que lo hacen por el izquierdo. Apenas un 1.4% de vehículos que viajan por le carril derecho de la llegada 1D, giran hacia el pasaje J, además existen aproximadamente

175 vehículos aproximadamente que viajan por el carril izquierdo giran por la calle Francisco Pizarro, este número es el 20.9% del total de vehículos que viajan por el carril izquierdo de la Avenida Interoceánica hacia Tumbaco.

Entrada	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Livianos	88.80	96.51
Camiones	6.44	2.41
Buses	4.76	1.07

Tabla 4.32: *Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 1D*

Capacidad Vial y Vehículos Equivalentes para Intersección D

El siguiente cuadro presenta las características de volumen de tránsito, flujo máximo, volumen horario de máxima demanda, factor de la hora de máxima demanda, factor de ajuste por efecto de vehículos pesados y volumen de vehículos equivalentes para cada entrada:

Entrada	Q(vph)	qmax(vph)	VHMD	FHMD	fvp	qADE
Entrada 2D	221	313	221	0.71	0.999	313
Entrada 3D	21	28	21	0.75	0.999	28
Entrada 4D-der	503	549	503	0.92	0.998	549
Entrada 4D-izq	657	679	657	0.97	0.999	679

Tabla 4.33: *Cuadro de Resumen de Capacidad para Entradas de Intersección D*

Para estas entradas se puede ver una disminución en el factor de hora de máxima demanda, esto se debe a que dentro de la hora pico considerada, los quince minutos de

mayor flujo son más intensos que en la otras intersecciones, sin embargo la diferencia no es muy notoria con las otras intersecciones.

Factores de Teoría de Colas de las Entradas de Intersección D

El cuadro siguiente resume las características dadas por la Teoría de Colas a considerar para esta intersección:

Entrada	λ	μ	$1/\lambda$	$1/\mu$	ρ
Entrada 2D	225	223	0.004	0.004	1.01
Entrada 3D	22	21	0.046	0.047	1.03
Entrada 4D-der	522	500	0.002	0.002	1.04
Entrada 4D-izq	681	660	0.001	0.002	1.03

Tabla 4.34: Factores de Teoría de Colas para Entradas de Intersección D

Entrada	Tiempos de Llegada		Tiempos de Salida	
	Media	Varianza	Media	Varianza
Entrada 2D	16.03	290.42	16.12	426.8
Entrada 3D	165.2	4511.48	170.04	7390.69
Entrada 4D-der	6.91	45.08	7.18	305.53
Entrada 4D-izq	5.54	148.77	5.46	108.59

Tabla 4.35: Medias y Varianzas para Tiempos de Llegada y Salida en Intersección D

El dato más sobresaliente es el factor de utilización, en todos los casos es mayor que 1, explicando la congestión, sin embargo para la entrada 3D, proveniente del Pasaje J, este factor es de 1.03, esto no implica congestión, sino más bien explica que todos los vehículos que ingresen por esa entrada tienen que esperar al verde, sin que esto

implique que se formen colas de espera, ya que la presencia de vehículos es casi nula para la entrada del Pasaje J.

4.3. Ajuste de Distribuciones de Llegadas para cada Entrada del Sistema

A partir de los datos obtenidos se ha realizado un ajuste de distribuciones utilizando máxima verosimilitud, para lo cual se ha supuesto que las llegadas siguen una distribución gamma. En una primera instancia se presenta para cada llegada un gráfico de densidad, de frecuencia y de frecuencia acumulada de los datos obtenidos. Una vez realizado el ajuste, se ha comprobado el ajuste utilizando dos métodos:

- Histograma de datos observados vs. Función de densidad de distribución Gamma ajustada.
- Gráfico Cuantil - Cuantil

Los gráficos de ajuste se encuentran en el apéndice B. En la siguiente tabla se encuentran los parámetros estimados de escala y forma de las distribuciones de llegada para cada entrada del sistema:

Entrada	Escala	Forma
Entrada 1A / Derecha	0.3140	1.9466
Entrada 1A / Izquierda	0.2991	1.4854
Entrada 2A	0.14	1.65
Entrada 3A	0.1507	1.6510
Entrada 3B	0.2731	3.5398
Entrada 2C	0.7428	5.8531
Entrada 3C	0.4985	3.4151
Entrada 2D	0.0768	1.2410
Entrada 3D	—	—
Entrada 4D / Derecha	0.2484	1.7157
Entrada 4D / Izquierda	0.2164	1.3929

Tabla 4.36: *Parámetros de Distribuciones de Llegada Gamma para las Entradas del Sistema*

Los ajustes realizados, son reflejo parcial de la realidad, sin embargo para el modelo que se va a realizar en Netlogo estas aproximaciones permitirán obtener datos cercanos a los observados, por otra parte, en el caso de la entrada 3D, no se ajusta ninguna distribución debido a que los vehículos que llegan son pocos y sus llegadas son completamente aleatorias.

Capítulo 5

Modelación y Análisis de Tráfico en Netlogo

5.1. Selección de Rutas

Para la selección de rutas se ha realizado un análisis de Pareto, basado en el concepto que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema. Este análisis es de utilidad cuando se desea llamar la atención a los problemas o a las causas de forma sistemática. Este análisis se realizó para las rutas secundarias, es decir para aquellas rutas que la alimentan o rutas que se desvían de la avenida Interoceánica. El análisis cuenta con una tabla de resultados dada a continuación y el diagrama de Pareto anexado en el apéndice C, que permite identificar visualmente las minorías, dejando de lado mayorías triviales.

Para todas las intersecciones las rutas 1 – 4 no han sido consideradas para el Análisis de Pareto ya que son rutas que inician y finalizan sobre la Av. Interoceánica, en las láminas 2 y 3 adjuntas al final del trabajo, se encuentran identificadas las rutas sobre el plano del tramo de estudio.

5.1.1. Rutas en Intersección A

Para la intersección A se tienen las siguientes rutas posibles:

Entrada-Llegada	Recto		Giro Izquierda		Giro Derecha	
	VPH	Ruta	VPH	Ruta	VPH	Ruta
Entrada 1A-der	Ruta 1A	381	No existe	0	Ruta 5A	188
Entrada 1A-izq	Ruta 2A	777	No existe	0	No existe	0
Entrada 2A	Ruta 11A	129	Ruta 8A	54	Ruta 7A	118
Entrada 3A	Ruta 10A	121	Ruta 6A	0	Ruta 9A	204
Entrada 4A-der	Ruta 3A	699	No existe	0	Ruta 12A	42
Entrada 4A-izq	Ruta 4A	855	No existe	0	No existe	0

Tabla 5.1: *Rutas y VPH en Intersección A*

A partir del análisis de Pareto se debe tomar en cuenta la ruta 5A, 7A, 9A, 10A y 11A. Sin embargo, las rutas 5A, 10A y 11A, escapan del sistema por lo cual no serán modeladas y el volumen correspondiente a estas rutas será sumado a las rutas 9A y 7A, de modo que se compense vehículos que puedan ingresar al sistema por entradas intermedias no consideradas en el modelo.

Ruta	Frecuencia	F. Acumulada.	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
Ruta 9A	204.00	204.00	23.83	23.83
Ruta 5A	188.00	392.00	21.96	45.79
Ruta 11A	129.00	521.00	15.07	60.86
Ruta 10A	121.00	642.00	14.14	75.00
Ruta 7A	118.00	760.00	13.79	88.79
Ruta 8A	54.00	814.00	6.31	95.09
Ruta 12A	42.00	856.00	4.91	100.00
Ruta 6A	0.00	856.00	0.00	100.00

Tabla 5.2: Análisis de Pareto para Intersección A

5.1.2. Rutas en Intersección B

Para la intersección B se tienen las siguientes rutas posibles:

Entrada-Llegada	Recto		Giro Izquierda		Giro Derecha	
	VPH	Ruta	VPH	Ruta	VPH	Ruta
Llegada 1B-der	Ruta 4B	670	No existe	0	Ruta 5B	21
Llegada 1B-izq	Ruta 3B	697	No existe	0	No existe	0
Entrada 3B	Ruta 9B	49	Ruta 8B	64	Ruta 10B	166
Llegada 4B-der	Ruta 1B	590	No existe	0	Ruta 6B	26
Llegada 4B-izq	Ruta 2B	606	Ruta 7B	152	No existe	0

Tabla 5.3: Rutas y VPH en Intersección B

Según Pareto se debe tomar en cuenta la ruta 7B, 8B y 10B. La ruta 7B escapa del sistema, sin embargo será considerada en el sistema, permitiendo el giro hacia la izquierda únicamente cuando el semáforo se lo indique, caso contrario los vehículos de

esta ruta seguirán la misma dirección que los de la ruta 4B. .

Ruta	Frecuencia	F. Acumulada.	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
Ruta 10B	165.52	165.52	34.71	34.71
Ruta 7B	151.60	317.12	31.79	66.51
Ruta 8B	63.66	380.78	13.35	79.86
Ruta 9B	48.82	429.60	10.24	90.10
Ruta 6B	26.49	456.09	5.56	95.65
Ruta 5B	20.73	476.82	4.35	100.00

Tabla 5.4: *Análisis de Pareto para Intersección B*

5.1.3. Rutas en Intersección C

Para la intersección B se tienen las siguientes rutas posibles:

Entrada-Llegada	Recto		Giro Izquierda		Giro Derecha	
	VPH	Ruta	VPH	Ruta	VPH	Ruta
Llegada 1C-der	Ruta 4C	716	No existe	0	Ruta 5C	0
Llegada 1C-izq	Ruta 3C	795	No existe	0	No existe	0
Entrada 2C	Ruta 7C	22	Ruta 8C	34	Ruta 6C	276
Entrada 3C	No existe	0	Ruta 9C	85	Ruta 10C	258
Llegada 4C-der	Ruta 1C	724	No existe	0	No existe	0
Llegada 4C-izq	Ruta 2C	849	No existe	0	No existe	0

Tabla 5.5: *Rutas y VPH en Intersección C*

A partir del análisis de Pareto en el modelo se tomará en cuenta las rutas secundarias 6C y 10C debido que estas alimentan el sistema analizado.

Ruta	Frecuencia	F. Acumulada.	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
Ruta 6C	276.00	276.00	40.89	40.89
Ruta 10C	258.00	534.00	38.22	79.11
Ruta 9C	85.00	619.00	12.59	91.70
Ruta 8C	34.00	653.00	5.04	96.74
Ruta 7C	22.00	675.00	3.26	100.00
Ruta 5C	0.00	675.00	0.00	100.00

Tabla 5.6: Análisis de Pareto para Intersección C

5.1.4. Rutas en Intersección D

Para la intersección B se tienen las siguientes rutas posibles:

Entrada-Llegada	Recto		Giro Izquierda		Giro Derecha	
	VPH	Ruta	VPH	Ruta	VPH	Ruta
Llegada 1D-der	Ruta 4D	782	No existe	0	Ruta 6D	11
Llegada 1D-izq	Ruta 3D	654	Ruta 7D	174	No existe	0
Entrada 2D	Ruta 9D	8	Ruta 10D	43	Ruta 8D	169
Entrada 3D	Ruta 12D	8	Ruta 11D	6	Ruta 13D	8
Entrada 4D-der	Ruta 1D	486	No existe	0	Ruta 5D	15
Entrada 4D-izq	Ruta 2D	657	No existe	0	No existe	0

Tabla 5.7: Rutas y VPH en Intersección D

Para la intersección D, se tomará en cuenta la ruta 7D y 8D, la primera de ellas escapa del sistema sin embargo es motivo de tráfico para la ruta 3D.

Ruta	Frecuencia	F. Acumulada.	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
Ruta 7D	173.88	173.88	39.35	39.35
Ruta 8D	169.00	342.88	38.25	77.60
Ruta 10D	43.00	385.88	9.73	87.33
Ruta 5D	15.00	400.88	3.39	90.72
Ruta 6D	11.00	411.88	2.49	93.21
Ruta 13D	8.00	419.88	1.81	95.02
Ruta 12D	8.00	427.88	1.81	96.83
Ruta 9D	8.00	435.88	1.81	98.64
Ruta 11D	6.00	441.88	1.36	100.00

Tabla 5.8: *Análisis de Pareto para Intersección D*

Tomando en cuenta las distribuciones calculadas en 5.6 las distribuciones de las entradas del modelo consideradas son las siguientes:

Entrada	Forma	Escala.	Ruta
Entrada 1	1.9466	0.3140	Ruta 1A
Entrada 2	1.485	0.2991	Ruta 2A
Entrada 3	1.6510	0.1507	Ruta 9A
Entrada 4	1.65	0.14	Ruta 7A
Entrada 5	3.599	0.2731	Ruta 8B y Ruta 10B
Entrada 6	3.4151	0.4985	Ruta 10C
Entrada 7	5.8531	0.7428	Ruta 6C
Entrada 8	1.2410	0.07	Ruta 8D
Entrada 9	1.7157	0.2484	Ruta 1D
Entrada 10	1.3929	0.2164	Ruta 2D

Tabla 5.9: *Entrada, Parámetros Distribucion Gamma y Rutas que Generan*

5.2. Entorno Netlogo

Netlogo permite modelar fenomenos sociales y sistemas complejos que varían con el tiempo. En este entorno, se puede analizar relaciones de comportamiento entre individuos a un nivel micro y macro, es decir, permite experimentar y estudiar comportamientos de agentes bajo diferentes condiciones Netlogo es un software libre, utilizable en Mac, Windows y Linux cuyo sistema de programación esta basado en dos tipos de agentes, el primero de ellos denominado *turtles*, los cuales son movibles y el segundo *patches* los cuales son la malla sobre la cual se mueven los primeros.

5.2.1. Interfaz del Modelo en Netlogo

En primer lugar, en la interfaz del modelo se encuentran el botón ***Croquis*** dibuja el mapa de la zona de estudio, asi como delimita las características iniciales en cuanto a número de carros, propiedades de los carros como la velocidad y el tamaño, la separación entre ellos. ***Avanzar*** da inicio a la simulación, está programado para cambiar las fases de los semáforos y dirigir el movimiento de los vehículos en función de otros y de la luz de los semáforos por los que pasa.

La figura 5.1.

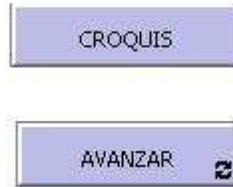


Figura 5.1: Botones de Inicio y Avanzar

El switch de *Secuencia*, indica si se ha determinado los tiempos de los semáforos de modo que los semáforos entre intersecciones están sincronizados, en caso de ser así, se debe indicar el tiempo que debe transcurrir entre que inicia la fase de una intersección el inicio de fase de otra intersección en los recuadros que se indican. Por otra parte, se pide indicar el número de vehículos con los cuales se desea iniciar el sistema. De lo observado en el sitio de estudio, se tomará un valor inicial de 350 vehículos.

La figura 5.2.



Figura 5.2: Secuencia y Número de Vehículos

Si se desea observar el vehículo de muestra, se ha colocado el switch respectivo, en caso de encenderlo, se iluminará el vehículo de muestra durante todo su recorrido como se muestra en la imagen.

La figura 5.3.



Figura 5.3: *Vehículos de Muestra*

Para analizar el modelo se ha tomado en cuenta tres factores: Número de autos detenidos, tiempo de espera y tiempo de viaje. Los dos primeros gráficos muestran el número de autos detenidos y el tiempo de espera promedio por cada tick. El último gráfico, indica el tiempo de viaje del vehículo de muestra desde su ingreso al sistema hasta su salida del mismo a lo largo de la Avenida Interoceánica. La información de

estos graficos sera exportada a un archivo *.csv* para ser analizada estadísticamente en una siguiente etapa.

