

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**MICRO-SIMULACIÓN DE CICLISTAS EMPLEANDO VISSIM 8:  
UN CASO APLICADO EN LA CIUDAD DE LIMA**

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

**EDWIN RAFAEL QUISPE CHAYÑA**

**ASESOR: ING. FÉLIX ISRAEL CABRERA VEGA**

Lima, diciembre de 2016



## RESUMEN

Como parte del desarrollo sostenible es inevitable no considerar la influencia de los sistemas de transporte, sobre todo, por las altas emisiones de CO<sub>2</sub> que producen. Ciudades como Copenhague, Estocolmo, Berlín y Bogotá han comprendido ya que una alternativa de solución es la promoción de los sistemas de transporte no motorizado y un claro ejemplo es fomentar la utilización de las bicicletas.

Por otro lado, la microsimulación del tráfico es una alternativa tecnológica que ahora puede darse debido a las computadoras y sus procesadores cada vez más eficientes. Sin embargo, existen pocos estudios que incluyan a los ciclistas como parte importante de un proyecto. En tal sentido, esta investigación pretende servir como una base para el desarrollo de futuros proyectos relacionados a la evaluación microscópica, específicamente, de avenidas para uso exclusivo de ciclistas. La evaluación se realiza durante el ciclo día, en un tramo de la avenida Arequipa, entre las calles Gonzáles Prada y la avenida Angamos.

Para la evaluación se utiliza el software Vissim 8.0, que a pesar de contar solo con el submodelo de seguimiento vehicular de Wiedemann, se pretende adaptarlo para representar a los ciclistas. Del mismo modo, se evalúa las configuraciones internas del software, en especial los efectos que resultan al variar (i) el nivel de detalle (en intervalos) de la curva asignada al *desired speed distribution*, (ii) el efecto del *driving behaviour* asignado, (iii) el número de actualizaciones por segundo y (iv) el número semilla. Y que, a diferencia de lo planteado en la hipótesis, estas evaluaciones muestran resultados significativos en los diferentes casos. Así mismo, se revisan los modelos de seguimiento vehicular de Gipps, Wiedemann y General Motors; así como los expuestos por Twaddle et al. (2014) que incluye los modelos longitudinalmente continuos, modelos autómatas celulares y modelos de fuerza social.

Finalmente, se muestra evidencia que, si bien es posible obtener resultados estadísticamente similares utilizando submodelos vehiculares, es necesario implementar otros modelos de seguimiento que sean específicos para ciclistas, pues como se describe, estos realizan más movimientos individuales y responden ante otro tipo de estímulos y condiciones.



A mi hermano y a mis padres,  
Sebas, Edwin y Virginia,  
por su incondicional apoyo y dedicación.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias a Dios, por darme la familia y los amigos que tengo.

A mis padres, por darme el ejemplo y la fuerza para seguir adelante.

A mi hermano, por comprender mi falta durante estos años.

A mis abuelos, por su cariño y apoyo.

A mis amigos, por compartir conmigo este camino. *WB&T*.

A mi asesor, por su tiempo y dedicación en todos estos meses.

Y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.