La figura 5.4.



Figura 5.4: *Gráficos de Autos Detenidos, Tiempo de Espera, Tiempo de Viaje*

Por otra parte, en la interfaz del modelo, se encuentran botones *input* que permiten modificar los tiempos de los ciclos de los semáforos en las intersecciones, en la siguiente imagen se muestran los tiempos observados in situ:

La figura 5.5.

Indique Ciclo de Semáforos y Tiempo en Verde para los Semáforos Indicados

SemA 90	SemAGonzalezSuarez 28	
SemB 108	SemBEloy 26	SemBG.Eloy 20
SemC 97	SemCJMontalvo 35	
SemD 107	SemDFPizarro 30	SemDG.F.Pizarro 15

Figura 5.5: Ingreso de Tiempos de Semáforo

5.2.2. Variables y Comandos de Programación

Variables.- Para programar las variables globales se ha considerado el siguiente comando:

```
globals [num-cars-stopped carromuestra tiempo vel velgiro entrada1 entrada2 en-
trada3 entrada4 entrada5 entrada6 entrada7 entrada8 entrada9 entrada10 semaforoA1
semaforoA2 semaforoB1 semaforoB2 semaforoB3 semaforoB4 semaforoC1 semaforoC2
semaforoD1 semaforoD2 semaforoD3 semaforoD4 segA segB segC segD tviaje]
```

Para cada vehículo que sigue una ruta determinada se ha creado una raza, es decir un *breed*, al cual se le ha designado diferentes características, por ejemplo:

```
breed [carro1]

carro1-own [ speed tespera ]
```

Setup.- Para la configuración, se ha fijado todos los comandos para dibujar el plano, determinar velocidades, y escoger si se observa o no el carro de muestra:

```
to setup

clear-all reset-ticks clear-turtles

clear-patches clear-drawing clear-all-plots

clear-output draw-road set vel (0.03125 ) set velgiro (0.03125 / 4)

set equiv 6.6 set amarillo 3 semaforos

inicializar auto-viaje

if observar? = true [ follow carromuestra watch carromuestra] end
```

Auto de Muestra.- Se ha decidido tomar un auto de muestra, de modo que se pueda ver su trayectoria a través del siguiente comando:

```
to auto-viaje

set carromuestra one-of carro1

ask carromuestra [set shape car"set size 2 set heading 90

set tespera 0 set color black]

end
```

Inicializar Vehículos.- Para crear el número de vehículos iniciales se ha trabajado con el siguiente comando (se repite el mismo comando para todos los vehículos generados en un comienzo):

```
to inicializar

create-carro1 (Numero-Vehiculos-Iniciales / 4) [

setxy random-xxcor 42 set size 1 set heading 90 separate-cars ]

end

to separate-cars if any? other turtles-here

[ fd 2 separate-cars ] end
```

Generar Vehículos.- Para generar vehículos se ha trabajado generando vehículos de manera randomica, experimentando la aleatoriedad exacta para reproducir los tiempos de llegada reales del sistema:

```

to crear-carros

  ifelse (any? turtles-at 41 83) [ask entrada4 [ sprout-carro4 0 ]]

  [if (ticks mod (random 6 + 1) ) = 0 [ask entrada4 [

    sprout-carro4 1 [ set size 1 set heading 180 ]]]]

end

```

Avanzar.- Para programar los comandos del botón avanzar, se ha combinado los cambios de fase, con la generación de vehículos, con el movimiento de cada uno de los mismo y la actualización de los tres gráficos para cada paso:

```

to go

  contar tick ask entrada1 [crear-carros] cambiar-semaforo

  ifelse observar? = true [ follow carromuestra watch carromuestra]

  [ reset-perspective] set num-cars-stopped 0 mover-carro1 set tiempo ((mean[tespera]
of turtles) * 3.75) do-plotting end

```

Movimiento de Autos.- El movimiento de cada raza de vehículo está definido de la siguiente por los dos siguientes comandos:

```
to mover-carro1
```

```
ask carro1-on patch 406 42 [die]
```

```
ask carro1 [ detenerse-semaforo] end
```

```
to detenerse-semaforo
```

```
ask carro1 with [xcor >406 and ycor = 42 and size = 1][die]
```

```
ask carro1 with [size = 1][ ifelse (([pcolor] of patch-ahead 1 = red))]
```

```
[ fd 0]
```

```
[ifelse any? turtles-at 3 0 [set speed 0][fd vel] ]
```

```
record-data end
```

Gráficos.- Para realizar las gráficas se realiza la siguiente sucesión de comandos:

```
to record-data
```

```
ifelse speed = 0
```

```
[set num-cars-stopped num-cars-stopped + 1 set tespera tespera + 1]
```

```
[set tespera 0] end
```

to do-plotting

plot-new-value .^autos Detenidos"num-cars-stopped

*plot-new-value "Tiempo Promedio de Espera"((mean[tespera] of turtles) * 3.75)*

*plot-new-value "Tiempo de Viaje"(tviaje * 3.75)*

end

to set-up-plots

set-current-plot .^autos Detenidos"

plot num-cars-stopped

set-current-plot "Tiempo Promedio de Espera"

*plot ((mean [tespera] of turtles) * 3.75)*

set-current-plot "Tiempo de Viaje"

*plot (tviaje * 3.75)*

end

to plot-new-value [name-of-plot value]

set-current-plot name-of-plot

plot value end

Programación de Semáforos.- Para el caso de los semáforos, se muestra los códigos utilizados en el caso de la intersección A:

```
::FASES DE SEMAFOROS
```

```
to faseA1
```

```
ask semaforoA1 [set pcolor green ] ask semaforoA2 [set pcolor red]
```

```
end
```

```
to faseA2
```

```
ask semaforoA1 [set pcolor red] ask semaforoA2 [set pcolor green]
```

```
end
```

```
::PONER SEMAFOROS
```

```
to semaforos
```

```
set semaforoA1 patches with [pxcor = 40 and pycor = 42 or pxcor = 47 and pycor  
= 49 ] or pxcor = 40 and pycor = 44 or pxcor = 47 and pycor = 52
```

```
set semaforoA2 patches with [pxcor = 46 and pycor = 41 or pxcor = 41 and pycor  
= 54 ]
```

```
end
```

to cambiar-semaforo

if (SECUENCIA = false)

if (segA >0 and segA <= ((SemA / equiv) - (SemAGonzalezSuarez / equiv)))

[faseA1] if (segA >(amarillo + (SemA / equiv) - (SemAGonzalezSuarez / equiv)))

and segA <= (amarillo + (SemA / equiv)) [faseA2] if segA >(amarillo + (SemA / equiv))

[set segA 0]

if (SECUENCIA = true) if (segA >0 and segA <= ((SemA / equiv) - (SemAGonzalezSuarez / equiv))) [faseA1] if (segA >((SemA / equiv) - (SemAGonzalezSuarez / equiv))) and segA <= (SemA / equiv) [faseA2] if segA >(SemA / equiv) [set segA 0] end

5.3. Validación del Modelo

5.3.1. Mapa de la Zona de Estudio

La figura 5.6.

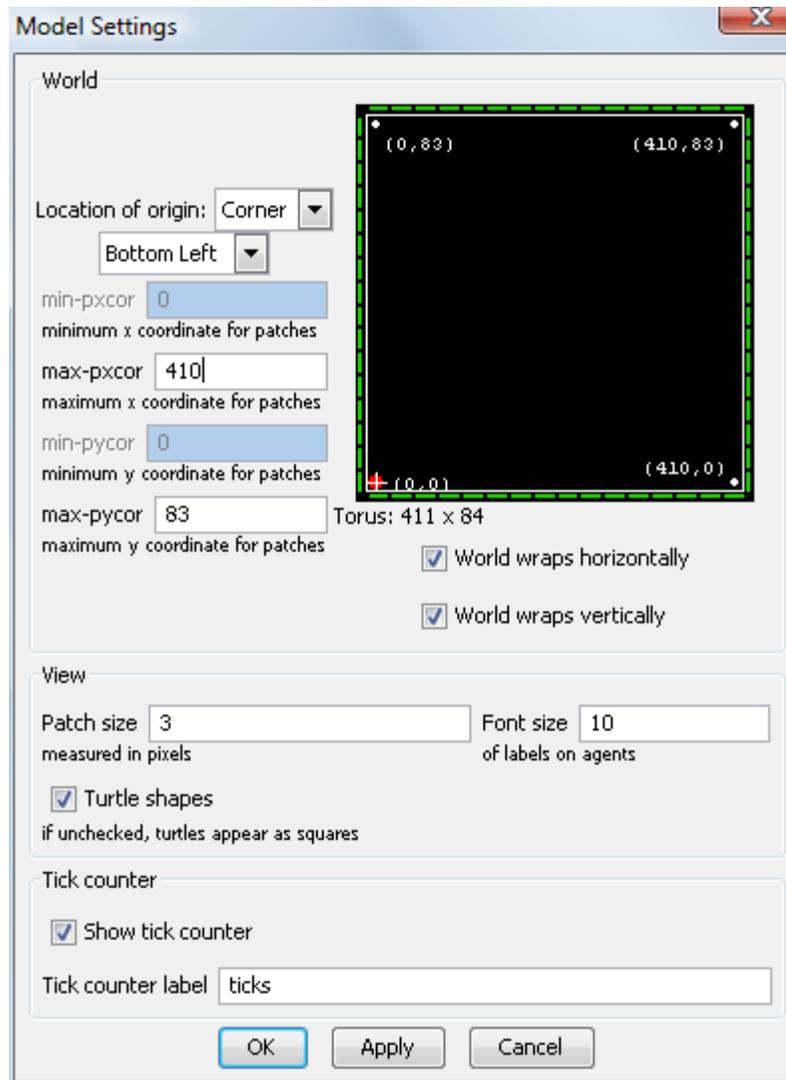


Figura 5.6: Configuración del Entorno

Se ha configurado el mapa de estudio asumiendo que cada patch equivale a 2.96m, por lo cual se ha dispuesto que a lo largo del eje x se repartan 410 patches mientras que a lo largo del eje y se repartan 83. Esto se ha logrado a través de ***Model Settings***:

Como se mencionó en el análisis de la Zona de Estudio, la distancia entre las intersecciones A y D es de 1131.80m, en este caso los 410 patches representan 1213.6m, debido a que se ha considerado 81.2m distribuidos en un tramo de avenida antes de la intersección A y otro tramo después de la intersección D.

5.3.2. Tiempo y Espacio

Tiempo de Semáforos.- Para considerar el tiempo de los semáforos, se ha probado después de cronometrar sus tiempos que por cada tick que corre en el sistema transcurren 6.6 segundos en el tiempo real. Los tiempos de los semáforos de la simulación a partir de los datos reales que fueron ingresados a la interfaz del modelo son:

Intersección	Movimiento	<i>TiempoVerdeEfectivo</i>
<i>A</i>	Ciclo Total	90
<i>A</i>	Gonzalez Suarez	28
<i>B</i>	Ciclo Total	108
<i>B</i>	Giro Eloy Alfaro	20
<i>B</i>	Sentido Eloy Alfaro	26
<i>C</i>	Ciclo Total	97
<i>C</i>	Sentido Juan Montalvo	35
<i>D</i>	Ciclo Total	107
<i>D</i>	Giro Francisco Pizarro	15
<i>D</i>	Sentido Francisco Pizarro	30

Tabla 5.10: *Tiempos de Semáforos a Ingresar en el Modelo*

Velocidad Promedio.- Para configurar la velocidad a la que viajan los vehículos, se ha considerado el mismo hecho que un tick representa 6.6 segundos, además que por datos recogidos en los días de observación de la zona de estudio, se estimo que la velocidad promedio en la Avenida Interoceánica oscila entre 40 y 50 km/h, por lo cual se ha tomado una velocidad promedio de 45km/h.

Número de Vehículos Servidos en Fase Verde.- Para analizar cuán cercano está el modelo de la realidad, se ha realizado un conteo de vehículos que pasan en su fase verde para cada entrada o llegada de las intersecciones durante 15 ciclos, que fue el tiempo observado en la realidad. La tabla que se muestran indica el número de vehículos que pasan en el verde efectivo de cada semáforo del modelo (V/C Modelo) vs. los vehículos de las observaciones (V/C Observado) hechas in situ:

Entrada/Llegada	qADE	V/C Observado	V/C Modelo	Diferencia
Entrada 1A-der	618	10.64	9.43	1.21
Entrada 1A-izq	786	13.54	15.23	-1.69
Entrada 2A	360	2.80	2.49	0.31
Entrada 3A	389	3.03	2.53	0.50
Llegada 4A-der	699	12.03	10.06	1.97
Llegada 4A-izq	855	14.73	16.23	-1.50
Llegada 1B-der	670	11.54	11.62	-0.08
Llegada 1B-izq	697	12.00	15.2	-3.20
Entrada 3B	285	3.06	4.22	-1.16
Llegada 4B-der	590	13.43	14.26	-0.83
Llegada 4B-izq	606	13.81	17.86	-4.05
Llegada 1C-der	793	13.66	11.23	2.43
Llegada 1C-izq	838	14.43	14.75	-0.32
Entrada 2C	349	3.39	3	0.39
Entrada 3C	361	3.51	3.98	-0.47
Llegada 4C-der	724	12.47	9.87	2.60
Llegada 4C-izq	849	14.62	14.23	0.39
Llegada 1D-der	793	16.96	14.75	2.21
Llegada 1D-izq	794	16.99	16.32	0.67
Entrada 2D	313	2.61	3.5	-0.89
Entrada 4D-der	549	9.46	10.00	-0.55
Entrada 4D-izq	679	11.69	12.03	-0.34

Tabla 5.11: *Diferencia de Vehículos Servidos en Ciclo Modelo vs. Ciclo Observado*

5.4. Datos Obtenidos de Simulaciones

A continuación se presentan los tiempos destinados y graficos obtenidos de cada parámetro para las simulaciones.

5.4.1. Simulación Escenario Real

A partir de los tiempos reales se ha obtenido los siguientes resultados:

La figura 5.19.

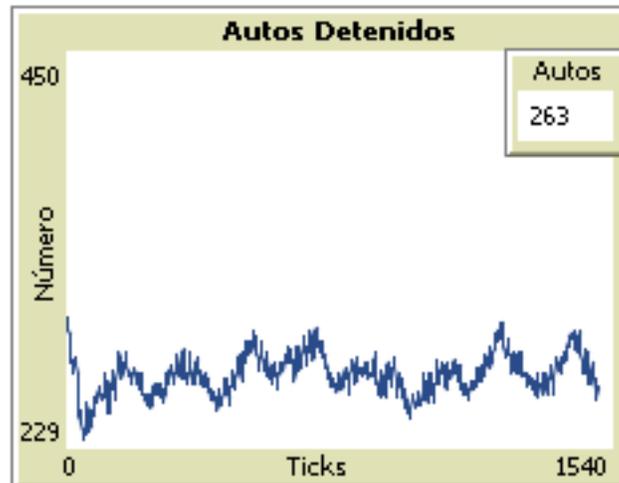


Figura 5.7: Autos Detenidos Escenario Real

La figura 5.20.

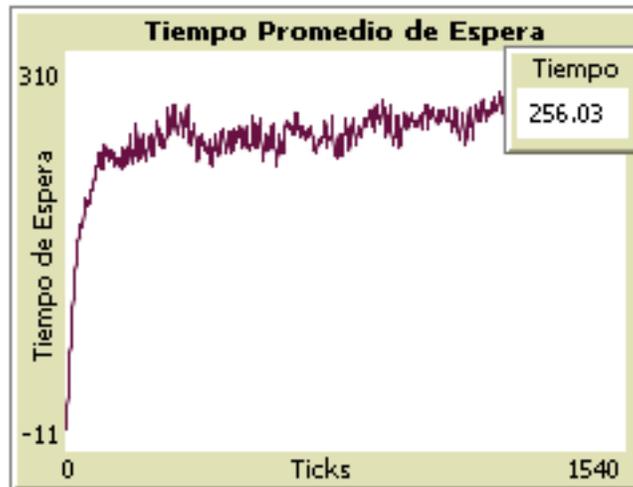


Figura 5.8: *Tiempo de Espera Escenario Real*

La figura 5.21.

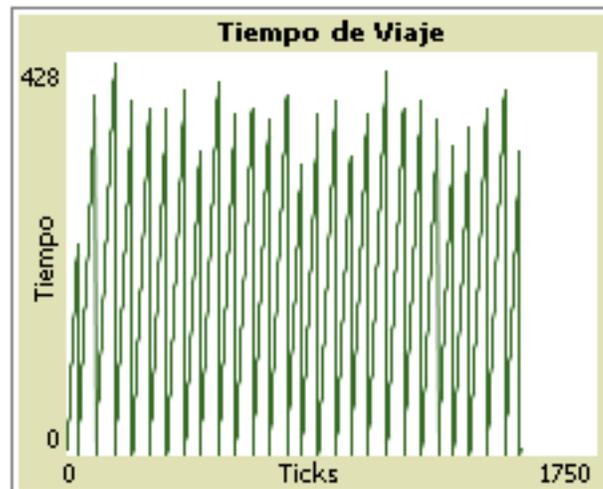


Figura 5.9: *Tiempo de Viaje Escenario Real*

5.4.2. Simulación Escenario Propuesto 1

Para el escenario 1, se ha considerado que los semáforos se encuentran sincronizados entre si. El intervalo de tiempo entre la intersección A y la intersección B es de 40s, entre la intersección B y C el intervalo de tiempo es de 35s y entre C y de es de 25s.

Intersección	Movimiento	<i>TiempoVerdeEfectivo</i>
A	Ciclo Total	110
A	Gonzalez Suarez	40
B	Ciclo Total	110
B	Giro Eloy Alfaro	30
B	Sentido Eloy Alfaro	25
C	Ciclo Total	110
C	Sentido Juan Montalvo	40
D	Ciclo Total	110
D	Giro Francisco Pizarro	35
D	Sentido Francisco Pizarro	20

Tabla 5.12: *Tiempos de Semáforos Escenario Propuesto 1*

En este caso se ha asumido para los tiempos que el ciclo total es de 110s, siendo el 36.4% de este tiempo el tiempo para las calles secundarias en las intersecciones A y C, mientras que para la intersección D, un 22.73% permite el giro en dirección de la calle Eloy Alfaro y el 36.4% permite el movimiento en dirección de esta, por último en la intersección D, 32% del ciclo permite el movimiento en sentido de la calle Gonzalo pizarro y un 18% el giro hacia esta, obteniéndose los siguientes resultados:

La figura 5.19.

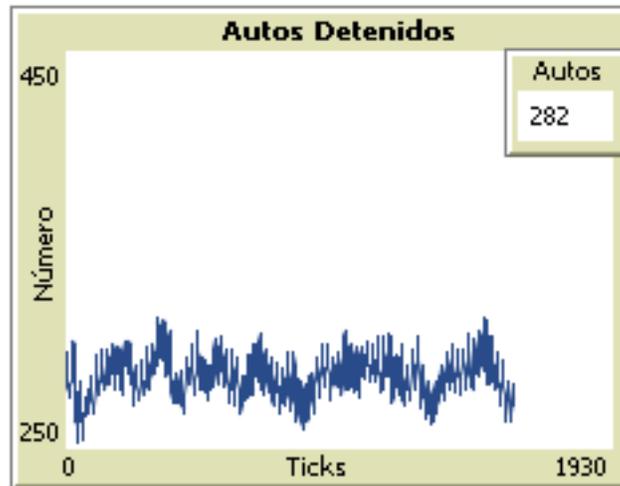


Figura 5.10: *Autos Detenidos Escenario 1*

La figura 5.20.

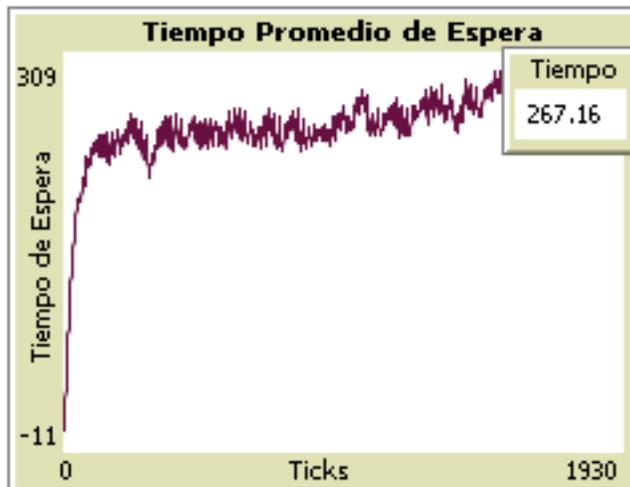


Figura 5.11: *Tiempo de Espera Escenario 1*

La figura 5.21.

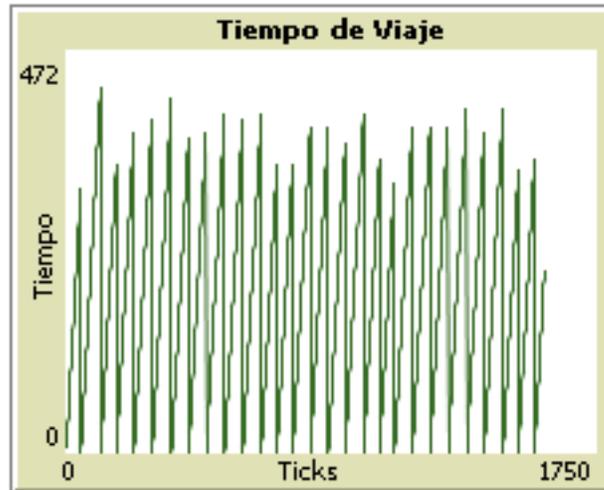


Figura 5.12: *Tiempo de Viaje Escenario 1*

5.4.3. Simulación Escenario Propuesto 2

En el caso del escenario 2, también se ha propuesto semáforos secuenciales, con intervalo de tiempo entre A y B de 35s , entre B y C 45s y entre C y D 20s, los tiempos a ingresarse en la simulación son:

Intersección	Movimiento	<i>TiempoVerdeEfectivo</i>
<i>A</i>	Ciclo Total	95
<i>A</i>	Gonzalez Suarez	30
<i>B</i>	Ciclo Total	95
<i>B</i>	Giro Eloy Alfaro	25
<i>B</i>	Sentido Eloy Alfaro	15
<i>C</i>	Ciclo Total	95
<i>C</i>	Sentido Juan Montalvo	30
<i>D</i>	Ciclo Total	95
<i>D</i>	Giro Francisco Pizarro	25
<i>D</i>	Sentido Francisco Pizarro	15

Tabla 5.13: *Tiempos de Semáforos Escenario Propuesto 2*

Para esta intersección, se han considerado ciclos de 95s, en el caso de la intersección A y C, se ha dispuesto un 32% de este tiempo a los semáforos de las calles secundarias. Para la intersección B y C, 16% del tiempo de ciclo permite los giros, mientras que el 26% permite movimientos en dirección de las calles secundarias. Los gráficos de resultado para este caso son los siguientes:

La figura 5.19.

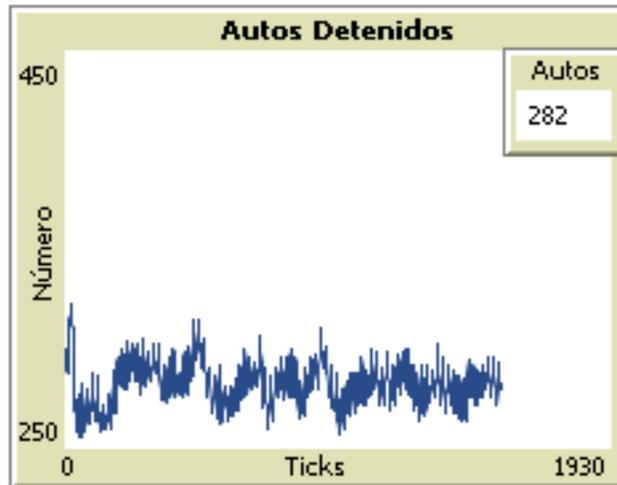


Figura 5.13: *Autos Detenidos Escenario 2*

La figura 5.20.

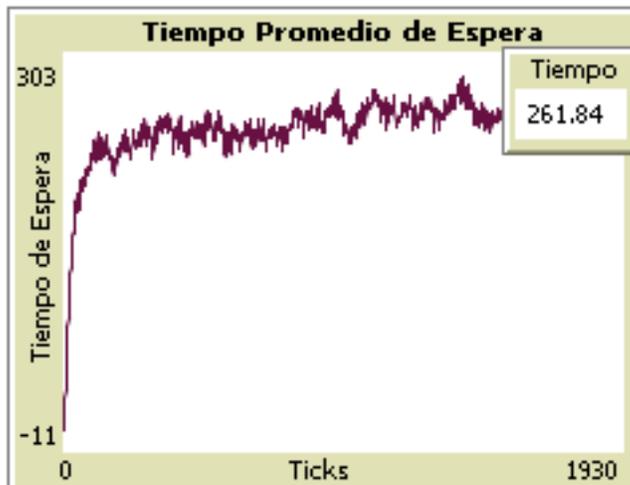


Figura 5.14: *Tiempo de Espera Escenario 2*

La figura 5.21.

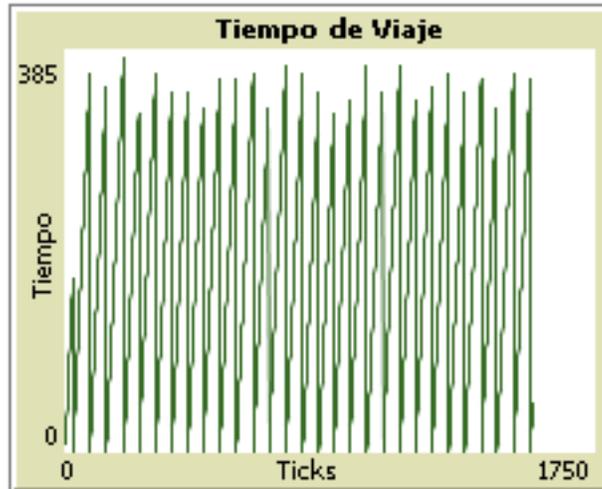


Figura 5.15: *Tiempo de Viaje Escenario 2*

5.4.4. Simulación Escenario Propuesto 3

Para el escenario 3, se considera semáforos desincronizados, además que se plantea que los semáforos de la intersección A y C, y los semáforos B y D, tienen la misma longitud de ciclo.

Intersección	Movimiento	<i>Tiempo Verde Efectivo</i>
<i>A</i>	Ciclo Total	100
<i>A</i>	Gonzalez Suarez	25
<i>B</i>	Ciclo Total	115
<i>B</i>	Giro Eloy Alfaro	30
<i>B</i>	Sentido Eloy Alfaro	15
<i>C</i>	Ciclo Total	100
<i>C</i>	Sentido Juan Montalvo	30
<i>D</i>	Ciclo Total	115
<i>D</i>	Giro Francisco Pizarro	30
<i>D</i>	Sentido Francisco Pizarro	15

Tabla 5.14: *Tiempos de Semáforos Escenario Propuesto 3*

En el caso 3, el tiempo de ciclo para la intersección A y C es de 100s, siendo el tiempo para las calles secundarias entre el 25 % y 30 % respectivamente. En la intersección B y D, se han fijado ciclos de 115s, fijando el 13 % de este tiempo para giros y el 26 % para movimientos en dirección de las calles secundarias. Se obtuvo gráficamente los siguientes resultados:

La figura 5.19.

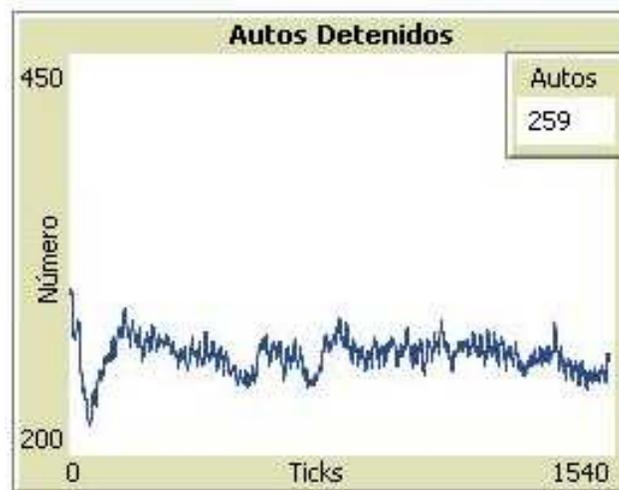


Figura 5.16: *Autos Detenidos Escenario 3*

La figura 5.20.



Figura 5.17: *Tiempo de Espera Escenario 3*

La figura 5.21.

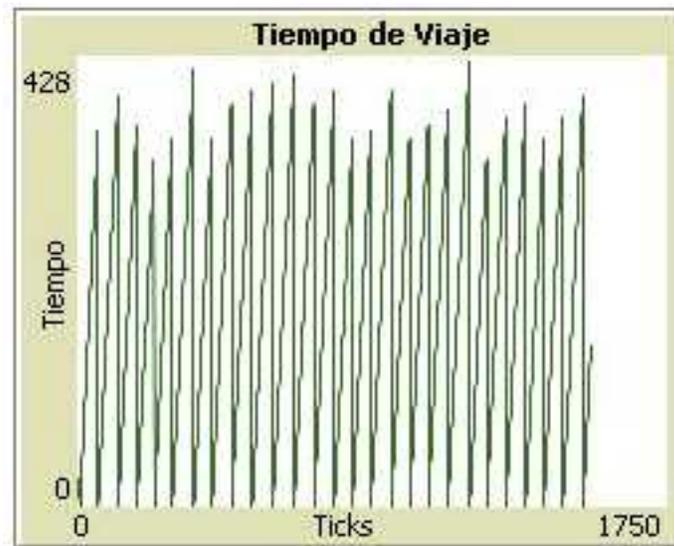


Figura 5.18: *Tiempo de Viaje Escenario 3*

5.4.5. Simulación Escenario Propuesto 4

En este caso, al igual que en el caso 3, se considera semáforos desincronizados, de modo que la longitud de ciclos es la misma para todas las intersecciones.

Intersección	Movimiento	<i>Tiempo Verde Efectivo</i>
<i>A</i>	Ciclo Total	115
<i>A</i>	Gonzalez Suarez	40
<i>B</i>	Ciclo Total	115
<i>B</i>	Giro Eloy Alfaro	35
<i>B</i>	Sentido Eloy Alfaro	15
<i>C</i>	Ciclo Total	115
<i>C</i>	Sentido Juan Montalvo	40
<i>D</i>	Ciclo Total	115
<i>D</i>	Giro Francisco Pizarro	35
<i>D</i>	Sentido Francisco Pizarro	15

Tabla 5.15: *Tiempos de Semáforos Escenario Propuesto 4*

En este caso los ciclos son de 115, se trabajó al igual que en casos anteriores por pares. La intersección A y C, consideran un porcentaje de 34.78% del tiempo de ciclo para permitir el movimiento en sentido de las calles secundarias, mientras que para la intersección B y D, 13% de este tiempo permite los giros y 30.43%

La figura 5.19.