## ÍNDICE

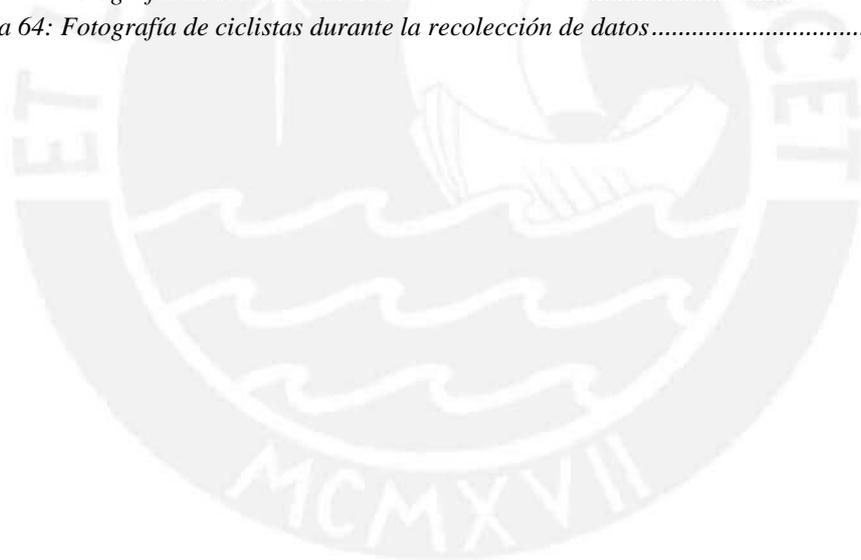
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	2
1.1.1. <i>Objetivo general</i> .....	2
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	2
1.2. HIPÓTESIS DEL PROYECTO .....	3
1.3. ALCANCE Y LIMITACIONES DEL PROYECTO.....	3
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	4
2.1. MICROSIMULACIÓN .....	4
2.1.1. <i>Definición</i> .....	4
2.2. FUNDAMENTOS.....	4
2.2.1. <i>Carácter estocástico</i> .....	4
2.2.2. <i>Warm up</i> .....	5
2.2.3. <i>Número semilla</i> .....	6
2.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN .....	7
2.3.1. <i>Calibración</i> .....	7
2.3.2. <i>Validación</i> .....	8
2.4. MODELOS DE SEGUIMIENTO VEHICULAR .....	8
2.4.1. <i>Modelo de Gipps</i> .....	8
2.4.2. <i>Modelo de Wiedemann</i> .....	12
2.4.3. <i>Modelo de la General Motors</i> .....	17
2.5. MÉTODOS PARA MODELAR EL COMPORTAMIENTO DE CICLISTAS .....	19
2.5.1. <i>Modelos longitudinalmente continuos</i> .....	20
2.5.2. <i>Modelo autómata celular</i> .....	22
2.5.3. <i>Modelo de la fuerza social</i> .....	23
2.6. MICROSIMULACIÓN DE CICLISTAS: ESTUDIOS EMPÍRICOS .....	27
2.6.1. <i>Consideraciones por género y edad en ciclistas</i> .....	27
2.6.2. <i>COWI: Microsimulación de ciclistas en hora pico</i> .....	29
2.7. SOFTWARE VISSIM .....	31
2.7.1. <i>Modelo de seguimiento</i> .....	31

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA .....	34
3.1. RECOLECCIÓN DE DATOS .....	35
3.1.1. Ubicación.....	35
3.1.2. Instrumentos empleados.....	37
3.1.3. Procedimiento .....	37
3.2. VISSIM 8.0.....	40
3.2.1. Parámetros.....	40
3.2.2. Proceso de modelamiento .....	41
3.2.3. Desarrollo del modelo .....	42
3.3. PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LAS CONFIGURACIONES INTERNAS DE VISSIM 8.0.....	45
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE DATOS .....	47
6.1. DATOS RECOLECTADOS .....	47
4.2. ANÁLISIS DE VELOCIDADES .....	50
CAPÍTULO 5: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO EN VISSIM 8.0 .....	57
5.1. RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN ....	57
CAPÍTULO 6: EVALUANDO LAS CONFIGURACIONES INTERNAS DE VISSIM 8.0 .....	66
6.1. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA ACELERACIÓN DESEADA.....	66
6.2. ANÁLISIS DEL EFECTO POR TIPO DE CARRIL .....	68
6.3. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL NÚMERO DE INTERVALOS CONSIDERADOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD DESEADA.....	69
6.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL COMPORTAMIENTO VEHICULAR.....	76
6.5. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL NÚMERO DE ACTUALIZACIONES POR SEGUNDO DE SIMULACIÓN .....	80
6.6. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL NÚMERO SEMILLA .....	82
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
7.1. CONCLUSIONES .....	92
7.2. RECOMENDACIONES .....	95
REFERENCIAS.....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representación gráfica del modelo de Gipps .....	9
Figura 2: Representación gráfica adaptada al modelo de seguimiento vehicular de Wiedemann 74 .	13
Figura 3: Representación gráfica del modelo de seguimiento vehicular de la General Motors.....	17
Figura 4: Modelo gráfico del movimiento lateral.....	20
Figura 5: Comparación de las consideraciones en Vissim y lo real.....	21
Figura 6: Ejemplo de la construcción espacial utilizada en un modelo autómatas celular.....	23
Figura 7: Diagrama de fuerzas que evitan la colisión entre bicicletas .....	25
Figura 8: Descripción de la fuerza física provocada.....	25
Figura 9: Captura del escenario de simulación.....	26
Figura 10: Diagrama fundamental de velocidad por densidad.....	26
Figura 11: Número de ciclistas por rango de velocidad.....	30
Figura 12: Parámetros por defecto del software de comportamiento del conductor .....	31
Figura 13: Parámetros de comportamiento del conductor: Wiedemann 74 y Wiedemann 99.....	32
Figura 14: Representación del efecto de considerar como rombo a los ciclistas en vez de la forma rectangular como se hace con los vehículos .....	33
Figura 15: Ventana de configuración de comportamiento del conductor .....	34
Figura 16: Avenida Arequipa.....	35
Figura 17: Zona de estudio .....	36
Figura 18: Zona de filmación.....	36
Figura 19: Wincha .....	37
Figura 20: Videocámara .....	37
Figura 21: Posición de la videocámara A.....	38
Figura 22: Posición de la videocámara B.....	38
Figura 23: Delimitación de una sección del carril .....	39
Figura 24: Fotografía de muestra de video .....	40
Figura 25: Fotografía de muestra de video: consideraciones de registro .....	40
Figura 26: Procedimiento típico para la modelación de un sistema .....	41
Figura 27: Delimitando link en la construcción del modelo.....	42
Figura 28: Definiendo el modelo de seguimiento vehicular a emplearse.....	43
Figura 29: Ventana de distribución de velocidad deseada.....	43
Figura 30: Ventana de aceleración deseada con los valores obtenidos por COWI, (2012) .....	44
Figura 31: Ventana de desaceleración deseada con los valores obtenidos por COWI, (2012) .....	44
Figura 32: Ventana de tipo de vehículo .....	45
Figura 33: Relación de ciclistas por género.....	48
Figura 34: Relación de ciclistas por edad .....	49
Figura 35: Velocidad promedio de ciclistas por edad.....	49
Figura 36: Frecuencia relativa acumulada de velocidad.....	51
Figura 37: Histograma de velocidades .....	51
Figura 38: Histograma de velocidades con curva de distribución lognormal .....	53
Figura 39: Histograma de velocidades de ciclistas entre Copenhague, Lima y Ontario .....	53
Figura 40: Diagrama de frecuencia acumulada de velocidad bajo condiciones normales en Copenhague, Ontario y Lima .....	54
Figura 41: Histograma de velocidades entre cargobike en Copenhague y ciclistas normales en Lima .....	55
Figura 42: Diagrama de frecuencia acumulada de velocidad entre cargobike en Copenhague y ciclistas normales en Lima .....	55
Figura 43: Histograma de velocidad de ciclistas con cargobike en Copenhague y ciclistas normales en Lima y Beijing.....	56
Figura 44: Valores por defecto del software Vissim 8.....	57
Figura 45: Valores por defecto del software Vissim 8.....	58