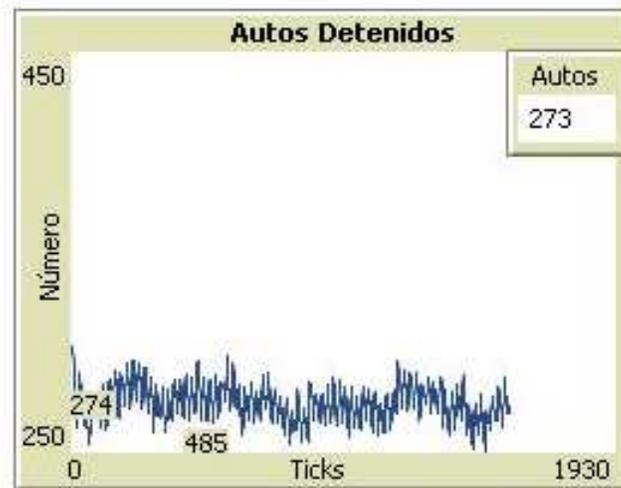


Figura 5.19: *Autos Detenidos Escenario 4*

La figura 5.20.

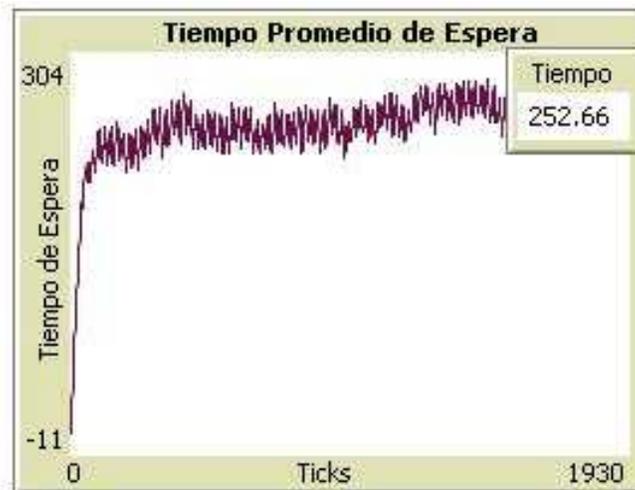


Figura 5.20: *Tiempo de Espera Escenario 4*

La figura 5.21.

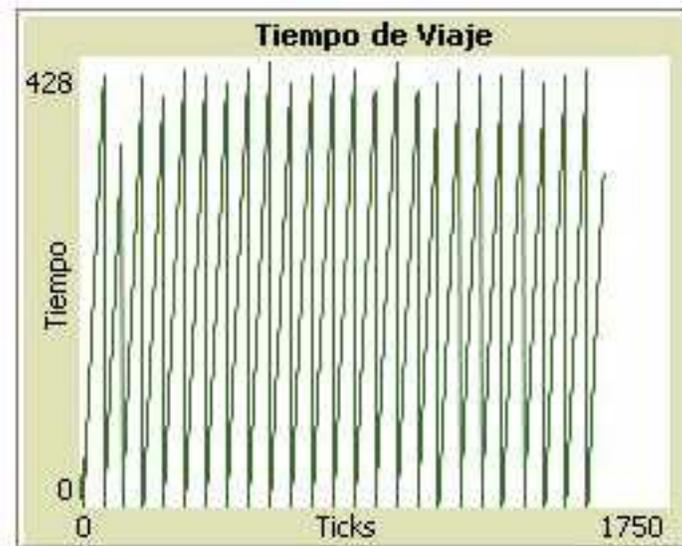


Figura 5.21: *Tiempo de Viaje Escenario 4*

Los resultados referentes a los 3 parámetros considerados en el modelo, fueron exportados a un documento de excel, a partir del cual se realizó la comparación entre los diferentes escenarios.

5.5. Comparación de Resultados entre Escenarios

En la tabla que se muestra a continuación se presentan las medias y varianzas para los parámetros analizados en los diferentes escenarios.

Parámetro	Autos Detenidos		Tiempo de Espera		Tiempo de Viaje	
	Media	Varianza	Media	Varianza	Media	Varianza
SIMULACIÓN REAL	271.66	106.81	252.23	164.98	371.68	687.53
ESCENARIO 1	286.34	99.34	254.32	162.97	367.52	760.13
ESCENARIO 2	281.57	96.65	249.76	128.74	350.15	263.65
ESCENARIO 3	261.54	74.02	249.07	129.75	372.03	688.30
ESCENARIO 4	273.64	59.70	250.75	166.49	408.51	81.77

Tabla 5.16: *Medias y Varianzas de Escenarios*

Se ha realizado para los cuatro escenarios y los 3 parámetros, una prueba de medias poblacionales, de modo que se establezca si existe o no una diferencia significativa entre lo propuesto y lo observado. A partir de este análisis, adjunto en el apéndice D, se observó que si existe diferencia en todos los casos con un 99% de confianza.

En el siguiente cuadro se muestran los porcentajes de reducción o aumento que se ha tenido para cada parámetro en los diferentes escenarios comparados con el escenario real:

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Autos Detenidos	-5.12	-3.52	3.87	-0.72
Tiempo de Viaje	1.13	6.15	-0.09	-9.014
Tiempo de Espera	-0.82	0.99	1.27	0.59

Tabla 5.17: *Porcentajes de Cambio en cada Parámetro para Escenarios*

En el caso del escenario 1, se observa un 5% de disminución en el número de vehículos detenidos, sin embargo el tiempo de viaje y el tiempo de espera permanecen iguales al modelo original, lo mismo sucede en el escenario 2, con la diferencia que el tiempo de viaje se incrementa un 6%.

El escenario 3, por su parte es el escenario menos favorable, debido a que por un lado se mantienen estables el tiempo de viaje y el tiempo de espera, y por otro lado se incrementa un 4% el número de autos detenidos. Finalmente el escenario 4, se ve un decremento del 9% en el tiempo de viaje, mientras que los autos detenidos y el tiempo de espera no varían mucho con respecto a lo actual.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

La Av. Interoceánica conecta a Puembo, Tumbaco y Cumbaya con la ciudad de Quito, esto produce un gran flujo vehicular en la zona, por lo que se debe pensar en posibles soluciones para aligerar el tráfico que se produce en las horas pico. Una de las posibles soluciones consiste en modificar los tiempos de los semáforos y sincronizarlos entre ellos.

Por las características geométricas del tramo, este ha sido clasificado como de inclinación media y curvatura rectilínea debido a las curvas imperceptibles.

En el tramo la intersección con la calle Gonzalez Suárez y la calle Juan Montalvo, tienen la misma configuración. Son intersecciones de dos fases, en las cuales en el sentido de la Av. Interoceánica solo se permite movimiento rectilíneo y giros a la derecha. Por otra parte, las intersecciones con las calles Eloy Alfaro y Francisco Pizarro, se permite

a lo largo de la Av. Interoceánica giros a la izquierda, en el caso de la calle Eloy Alfaro en sentido Tumbaco-Cumbaya, y en el caso de la calle Francisco Pizarro se permite el giro en sentido Cumbaya-Tumbaco.

La capacidad vehicular por hora es similar al volumen horario de máxima demanda, debido a que se realizó la obtención de datos en la hora de mayor flujo vehicular, por este motivo el factor de la hora de máxima demanda es cercano a 1.

El porcentaje de vehículos livianos sobre los carriles derechos de la Av. Interoceánica oscila entre 85 % y 95 %, mientras que en el carril izquierdo este porcentaje está sobre el 90 %. Por otra parte, para las calles secundarias el porcentaje de vehículos livianos oscila entre el 90 % y el 100 %.

Se observó que existe alrededor de 5 % al 10 % de vehículos pesados que invaden los carriles izquierdos de la Av. Interoceánica, ocasionando demoras.

El tiempo de llegada y de servicio en promedio es de 5.4s sobre la Av. Interoceánica, mientras que en las calles secundarias este es de 10.2s.

El factor de utilización para todas las entradas es mayor a 1, lo cual implica que la demanda es mayor a la oferta del servicio, lo que caotiza el tráfico vehicular.

La diferencia entre el volumen de vehículos equivalentes y el número de vehículos por hora es de 10 % para el carril derecho de la Av. Interoceánica y de 4 % para el carril izquierdo.

Si se considera una hora completa de fase verde en sentido de la Av. Interoceánica el número de vehículos servidos en esa hora sería de 500 a 600. Mientras que para las calles secundarias, este volumen varía de 300 a 350 vehículos por hora, a excepción de la entrada 3D, que tiene llegadas esporádicas.

Las distribuciones de llegada fueron realizadas utilizando máxima verosimilitud, con lo cuál se obtuvo distribuciones gamma que ajustan el modelo. El ajuste obtenido está cercano a la realidad, basados tanto en los Gráficos de Histograma vs. Función de Densidad de Distribución Gamma y el gráfico cuantil cuantil.

La diferencia de vehículos servidos en la fase verde entre la simulación y los datos reales estuvo entre 0 y 2 vehículos, por lo que se valida el modelo.

El tiempo de espera de los vehículos, en la simulación original es de 252 segundos, este es el promedio que un vehículo está detenido bien sea en un semáforo o por motivos de disipación de la cola.

El tiempo de viaje de la simulación real es de 371 segundos, este tiempo considera la hora pico y la velocidad promedio de 45m/s.

Al realizar pruebas de medias poblacionales, se encontró que para los 3 parámetros considerados si existe diferencia entre lo modelado y los escenarios con un 99% de confiabilidad.

Al realizar una comparación entre los distintos escenarios y el escenario real, se observó que el escenario 1 presenta una 5% de disminución en el número de vehículos

detenidos, sin embargo el tiempo de viaje y el tiempo de espera permanecen iguales al modelo original, lo mismo sucede en el escenario 2, con la diferencia que el tiempo de viaje se incrementa un 6 %.

El escenario 3, por su parte es el escenario menos favorable, debido a que por un lado se mantienen estables el tiempo de viaje y el tiempo de espera, y por otro lado se incrementa un 4 % el número de autos detenidos. Finalmente el escenario 4, se ve un decremento del 9 % en el tiempo de viaje, mientras que los autos detenidos y el tiempo de espera no varían mucho con respecto a lo actual.

Como se pudo ver en la simulación, el número de autos detenidos mejora al sincronizar los semáforos y prolongar el tiempo de movilidad en el sentido de la Av. Interoceánica, sin embargo, dadas las condiciones del sector, esto no es una solución adecuada. Las calles secundarias en la hora pico, se encuentran totalmente saturadas, por lo que requerirían mayor tiempo de fase verde, provocando caos en la Av. Interoceánica.

La sincronización de ciclos de semáforos, por si sola, no es una solución a la movilidad de Tumbaco. Por lo que se debería pensar en soluciones tales como: la reestructuración de las vías aledañas, ampliación de la Av. Interoceánica y priorización de carriles según origen destino.

ANEXO

Apéndice A

Fases de Intersecciones A - D

A.1. Fases de la Intersección A

La figura A.1.



Figura A.1: *Movimientos Posibles para la Primera Fase en la Intersección A*

La figura A.2.



Figura A.2: Movimientos Posibles para la Segunda Fase en la Intersección A

A.2. Fases de la Intersección B

La figura A.3.



Figura A.3: *Movimientos Posibles para la Primera Fase en la Intersección B*

La figura A.4.



Figura A.4: *Movimientos Posibles para la Segunda Fase en la Intersección B*

La figura A.5.



Figura A.5: *Movimientos Posibles para la Tercera Fase en la Intersección B*

A.3. Fases de la Intersección C

La figura A.6.

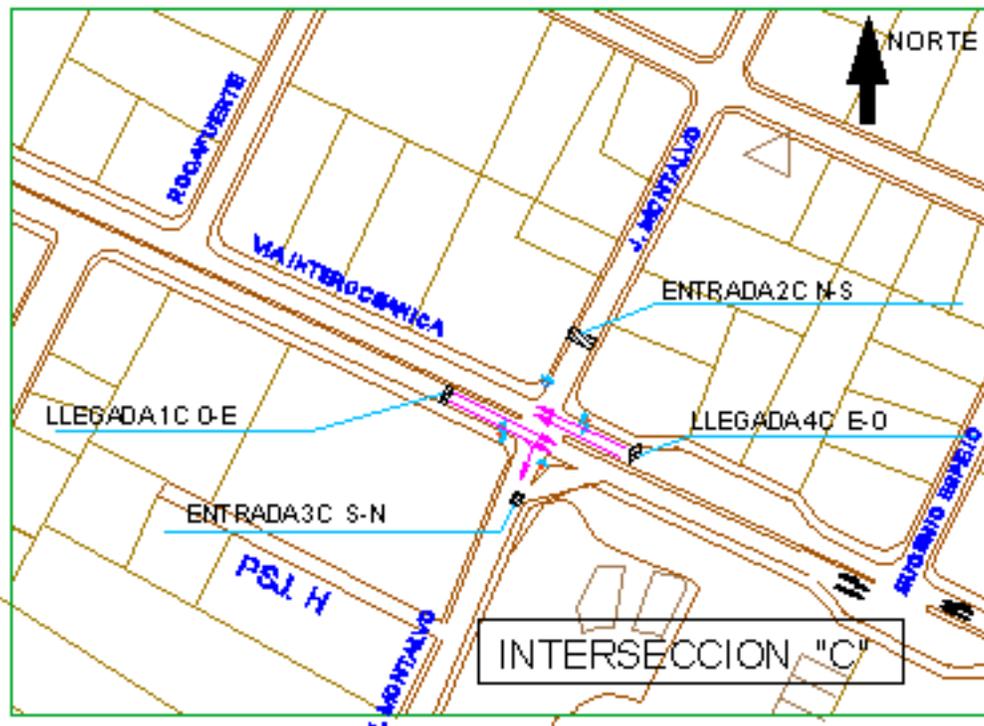


Figura A.6: *Movimientos Posibles para la Primera Fase en la Intersección C*

La figura A.7.

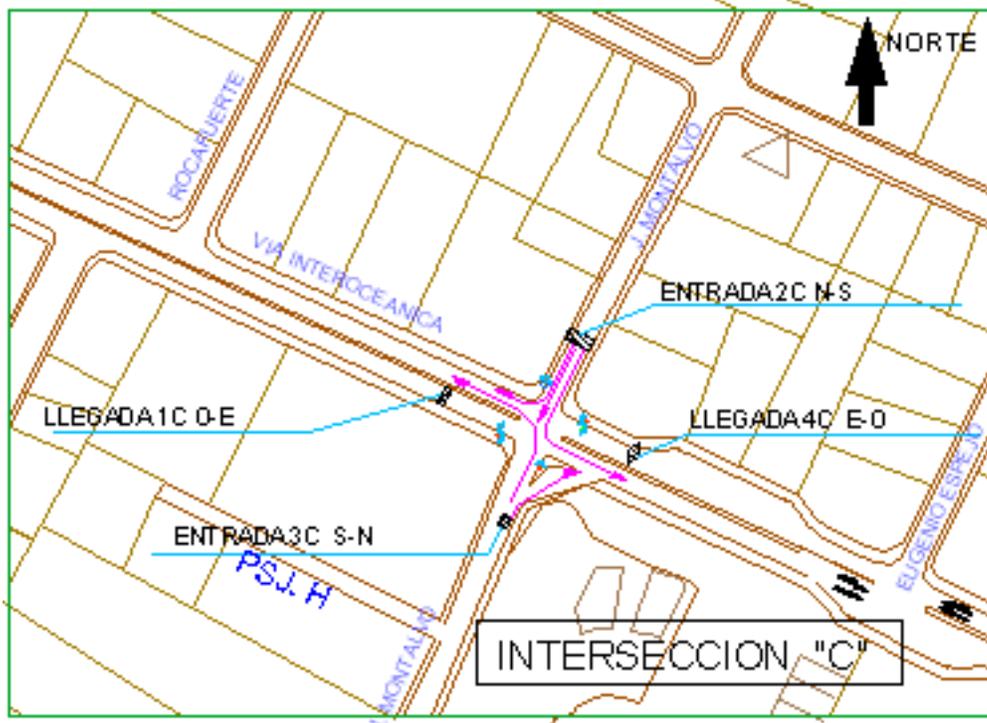


Figura A.7: Movimientos Posibles para la Segunda Fase en la Intersección C

A.4. Fases de la Intersección D

La figura A.8.