<i>Figura 46: Valores obtenidos por la empresa COWI .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 47: Ventana de configuración del movimiento lateral .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 48: Fotografía del efecto distancia lateral mínima.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 49: Randomization Dotplot del proceso de calibración .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 50: Randomization Dotplot del proceso de validación.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 51: Gráfica del efecto de la aceleración de COWI (2012) versus la establecida por defecto en "Bike".....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 52: Gráfica de tiempo de viaje al considerar 1 o 2 carriles .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 53: Curva de frecuencia acumulada de diferentes número de intervalos.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 54: Curva de frecuencia acumulada que incluye la curva de 14 intervalos .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 55: Superficie de resultados de tiempo de viaje en función del número de intervalos respecto a un determinado volumen de ciclistas.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 56: Comparación de medias de tiempo de viaje a través del gráfico de cajas .....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 57: Diferencia gráfica de las medias de tiempo de viaje entre grupos de diferente números de intervalo.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 58: Superficie de resultados de tiempo de viaje por comportamiento vehicular para diferente volumen de ciclistas.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 59: Colpaso del sistema para volúmenes mayores de 5000 ciclistas.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 60: Gráfica de intervalos de tiempo de viaje por número de actualizaciones.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 61: Tiempo de viaje normalizado respecto a cada número semilla y diferente volumen. Semillas: 1-50.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 62: Tiempo de viaje normalizado respecto a cada número semilla y diferente volumen. Semillas: 51 - 100.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 63: Fotografía de ciclistas durante la simulación .....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 64: Fotografía de ciclistas durante la recolección de datos.....</i>	<i>92</i>



## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Velocidad promedio por género .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2: Velocidad promedio por edad.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3: Parámetros de vehículos identificados .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4: Velocidad promedio en campo.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5: Tabla de frecuencia de velocidades.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 6: Prueba de bondad de ajuste.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 7: Resultado de asumir los valores por defecto del software Vissim.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 8: Resultado de asumir los valores por defecto del software .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 9: Resultado de asumir los valores de COWI sin considerar keep lateral distance.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 10: Resultado de asumir los valores presentados por COWI.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 11: Comparación de resultados durante la validación.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 12: Tiempo de viaje al variar la aceleración deseada.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 13: Tiempo de viaje respecto al número de carriles.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 14: Tabla de frecuencia acumulada de 6 intervalos.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 15: Tabla de frecuencia acumulada de 7 intervalos.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 16: Tabla de frecuencia acumulada de 8 intervalos.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 17: Tabla de frecuencia acumulada de 10 intervalos.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 18: Tabla de frecuencia acumulada de 14 intervalos.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 19: Tiempo de viaje por número de intervalos utilizados y distinto volumen de ciclistas.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 20: Evaluación ANOVA por número de intervalos para un volumen de 500 c/hr.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 21: Valores asumidos para cada comportamiento vehicular .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 22: Resultados de tiempo de viaje por tipo de comportamiento vehicular para diferentes volúmenes .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 23: Tiempo de viaje para diferente número de actualizaciones respecto a un determinado volumen.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 24: Evaluación ANOVA por número de actualizaciones para un volumen de 5000 c/hr.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 25: Tiempo de viaje para las 100 primeras semillas para un volumen de 500 ciclistas .....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 26: Tiempo de viaje para diferentes agrupaciones de números semilla.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 27: Tiempo de viaje para diferentes agrupaciones de número semilla y volumen de ciclistas ..</i>	<i>86</i>

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Todas las actividades diarias como asistir al colegio, ir al trabajo, hacer las compras e incluso, disfrutar de un tiempo de recreación, requieren de desplazamientos y diariamente se producen millones en todas las ciudades. Y si bien antes las ciudades se diseñaban, erráticamente, para adaptarse al medio de transporte, ahora existen nuevos enfoques de diseño, como es el de buscar la compacidad de las ciudades, generar mayores espacios accesibles a todos los usuarios y promover el transporte no motorizado, todo como parte de un sistema de transporte integral.

Así mismo, en las últimas décadas, diferentes organismos, tanto privados como gubernamentales, se han constituido con el fin de promover el desarrollo sostenible y la conservación del medio ambiente, y que, como parte de este objetivo, es inevitable no considerar la influencia de los sistemas de transporte, sobre todo, haciendo hincapié en la gran cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que producen. Y aunque llegue un punto en donde los vehículos puedan ser de baja emisión o de carbono neutro, es evidente que, en cualquier caso, las ciudades no cuentan con la capacidad necesaria para afrontar toda la demanda vehicular.

En tal sentido, un claro ejemplo en el uso de sistemas de transporte no motorizado son las bicicletas, debido a que, como medio de transporte, no solo genera beneficios para el medio ambiente, sino también para quienes hacen uso de estos. De esta forma, ciudades como Copenhague, Estocolmo, Berlín y Bogotá, entre otras, han comprendido ya que una alternativa de solución es promover el uso de las bicicletas como medio transporte. Sin embargo, para que esto suceda, primero es necesario brindar las condiciones necesarias para que luego pueda establecerse como un medio de transporte factible y seguro. Estas condiciones hacen referencia a ofrecer estacionamientos, carriles para bicicletas y que, en futuro, pueda integrarse también con otros sistemas de transporte.

Finalmente, desde los años 90, el estudio del comportamiento de los vehículos y sus interacciones han sido temas de estudio en diferentes instituciones, la prueba de ello es que, a través de los años y en distintos países, se han presentado una gran variedad

de software que permiten simular intersecciones y avenidas en computadora. Como señala Archer y Kosonen (2000), estos modelos proveen una herramienta muy útil para el estudio de los sistemas de tráfico, especialmente donde se desea estudiar el comportamiento y las interacciones a un nivel microscópico. Sin embargo, es usual que al hacer referencia al uso de estos software la mayoría de veces sea en relación al estudio de avenidas e intersecciones para automóviles y no para ciclistas.

El siguiente trabajo de investigación se analiza en un tramo de la avenida Arequipa, entre la avenida Angamos y la calle Gonzáles Prada. Esta vía tiene un ancho de seis metros y treinta centímetros, y es cerrada parcialmente los días domingos. La investigación busca promover y establecer las bases para el desarrollo y la implementación de futuros proyectos relacionados a la simulación del comportamiento de los ciclistas en el Perú.