Figura A.8: Movimientos Posibles para la Primera Fase en la Intersección D

La figura A.9.



Figura A.9: Movimientos Posibles para la Segunda Fase en la Intersección D

La figura A.10.

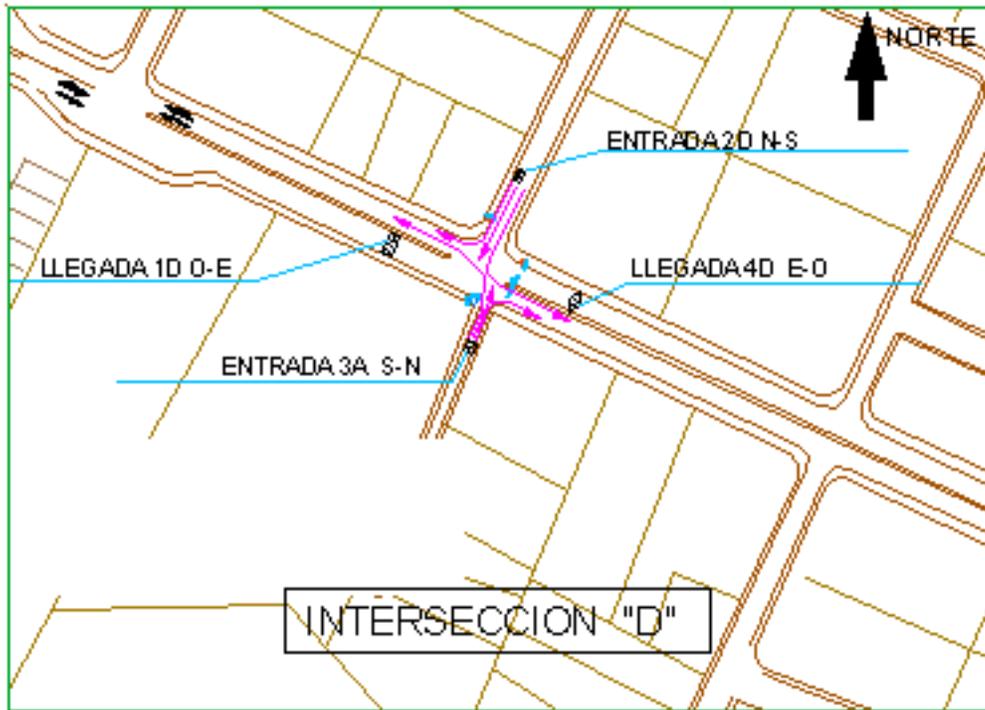


Figura A.10: *Movimientos Posibles para la Tercera Fase en la Intersección D*

Apéndice B

Gráficos de Ajuste de

Distribuciones de Llegada

La figura B.1.

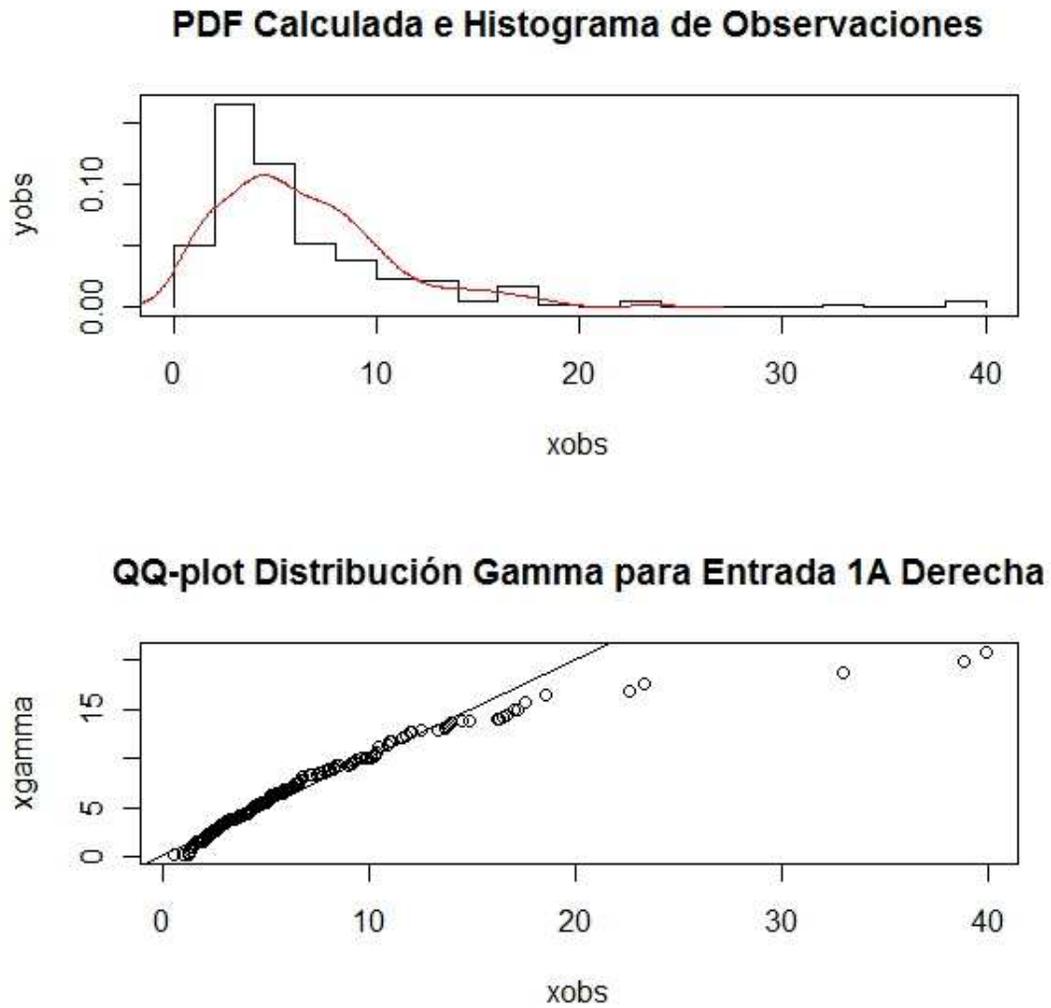


Figura B.1: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.2.

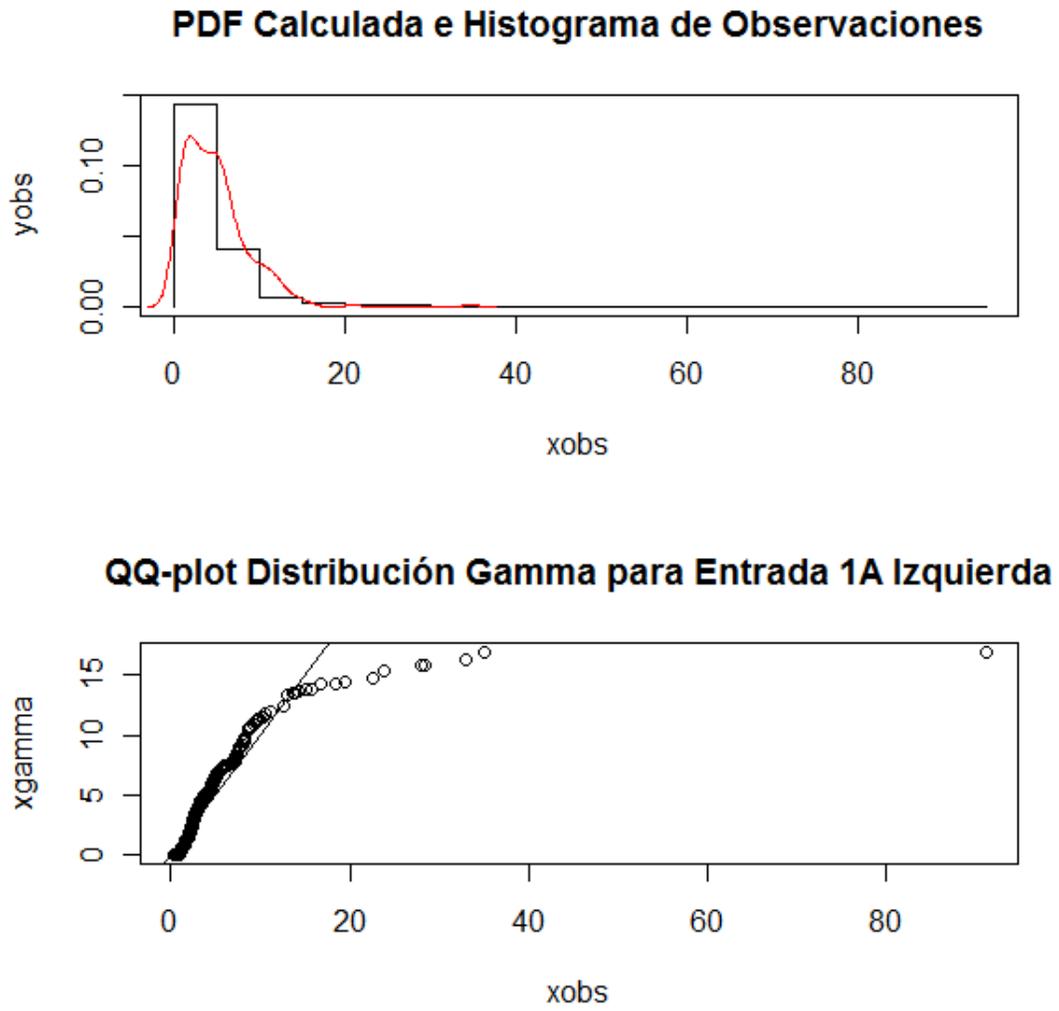


Figura B.2: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.3.

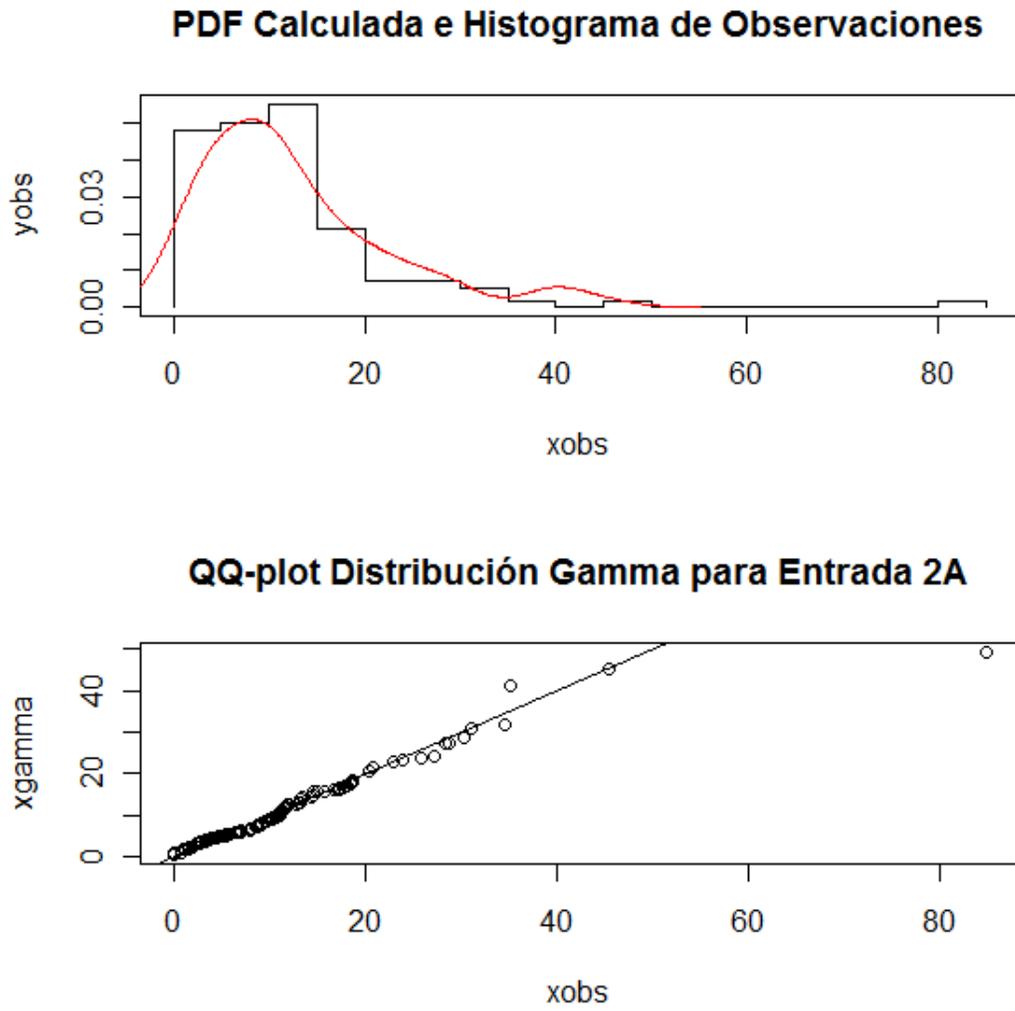


Figura B.3: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.4.

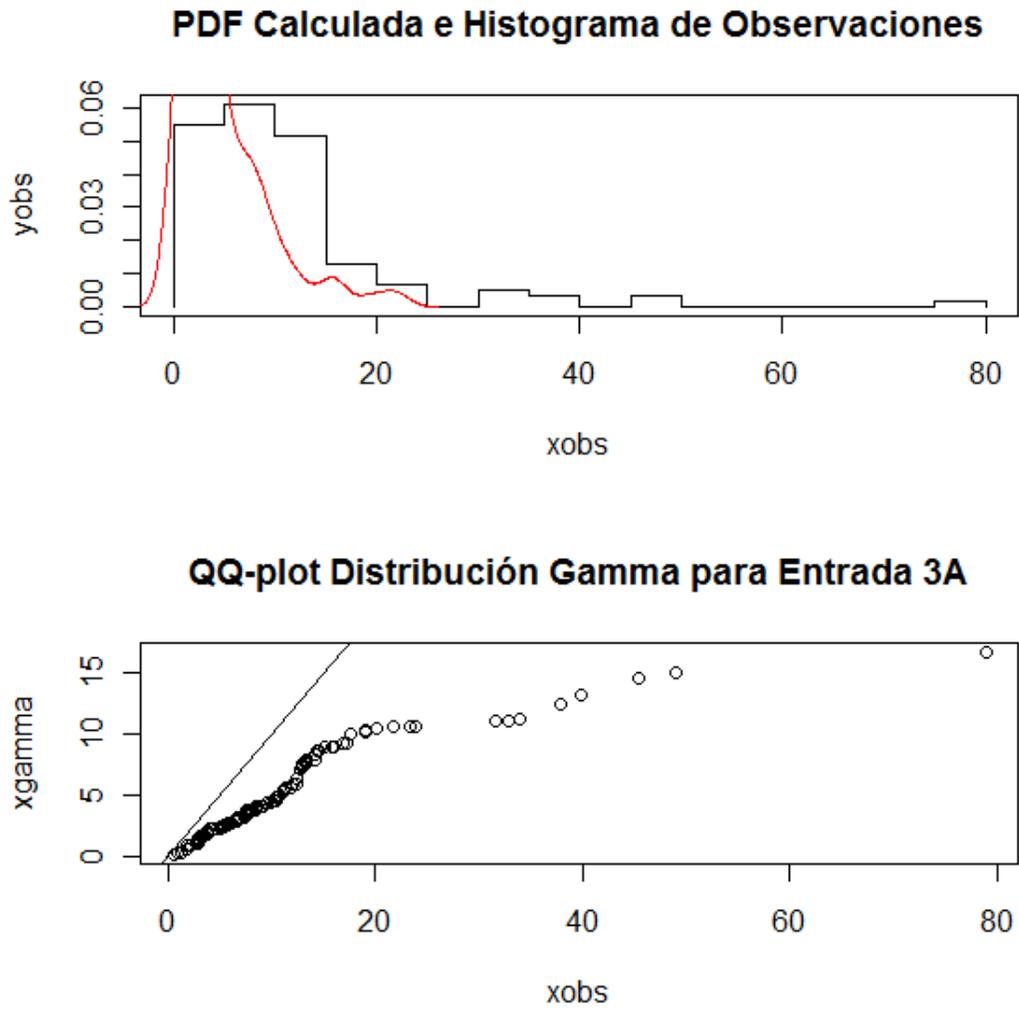


Figura B.4: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.5.