## **1.1. Objetivos del proyecto**

### **1.1.1. Objetivo general**

Explorar los métodos para simular el comportamiento de los ciclistas y generar conocimiento, que pueda servir como una base, para el desarrollo de futuros proyectos relacionados a la microsimulación del comportamiento de los ciclistas en Lima, específicamente de avenidas para el uso exclusivo de los ciclistas.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

En primer lugar, conocer las características del desplazamiento de los ciclistas en una vía exclusiva, en este caso un carril de seis metros y treinta centímetros de ancho en la Av. Arequipa. En segundo lugar, verificar que los parámetros por defecto del software Vissim no representan los desplazamientos reales de los ciclistas, debido a que, a diferencia de los vehículos motorizados, estos pueden desarrollar una mayor cantidad de movimientos individuales. También, describir las diferencias en los resultados al considerar el sub modelo de comportamiento lateral de Vissim. Del mismo modo, comparar y determinar el efecto del comportamiento vehicular de los submodelos: Wiedemann 74 y Wiedemann 99, el efecto producido por el nivel de detalle en la

construcción de la curva de distribución deseada de velocidad, el efecto del número de actualizaciones por segundo y finalmente, el efecto del número semilla en los resultados del modelo.

## **1.2. Hipótesis del proyecto**

El software de microsimulación Vissim 8.0 y en consecuencia el modelo de seguimiento vehicular tanto de Wiedemann 74 y Wiedemann 99 permiten replicar el comportamiento de los ciclistas en un carril exclusivo en la ciudad de Lima. Así mismo, el nivel de detalle en la construcción de la curva de distribución de velocidad deseada, no representa diferencias significativas en el modelo. Por otro lado, se espera que a mayor número de actualizaciones por segundo de simulación, los resultados sean más precisos. Y finalmente, se espera que la desviación estándar entre determinados grupos de semillas, no difiera significativamente.

## **1.3. Alcance y limitaciones del proyecto**

El estudio se realiza en la avenida Arequipa. Los días domingos la municipalidad impide el tránsito de vehículos motorizados y entrega la avenida a los ciclistas. El estudio considera un solo modelo de ciclistas, no se consideran en el proyecto modos motorizados o bicicletas de carga. Así mismo, si bien se recolecta los datos por tipo de usuario, es decir, entre mujeres, varones, adultos y niños; para la simulación no se hace distinción por diferente edad o diferente género. De la misma manera, el proyecto analiza los comportamientos en condiciones estándar, sin estrechamiento de carril, sin interacción con otro tipo de modos y con la superficie sin pendiente. Finalmente, se destaca que el estudio se realiza en un carril dedicado de seis metros y treinta centímetros de ancho.

## **CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA**

### **2.1. Microsimulación**

#### **2.1.1. Definición**

La microsimulación es una herramienta que permite analizar comportamientos entre individuos con un alto nivel de detalle. Es posible analizar desde crecimientos poblacionales hasta sistemas financieros, pasando por políticas económicas y sanitarias, hasta sistemas de transporte. Y como señala Pursula (1999), la simulación es actualmente una herramienta cotidiana para los profesionales e investigadores en todas las áreas.

“La microsimulación es útil debido a los crecientes niveles de complejidad del sistema y la incertidumbre envuelta en la operación de las redes de tráfico urbano.” (Akçelik y Besley, 2001). En ingeniería del tráfico y transporte, la microsimulación permite analizar el comportamiento de los vehículos en cada segundo o sub segundo, considerando sus interacciones con el resto de vehículos y otros elementos (FHWA, 2004). No obstante, esta herramienta debe ser empleada adecuadamente, completando los diferentes pasos y, sobre todo, cumpliendo con la validación del sistema. Más adelante se explica con mayor detalle este proceso; sin embargo, es necesario mencionar que si se realiza correctamente, la microsimulación ofrece resultados muy realistas, de otro modo, el resultado carece de sustento.

### **2.2. Fundamentos**

Los siguientes fundamentos de microsimulación son válidos para los modelos vehiculares y en este caso, adaptados también para representar a los ciclistas.

#### **2.2.1. Carácter estocástico**

Un sistema determinístico es aquel que no considera variables aleatorias en su proceso. Si se considera un solo conjunto de datos de entrada, sin importar las veces que se realice el proceso, en un sistema determinístico el resultado será el mismo.

Por otro lado, un sistema estocástico si contiene variables aleatorias, debido a esto los resultados varían en cada proceso, por lo que es necesario realizar evaluaciones estadísticas a fin de obtener un resultado confiable. “*Random inputs lead to random outputs*” (Gibb et al., 2002).