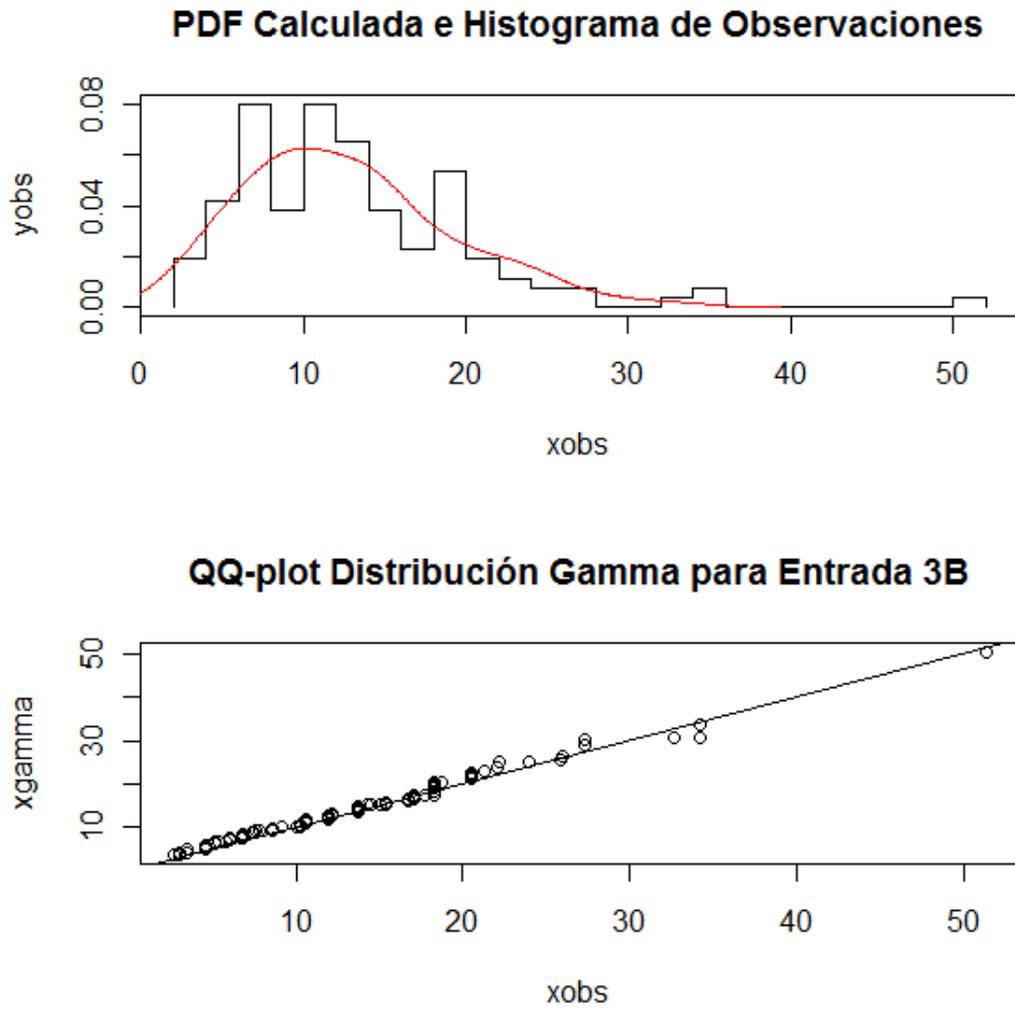


Figura B.5: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.6.

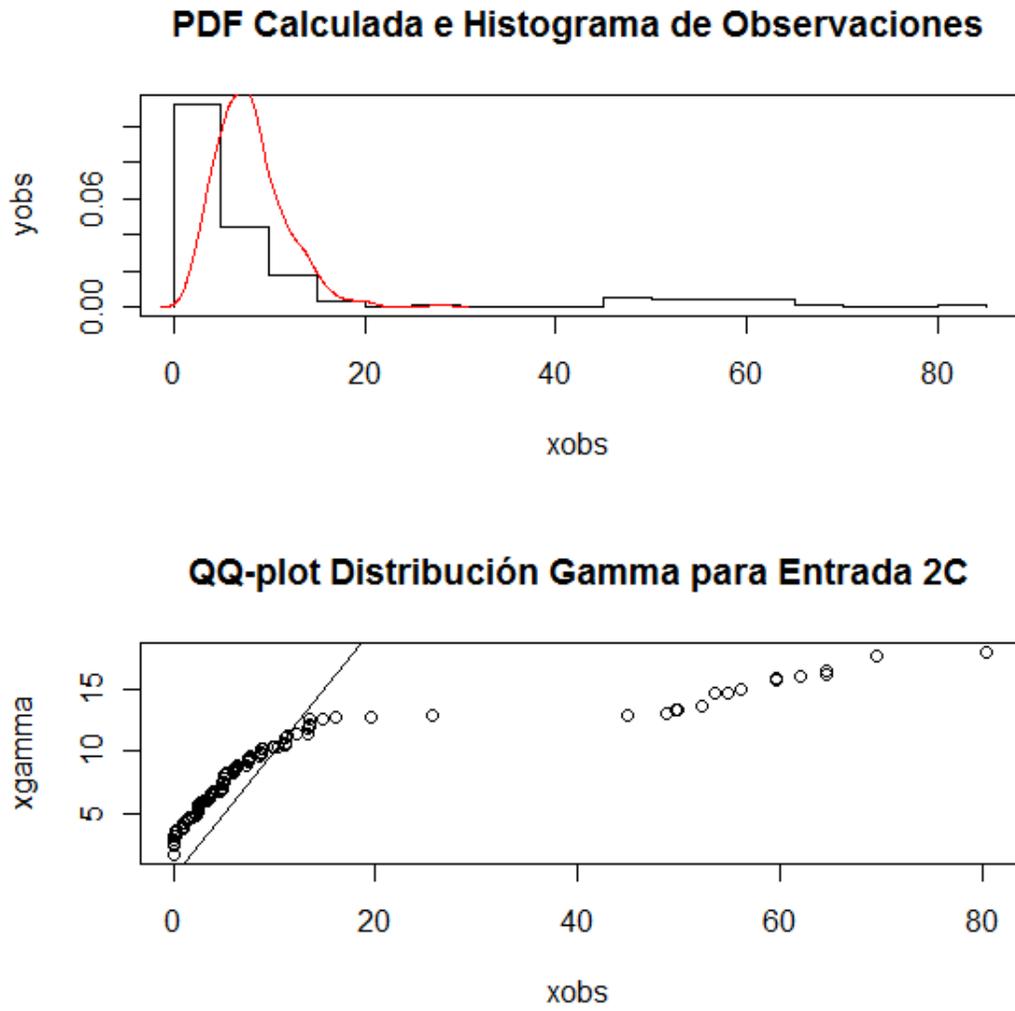


Figura B.6: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.7.

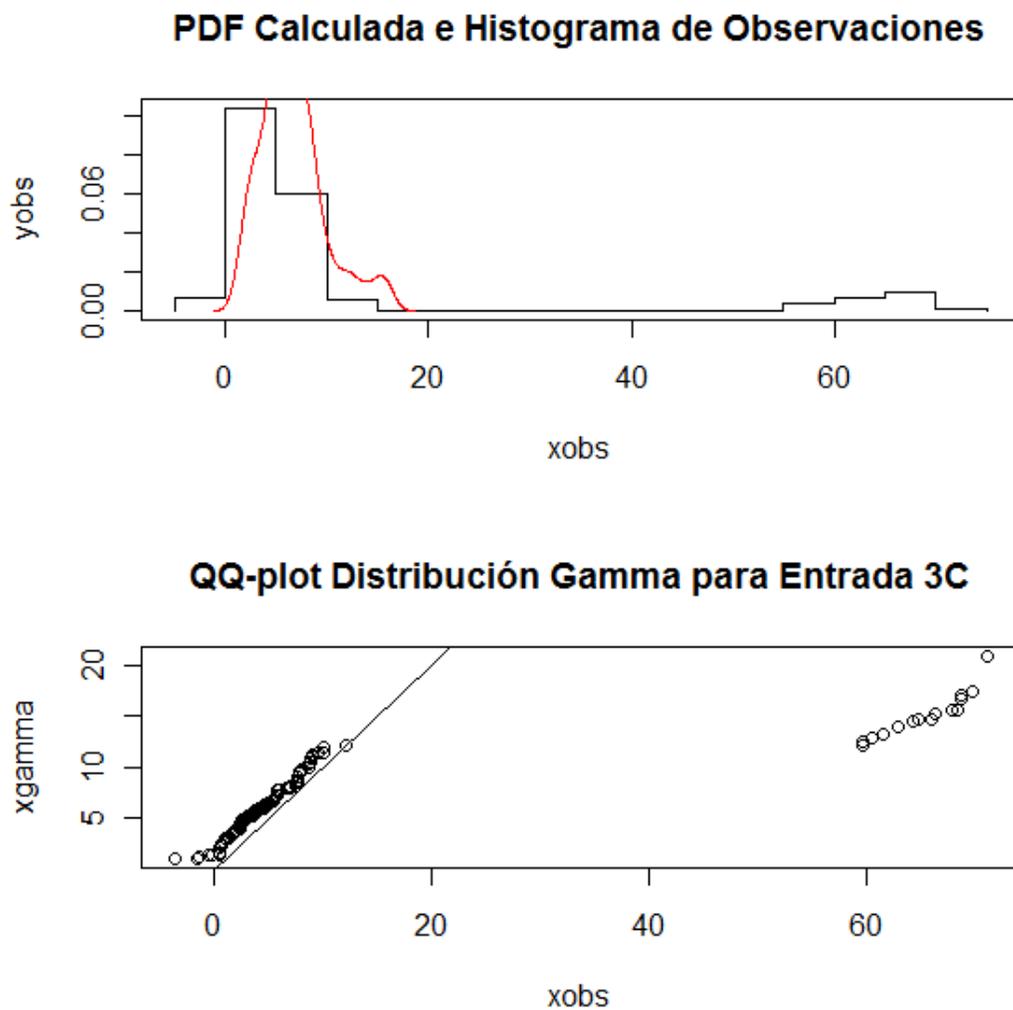


Figura B.7: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.8.