En este proyecto se utiliza Vissim 8.0, un software estocástico que emplea diferentes semillas (variables) que agrega la aleatoriedad al análisis, más adelante se explica a mayor detalle la influencia de éstas.

### **2.2.2. Warm up**

Al iniciar un proceso de simulación, el modelo de microsimulación empieza con cero vehículos en el sistema, de forma que, si se empieza a recolectar los resultados desde el primer instante, se estaría cometiendo un error al considerar el rendimiento del sistema con cero o pocos vehículos, por tal razón, es necesario esperar un periodo de tiempo hasta que el sistema se estabilice.

De esta forma, se puede considerar como *warm up* al periodo en que los datos obtenidos o los datos recolectados no deben ser considerados como parte del resultado. A este periodo de tiempo también se le conoce como periodo de estabilización, y los datos luego de este periodo recién forman parte del resultado. Dowling et al. (2002) lo define como la longitud de tiempo entre el inicio de la simulación hasta un nivel de estabilidad alcanzado, es decir, se considera como *warm up* al periodo de tiempo desde el inicio de la simulación hasta que el número de vehículos en el sistema se mantenga constante, sugiere que este valor de tiempo sea igual a dos veces el tiempo de viaje estimado en recorrer la longitud de la red en flujo libre.

Por otro lado, la FHWA (2002) señala también que si bien hay algunos software que no consideran el periodo de warm up al momento de calcular el rendimiento del sistema, algunos sí lo hacen, de forma que es el analista quien, por criterio, debe retirar las estadísticas de ese periodo. No obstante, señala que si el proceso de estabilización no ha ocurrido en los primeros 15 minutos, entonces es muy probable que la demanda sea mayor que la capacidad.

### 2.2.3. Número semilla

Si se trabajase con el mismo comportamiento para todos los vehículos, el resultado no sería nada representativo, puesto que, en la realidad, cada vehículo tiene un comportamiento individual al resto. Los modelos de microsimulación utilizan diferente número semilla para agregar la aleatoriedad al proceso y producir resultados que se asemejen a la realidad.

En microsimulación, las semillas se encargan de la variabilidad durante las corridas del software, asignando características aleatorias a cada elemento. En el informe por parte del NSW Government (2013), la institución señala que las semillas utilizan secuencias aleatorias que producen una leve variabilidad, dicho de otra manera, que cada semilla intenta reflejar un rango de comportamientos que se observa en la realidad. Cada semilla representa una forma diferente de generar la distribución de los vehículos, seleccionar su destino, su ruta y un determinado comportamiento durante el movimiento a través de la red (FHWA, 2002). De forma que, si se corre el software con la misma semilla, el resultado sería idéntico; sin embargo, para tener una idea de la variabilidad en los resultados, es necesario realizar varias pruebas con diferentes números de semilla y hacer uso de estadística para validar estos resultados.

Castiglione et al. (2003), emplearon el modelo de microsimulación de viajes de San Francisco más de 100 veces con diferentes números de semilla; después de todo el proceso concluyeron que la variabilidad de los resultados varía de acuerdo al tipo de modelo. Por otro lado, la FHWA (2002), señala un proceso para calcular el número de simulaciones necesarias para un determinado nivel de confianza. Para evaluar este modelo se trabaja con un nivel de confianza de 95%, los cálculos y la demostración se encuentran en el capítulo de análisis de datos.

## 2.3. Calibración y validación

### 2.3.1. Calibración

La calibración es el proceso que permite modificar los parámetros del modelo, de forma que este pueda representar los datos recogidos en campo. Los métodos más utilizados para la calibración son la regresión, optimización, determinación de errores, análisis de trayectoria, etc. (Matthew, 2014)

Durante la calibración se tomarán medidas de capacidad, conteo de tráfico y medidas de rendimiento del sistema como tiempos de viaje, velocidades, demoras y colas (FHWA, 2004). Es importante destacar que todos estos datos deben ser recogidos en un mismo periodo de tiempo.

**Inspección en campo:** Si bien actualmente es posible tener un registro en video de lo que sucede en campo, es muy importante realizar una visita al lugar, sobre todo, durante la hora pico. “Las imágenes en video pueden ser útiles; sin embargo, estas no pueden centrarse en las condiciones aguas arriba que provocan los comportamientos observados” (FHWA, 2004).