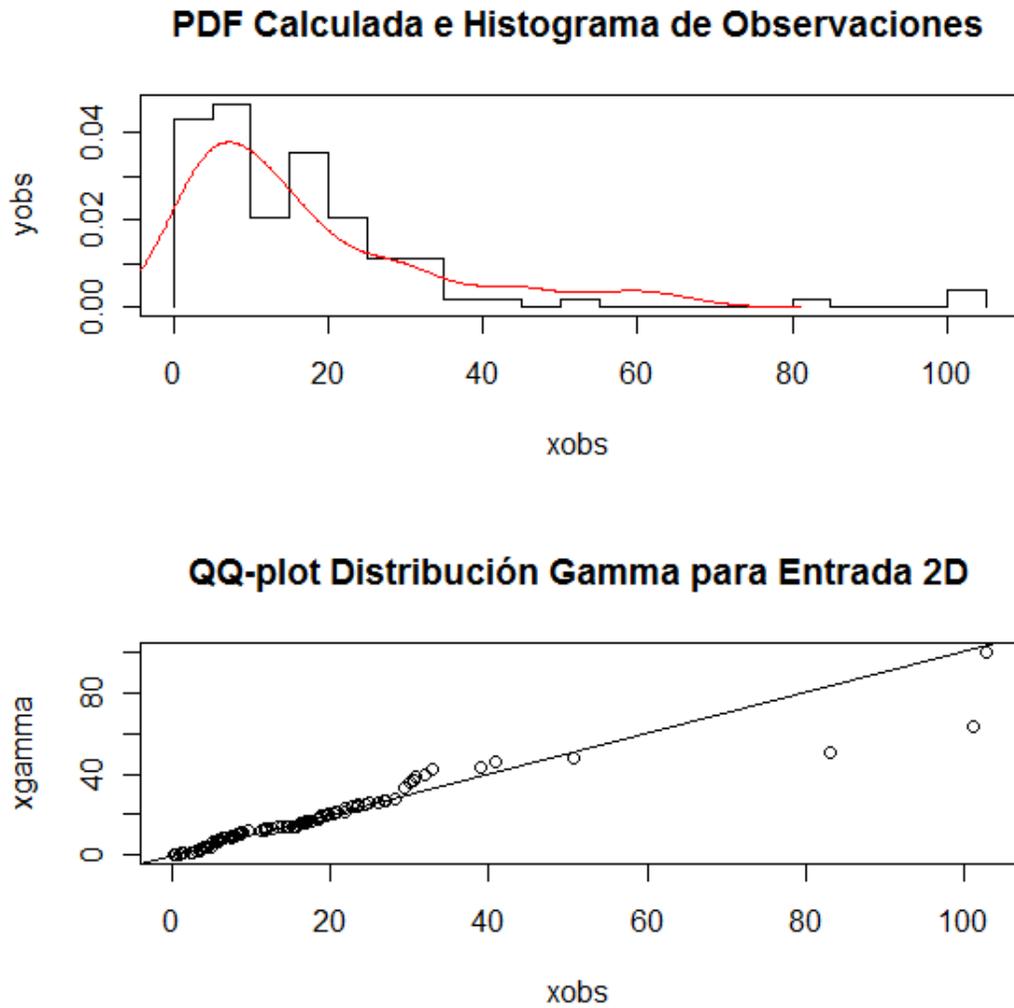


Figura B.8: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.9

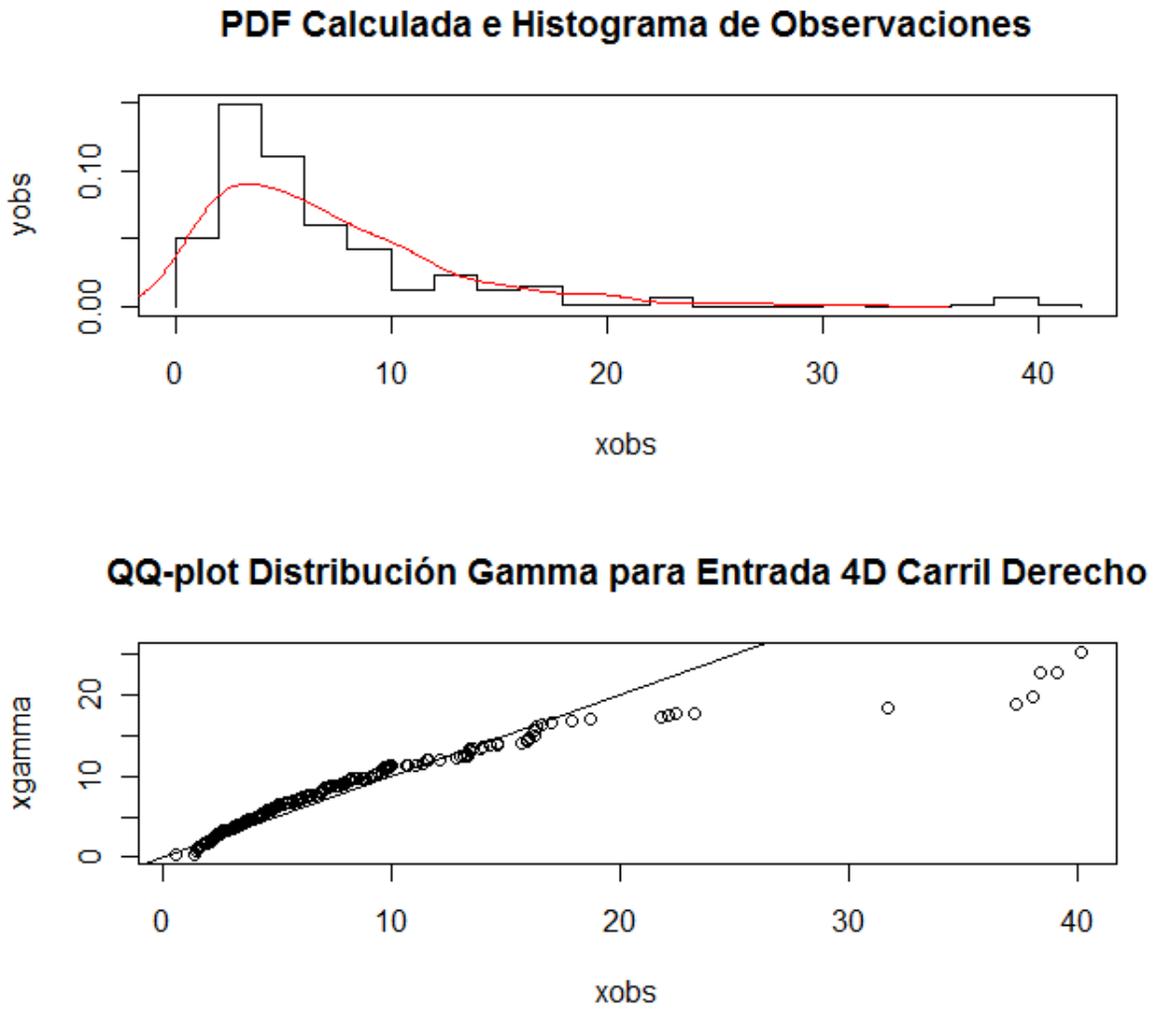


Figura B.9: *QQ-plot Distribución Gamma*

La figura B.10.

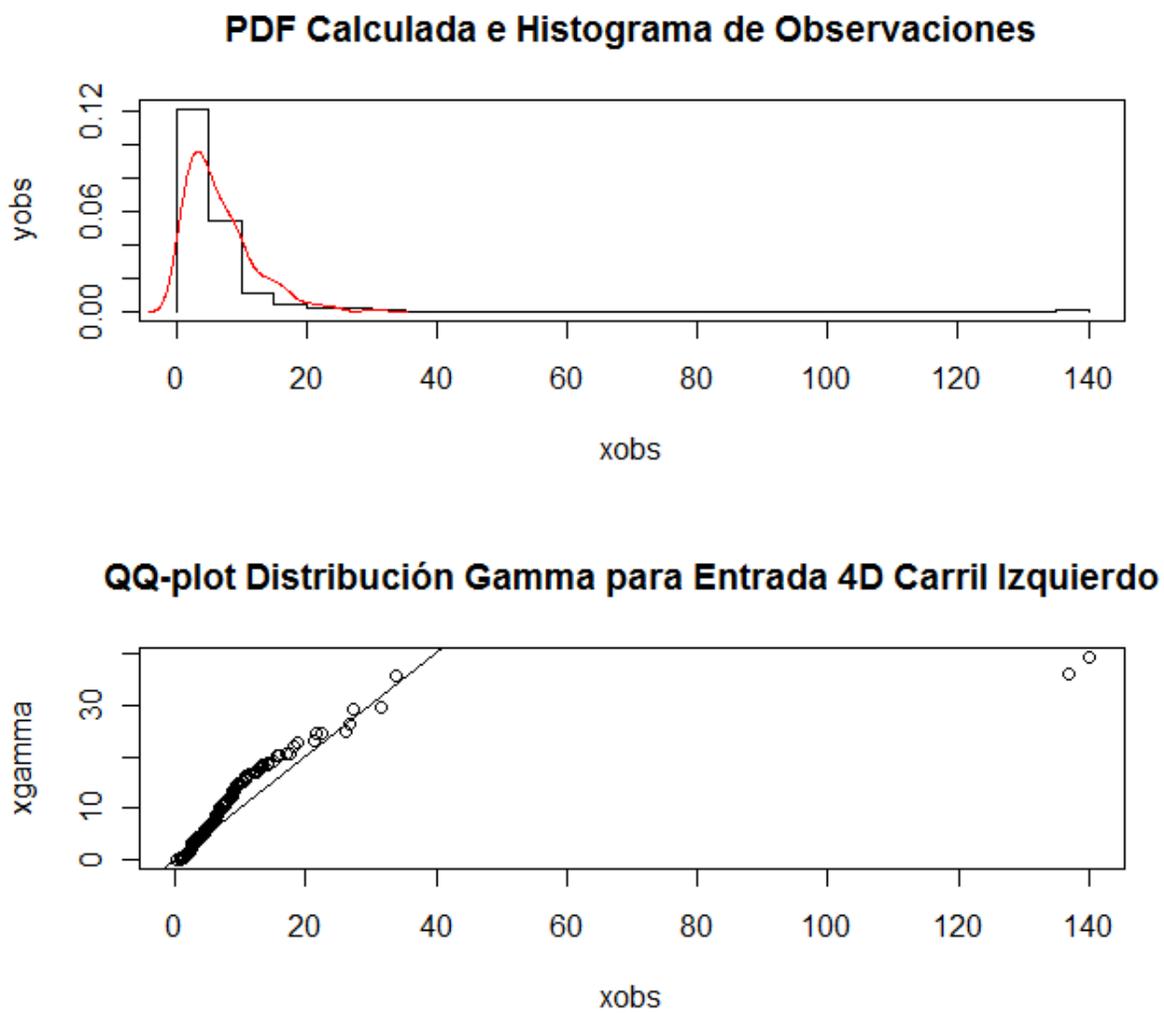


Figura B.10: *QQ-plot Distribución Gamma*

Apéndice C

Gráficas de Pareto para Discriminar Rutas

La figura C.1.

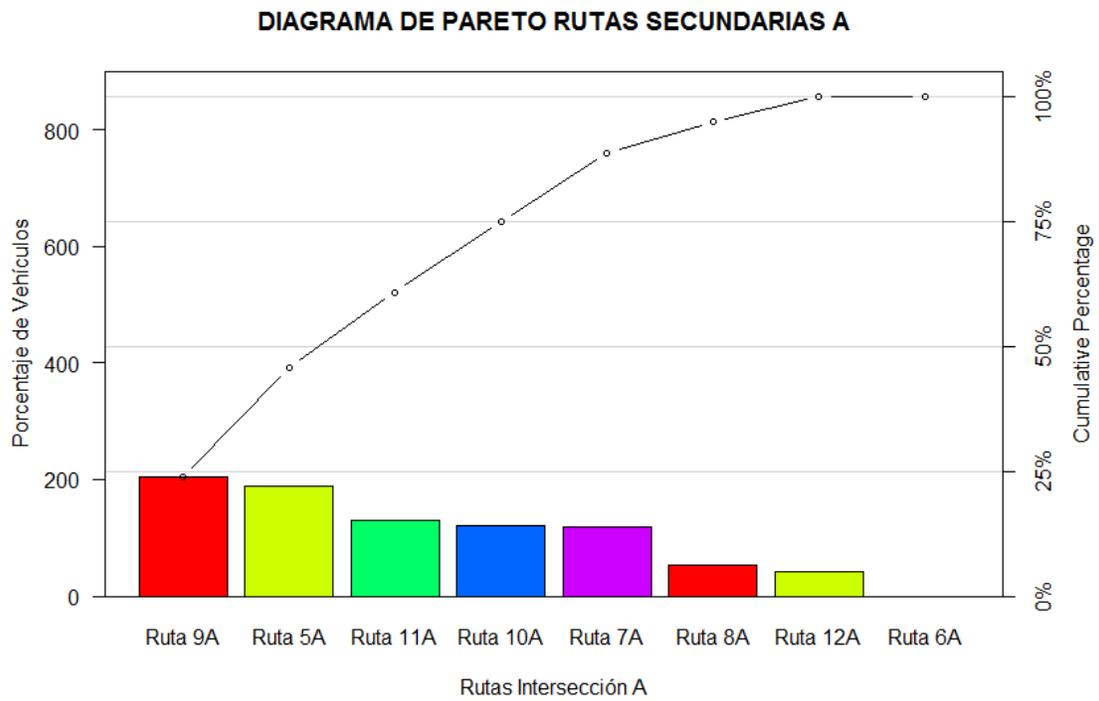


Figura C.1: *Diagrama de Pareto Intersección A*

La figura C.2.

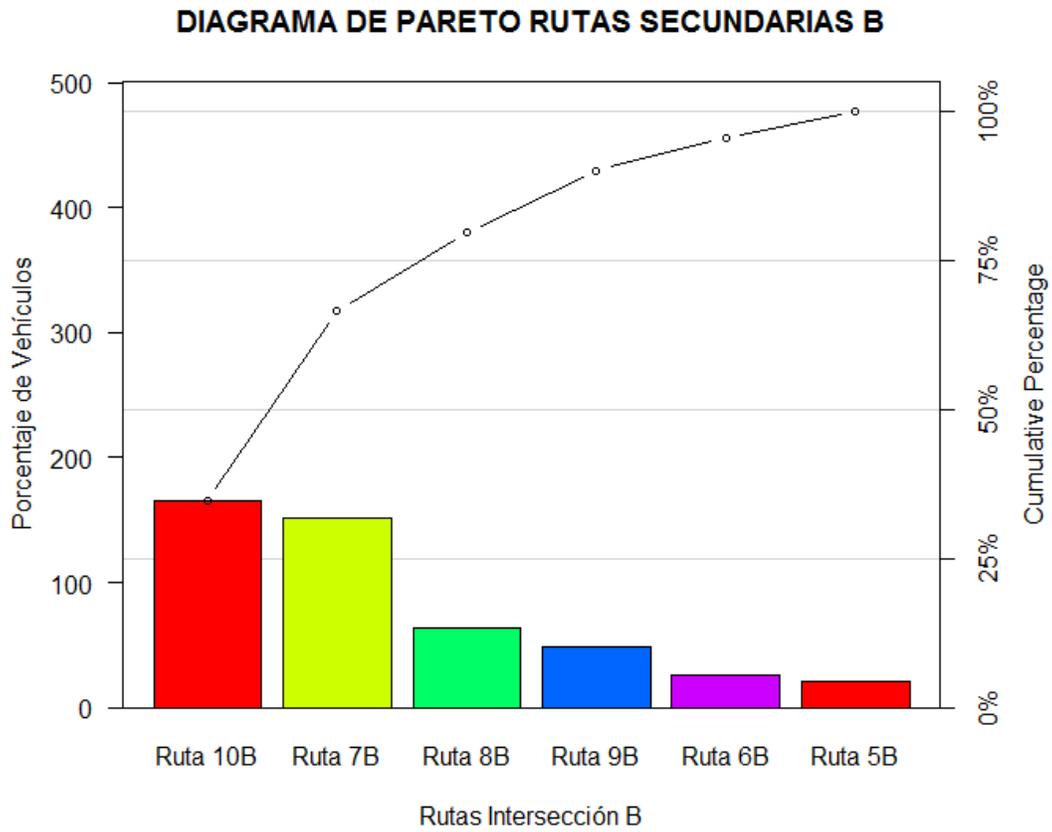


Figura C.2: *Diagrama de Pareto Intersección B*

La figura C.3.

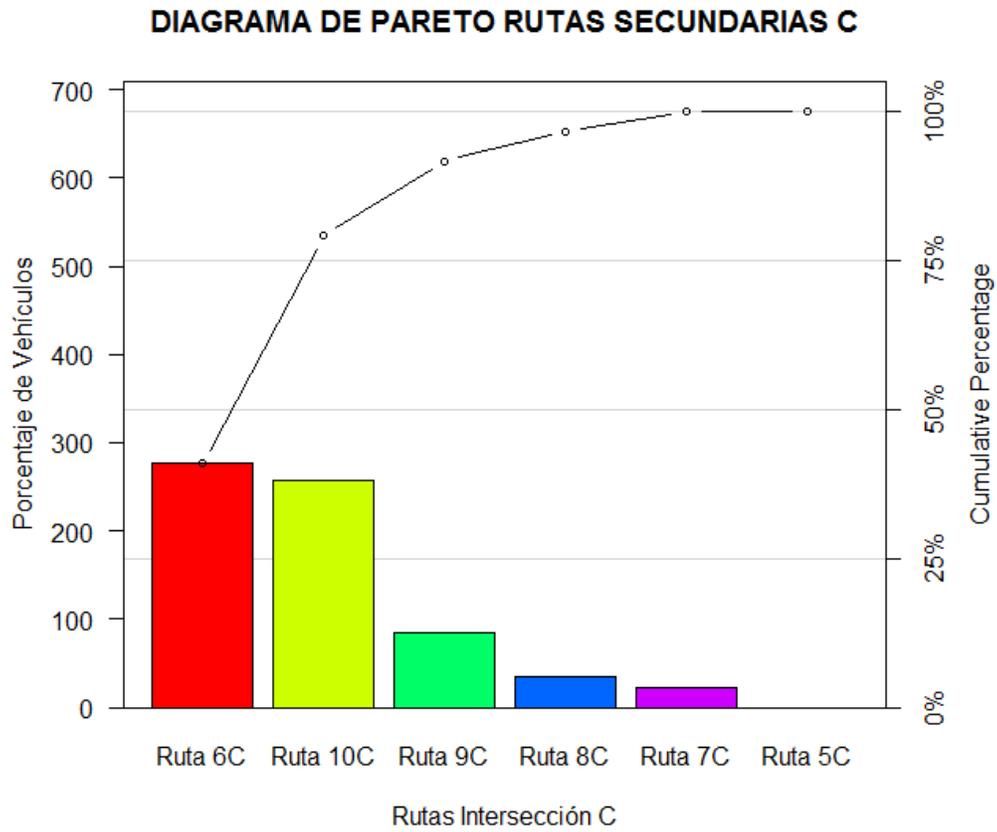


Figura C.3: *Diagrama de Pareto Intersección C*

La figura C.4.