**Tiempo de viaje:** La fuente más confiable para recolectar datos de tiempos de viaje punto a punto es a través del método: *floating car runs*. Este método consiste en que uno o más vehículos sean conducidos por el espacio a estudiarse durante el periodo de análisis. Durante el recorrido, estos irán recogiendo datos de tiempo promedio, velocidad, aceleración, etc. A mayores viajes habrá un mayor porcentaje de confiabilidad, por ejemplo, en condiciones de flujo libre se pueden requerir tan solo 3 recorridos, mientras que en estados de congestión pueden necesitarse 10 o más recorridos. (FHWA, 2004).

De acuerdo a Ge y Menendez (2012) el resultado de una encuesta que se hizo a las personas que trabajan con microsimulación, identificó que el método de calibración más utilizado es en un 85% un método manual, es decir, ensayo y error, un 10% empleaba un método más automatizado y un 5% utilizaba otros métodos.

### **2.3.2. Validación**

El último paso, para culminar el proceso de simulación, es realizar la validación del sistema. Este proceso consiste en verificar que los aspectos de rendimiento de la calibración coinciden con los datos observados (Sykes, 2010). La validación es el proceso que permite confirmar la capacidad del modelo ya calibrado y se realiza mediante validación estadística (Hollander y Liu, 2008). Además, si no se presentan nuevas condiciones externas que puedan afectar al modelo, se espera que los datos de salida de la simulación correspondan con la medida de rendimiento obtenido en campo con un nivel de confianza del 95%.

## **2.4. Modelos de seguimiento vehicular**

Se describen los modelos de seguimiento vehicular más utilizados para mostrar que consideraciones se utilizan para representarlos, debido a que, como muestra la literatura, son empleados para modelar el desplazamiento de ciclistas. Luego se presentan los modelos de seguimiento desarrollados especialmente para ciclistas. El proyecto no pretende hacer una comparación entre un modelo adaptado y uno dedicado a los ciclistas, pero si busca mostrar que existen diferencias importantes entre ambos modelos.

### **2.4.1. Modelo de Gipps**

Peter G. Gipps (1981), desarrolló un modelo de seguimiento vehicular con la ayuda de la University of Newcastle-Upon-Tyne y el Grupo de Estudios de Transporte de la University College London.

Este modelo clasifica a los vehículos de dos formas: (i) como libre y (ii) como limitado o contenido. La primera hace referencia a que los vehículos se comportan independientemente, es decir, su velocidad está controlada por su propio deseo y su máxima aceleración. Mientras que la segunda, responde al comportamiento del vehículo que esté delante; su velocidad varía de forma que se mantenga un espacio seguro respecto al vehículo líder. Este espacio seguro representa al espacio en que el vehículo puede responder a tiempo ante cualquier acción del vehículo líder, sin que colisionen (Janson and Tapani, 2004).

Así mismo, el conductor puede escoger la velocidad mínima entre dos alternativas. La primera hace referencia a que el conductor puede alcanzar su velocidad deseada y la segunda, a que debe preservar una distancia segura. Este modelo es utilizado en diferentes software de microsimulación, por ejemplo, AIMSUN, DRACULA, SISTM, SIGSIM y SITRAS (Ciuffo et al., 2012).

Así también, Gipps (1981) señala que el comportamiento general del tráfico viene dado por 3 factores: (i) la distribución de velocidad deseada es  $V_n$ ; (ii) el tiempo de reacción de los conductores es  $\tau$ ; y (iii) el coeficiente medio de frenado es  $\bar{b}/\hat{b}$ . Mientras que la distribución de la aceleración, el frenado y la longitud efectiva, gobiernan el comportamiento individual de los vehículos. Wilson (2001) presenta de manera gráfica, en la figura 1, la base del modelo de Gipps. Donde el desplazamiento es “x”, la velocidad es “v”, el progreso es “h” y la longitud del vehículo es “S”. Por su parte, los vehículos se desplazan hacia la derecha incrementando el valor de “x”.