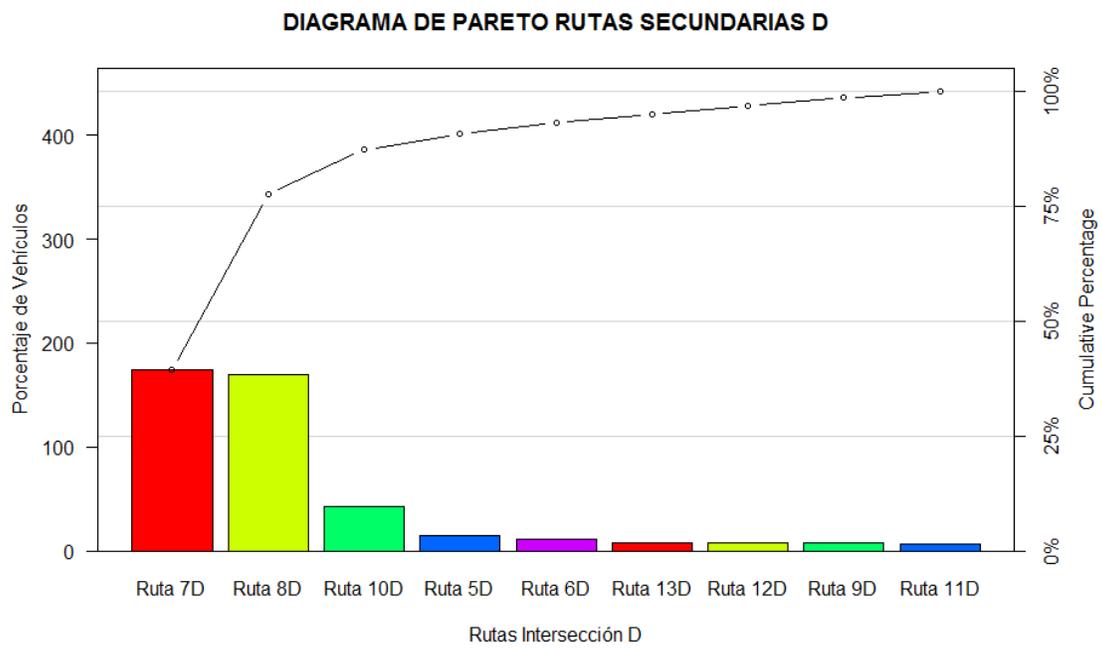


Figura C.4: *Diagrama de Pareto Intersección D*

Apéndice D

Análisis entre Medias Poblacionales de los Parámetros

Apéndice D. Análisis entre Medias Poblacionales de los Parámetros127

Utilizando R, se ha realizado pruebas entre medias poblacionales entre los distintos parámetros de los escenarios

PRUEBA ENTRE MEDIAS POBLACIONALES

ANÁLISIS ENTRE MEDIAS AUTOS DETENIDOS

ADREALVS1 = t.test(ADREAL, AD1, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)

ADREALVS1 Autos detenidos Observados vs. Escenario 1

Welch Two Sample t-test

data: ADREAL and AD1

t = -33.9262, df = 2195.115, p-value <2.2e-16

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

-15.80337 -13.57118

sample estimates:

mean of x mean of y

271.6618 286.3491

> ADREALVS2 = t.test(ADREAL, AD2, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)

> ADREALVS2 Autos detenidos Observados vs. Escenario 2

Welch Two Sample t-test

data: ADREAL and AD2

t = -23.0376, df = 2192.531, p-value <2.2e-16

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

-11.016977 -8.799387

sample estimates:

mean of x mean of y

271.6618 281.5700

> *ADREALVS3* = *t.test(ADREAL, AD3, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)*

> *ADREALVS3* Autos detenidos Observados vs. Escenario 3

Welch Two Sample t-test

data: ADREAL and AD3

t = 24.9596, df = 2127.982, p-value <2.2e-16

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

9.07468 11.16532

sample estimates:

mean of x mean of y

271.6618 261.5418

> *ADREALVS4* = *t.test(ADREAL, AD4, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)*

> *ADREALVS4* Autos detenidos Observados vs. Escenario 4

Welch Two Sample t-test

data: ADREAL and AD4

t = -5.096, df = 2035.091, p-value = 3.791e-07

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

-2.9858690 -0.9795855

sample estimates:

mean of x mean of y

271.6618 273.6445

ANALISIS ENTRE MEDIAS TIEMPO DE VIAJE

> *TVREALVS1 = t.test(TVREAL, TV1, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)*

> *TVREALVS1* Tiempo de Viaje Observado vs. Escenario 1

Welch Two Sample t-test

data: TVREAL and TV1

t = -3.8339, df = 2197.918, p-value = 0.0001297

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

-3.5010720 -0.6856973

sample estimates:

mean of x mean of y

252.2358 254.3292

> *TVREALVS2 = t.test(TVREAL, TV2, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)*

> *TVREALVS2* Tiempo de Viaje Observado vs. Escenario 2

Welch Two Sample t-test

data: TVREAL and TV2

Apéndice D. Análisis entre Medias Poblacionales de los Parámetros130

t = 4.7878, df = 2165.047, p-value = 1.800e-06

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

1.141841 3.806274

sample estimates:

mean of x mean of y

252.2358 249.7618

> *TVREALVS3* = *t.test(TVREAL, TV3, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)*

> *TVREALVS3* Tiempo de Viaje Observado vs. Escenario 3

Welch Two Sample t-test

data: TVREAL and TV3

t = 6.1145, df = 2167.048, p-value = 1.145e-09

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

1.830578 4.499599

sample estimates:

mean of x mean of y

252.2358 249.0708

> *TVREALVS4* = *t.test(TVREAL, TV4, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)*

> *TVREALVS4* Tiempo de Viaje Observado vs. Escenario 4

Welch Two Sample t-test

Apéndice D. Análisis entre Medias Poblacionales de los Parámetros131

data: TVREAL and TV4

t = 2.6902, df = 2197.954, p-value = 0.007195

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

0.06155337 2.89199839

sample estimates:

mean of x mean of y

252.2358 250.7591

ANALISIS ENTRE MEDIAS TIEMPO DE ESPERA

```
> TEREALVS1 = t.test(TEREAL, TV1, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)
```

```
> TEREALVS1 Tiempo de Espera Observado vs. Escenario 1
```

Welch Two Sample t-test

data: TEREAL and TV1

t = -3.8339, df = 2197.918, p-value = 0.0001297

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

-3.5010720 -0.6856973

sample estimates:

mean of x mean of y

252.2358 254.3292

```
> TEREALVS2 = t.test(TEREAL, TV2, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)
```

Apéndice D. Análisis entre Medias Poblacionales de los Parámetros132

> *TEREALVS2* Tiempo de Espera Observado vs. Escenario 2

Welch Two Sample t-test

data: TEREAL and TV2

t = 4.7878, df = 2165.047, p-value = 1.800e-06

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

1.141841 3.806274

sample estimates:

mean of x mean of y

252.2358 249.7618

> *TEREALVS3* = *t.test(TEREAL,TV3,conf.level = 0.99,var.equal = FALSE)*

> *TEREALVS3* Tiempo de Espera Observado vs. Escenario 3

Welch Two Sample t-test

data: TEREAL and TV3

t = 6.1145, df = 2167.048, p-value = 1.145e-09

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

99 percent confidence interval:

1.830578 4.499599

sample estimates:

mean of x mean of y

252.2358 249.0708

Apéndice D. Análisis entre Medias Poblacionales de los Parámetros133

```
> TEREALVS4 = t.test(TEREAL, TV4, conf.level = 0.99, var.equal = FALSE)
```

```
> TEREALVS4 Tiempo de Espera Observado vs. Escenario 4
```

```
Welch Two Sample t-test
```

```
data: TEREAL and TV4
```

```
t = 2.6902, df = 2197.954, p-value = 0.007195
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
```

```
99 percent confidence interval:
```

```
0.06155337 2.89199839
```

```
sample estimates:
```

```
mean of x mean of y
```

```
252.2358 250.7591
```


Bibliografía

Asociación Técnica de Carreteras, Comité Español de la A.I.P.C.R.(1987) *Manual de Capacidad de Carreteras, del original en inglés Highway Capacity Manual, Special Report 209*. España.

Cal, Rafael; Cárdenas, James. (2000). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones*. Editorial Alfaomega. 7ma Edición. Universidad del Valle. Cali. Colombia.

Northwestern University; Wilensky. (1999). *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*. Obtenido en línea en enero 2012.

Disponible en: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

OD Group; Rovira César.(2008) *Herramienta Básica para la Mejora de la Calidad. Diagrama de Pareto*. Argentina. Obtenido en línea en febrero 2012. Disponible en: [//www.op-group.net/](http://www.op-group.net/).

Robert B. Cooper. (1981). *Introduction to Queueing Theory*. Segunda Edición.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1984). *Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico, Carreteras, México*.

Universidad de Chile; Gibson, Jaime. (2011). *Teoría de Flujos Vehiculares. Apuntes de Clase*. División de Ingeniería de Transporte.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Cerquera, Flor. (2007). *Capacidad y niveles de servicio de la infraestructura vial, Transporte y Vías*. Colombia

Webster, F.V.(1958). *Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper No. 39, Her Majesty's Stationery Office*. London.

Índice de tablas

2.1. Vehículos Pesados y Livianos	5
2.2. Ventajas y Desventajas del Uso de Semáforos, Secretaría de Comunicación y Transportes 1984	7
3.1. Propiedades de la Distribución Exponencial	22
3.2. Propiedades de la Distribución de Poisson	24
3.3. Propiedades de la Distribución Erlang	25
3.4. Ventajas y Desventajas de la Simulación	29
4.1. Distancia entre Intersecciones (m)	31
4.2. Geometría de la Vía por Curvatura, <i>Safety at Road Geometry Standards in some European Countries</i>	32
4.3. Geometría de la Vía por Inclinación, <i>Safety at Road Geometry Standards in some European Countries</i>	32
4.4. Tiempos y Fases de la Intersección A	33

4.5. Tiempos y Fases de la Intersección B	34
4.6. Tiempos y Fases de la Intersección C	34
4.7. Tiempos y Fases de la Intersección D	35
4.8. Horarios de Recolección de Datos	37
4.9. Entradas y Llegadas al Sistema	38
4.10. Frecuencias Relativas para las Entradas de Intersección A	39
4.11. Movimientos de Vehículos en cada Entrada	40
4.12. Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 4A	40
4.13. Cuadro de Resumen de Capacidad para Entradas de Intersección A	41
4.14. Factores de Teoría de Colas para Entradas de Intersección A	42
4.15. Medias y Varianzas para Tiempos de Llegada y Salida en Intersección A	42
4.16. Frecuencias Relativas en Entrada 3B	43
4.17. Movimientos de Vehículos en Entrada 3B	44
4.18. Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 1B	44
4.19. Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 4B	45
4.20. Cuadro de Resumen de Capacidad para Entrada 3B	45
4.21. Factores de Teoría de Colas para Entrada 3B	46
4.22. Medias y Varianzas para Tiempos de Llegada y Salida en Intersección B	46

4.23. Frecuencias Relativas para las Entradas de Intersección C	47
4.24. Movimientos de Vehículos en cada Entrada	47
4.25. Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 1C	48
4.26. Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 4C	48
4.27. Cuadro de Resumen de Capacidad para Entradas de Intersección C . .	49
4.28. Factores de Teoría de Colas para Entradas de Intersección C	49
4.29. Medias y Varianzas para Tiempos de Llegada y Salida en Intersección C	50
4.30. Frecuencias Relativas para las Entradas de Intersección D	51
4.31. Movimientos de Vehiculos en cada Entrada	51
4.32. Porcentajes según Tipo de Vehículo en Llegada 1D	52
4.33. Cuadro de Resumen de Capacidad para Entradas de Intersección D . .	52
4.34. Factores de Teoría de Colas para Entradas de Intersección D	53
4.35. Medias y Varianzas para Tiempos de Llegada y Salida en Intersección D	53
4.36. Parámetros de Distribuciones de Llegada Gamma para las Entradas del Sistema	55
5.1. Rutas y VPH en Intersección A	57
5.2. Análisis de Pareto para Intersección A	58
5.3. Rutas y VPH en Intersección B	58

5.4. Análisis de Pareto para Intersección B	59
5.5. Rutas y VPH en Intersección C	59
5.6. Análisis de Pareto para Intersección C	60
5.7. Rutas y VPH en Intersección D	60
5.8. Análisis de Pareto para Intersección D	61
5.9. Entrada, Parámetros Distribucion Gamma y Rutas que Generan	61
5.10. Tiempos de Semáforos a Ingresar en el Modelo	76
5.11. Diferencia de Vehículos Servidos en Ciclo Modelo vs. Ciclo Observado	77
5.12. Tiempos de Semáforos Escenario Propuesto 1	80
5.13. Tiempos de Semáforos Escenario Propuesto 2	83
5.14. Tiempos de Semáforos Escenario Propuesto 3	86
5.15. Tiempos de Semáforos Escenario Propuesto 4	89
5.16. Medias y Varianzas de Escenarios	92
5.17. Porcentajes de Cambio en cada Parámetro para Escenarios	93

Índice de figuras

3.1. Tipos de Colas. Gestión de Sistema de Colas. Ribera, Jaime. 2001. . . .	20
3.2. Distribución Exponencial	23
3.3. Distribución de Poisson	24
3.4. Distribución Earlang	26
5.1. Botones de Inicio y Avanzar	63
5.2. Secuencia y Número de Vehículos	63
5.3. Vehículos de Muestra	64
5.4. Gráficos de Autos Detenidos, Tiempo de Espera, Tiempo de Viaje	65
5.5. Ingreso de Tiempos de Semáforo	66
5.6. Configuración del Entorno	74
5.7. Autos Detenidos Escenario Real	78
5.8. Tiempo de Espera Escenario Real	79

5.9. Tiempo de Viaje Escenario Real	79
5.10. Autos Detenidos Escenario 1	81
5.11. Tiempo de Espera Escenario 1	81
5.12. Tiempo de Viaje Escenario 1	82
5.13. Autos Detenidos Escenario 2	84
5.14. Tiempo de Espera Escenario 2	84
5.15. Tiempo de Viaje Escenario 2	85
5.16. Autos Detenidos Escenario 3	87
5.17. Tiempo de Espera Escenario 3	87
5.18. Tiempo de Viaje Escenario 3	88
5.19. Autos Detenidos Escenario 4	90
5.20. Tiempo de Espera Escenario 4	90
5.21. Tiempo de Viaje Escenario 4	91
A.1. Movimientos Posibles para la Primera Fase en la Intersección A	100
A.2. Movimientos Posibles para la Segunda Fase en la Intersección A	101
A.3. Movimientos Posibles para la Primera Fase en la Intersección B	102
A.4. Movimientos Posibles para la Segunda Fase en la Intersección B	103
A.5. Movimientos Posibles para la Tercera Fase en la Intersección B	104

A.6. Movimientos Posibles para la Primera Fase en la Intersección C	105
A.7. Movimientos Posibles para la Segunda Fase en la Intersección C	106
A.8. Movimientos Posibles para la Primera Fase en la Intersección D	107
A.9. Movimientos Posibles para la Segunda Fase en la Intersección D	108
A.10. Movimientos Posibles para la Tercera Fase en la Intersección D	109
B.1. QQ-plot Distribución Gamma	111
B.2. QQ-plot Distribución Gamma	112
B.3. QQ-plot Distribución Gamma	113
B.4. QQ-plot Distribución Gamma	114
B.5. QQ-plot Distribución Gamma	115
B.6. QQ-plot Distribución Gamma	116
B.7. QQ-plot Distribución Gamma	117
B.8. QQ-plot Distribución Gamma	118
B.9. QQ-plot Distribución Gamma	119
B.10. QQ-plot Distribución Gamma	120
C.1. Diagrama de Pareto Intersección A	122
C.2. Diagrama de Pareto Intersección B	123

C.3. Diagrama de Pareto Intersección C	124
C.4. Diagrama de Pareto Intersección D	125