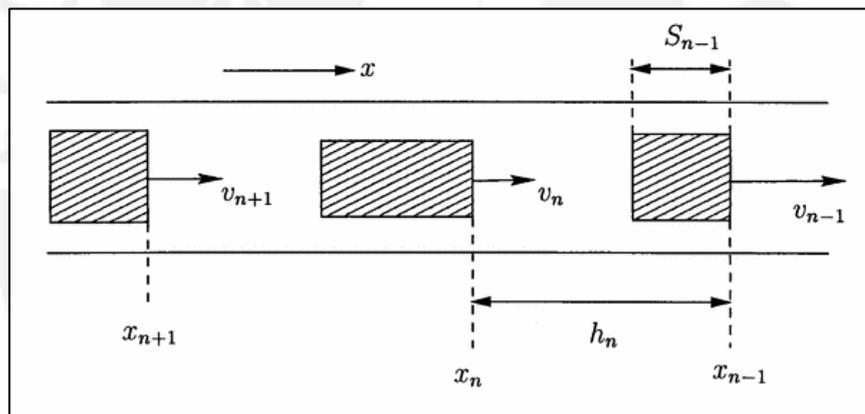


Figura 1: Representación gráfica del modelo de Gipps  
Fuente: Wilson, (2001)

En el desarrollo del modelo de Gipps se emplea la siguiente notación:

$a_n$ : Máxima aceleración que el conductor del vehículo “n” desea alcanzar

$b_n$ : Frenado más severo que el conductor del vehículo “n” desea alcanzar

$$b_n < 0$$

$S_n$ : Tamaño efectivo del vehículo “n”, que es, la longitud física más un margen en el cual el vehículo de seguimiento no está dispuesto a invadir, incluso en reposo

$V_n$ : Velocidad que el conductor del vehículo “n” desea viajar

$x_n(t)$ : Posición de la parte delantera del vehículo n en el tiempo “t”

$v_n(t)$ : Velocidad del vehículo n en el tiempo “t”

$\tau$ : Tiempo de reacción aparente, que es una constante para todos los vehículos

De la misma forma, Gipps (1981) define el modelo como una serie de limitaciones en el desempeño del conductor y del vehículo, y emplea ciertos límites para estimar una velocidad segura respecto al vehículo precedente. En otras palabras, el vehículo que está en seguimiento mantiene una determinada velocidad que le permite frenar de manera segura en caso el vehículo líder frene repentinamente.

La primera restricción sobre el vehículo “n” es que no excederá la velocidad deseada del conductor. La segunda es que su aceleración libre deberá primero aumentar con la velocidad, así como el torque del motor aumente, luego disminuye a cero cuando la velocidad del vehículo se aproxima a su velocidad deseada. Estas dos restricciones se muestran en la siguiente ecuación.

$$v_n(t + \tau) \leq v_n(t) + 2.5a_n\tau(1 - \frac{v_n(t)}{V_n})(0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Sin embargo, menciona una tercera variable, el frenado. Si el vehículo “n-1” comienza a frenar tan fuerte como puede en el tiempo “t”, estará en reposo en el punto “ $x_{n-1}^*$ ” esta restricción es definida por la siguiente ecuación.

$$x_{n-1}^* = x_{n-1}(t) - v_{n-1}(t)^2/2b_{n-1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Donde “ $b_{n-1}$ ” tiene valor negativo (desaceleración).

Además, el vehículo “n”, viajando inmediatamente detrás, no reaccionará hasta el tiempo “t +  $\tau$ ” y en consecuencia, no estará en reposo hasta alcanzar “ $x_n^*$ ” dado por la ecuación 3.

$$x_n^* = x_n(t) + \frac{[v_n(t) + v_n(t + \tau)]\tau}{2} - v_n(t + \tau)^2/2b_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

Por seguridad, el conductor “n” del vehículo de seguimiento debe asegurarse que la diferencia entre los puntos donde el vehículo “n-1” se detiene en “ $x_{n-1}^*$ ” y el tamaño efectivo del vehículo “n-1” que es ( $s_{n-1}$ ) sea mayor que el punto donde el vehículo “n” se detiene ( $x_n^*$ ).

No obstante, Gipps (1981) encuentra que el conductor del vehículo “n” permite una amortiguación adicional e introduce un margen de seguridad, con un retraso “ $\theta$ ” cuando el conductor “n” está viajando a la velocidad “ $v_n(t + \tau)$ ”. Así, la limitación de frenado está dado por la ecuación 4.

$$x_{n-1}(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} - s_{n-1} \geq x_n(t) + \frac{[v_n(t) - v_n(t + \tau)]\tau}{2} - v_n(t + \tau)\theta - v_n(t + \tau)^2/2b_n \dots (4)$$

La razón de este valor “ $\theta$ ” es para provocar que el vehículo frene más tempranamente y, gradualmente, reduzca el frenado hasta la línea de parada. Debido a que los conductores no puede estimar el valor de “ $b_{n-1}$ ” mediante observación directa, este se debe remplazarse por valores estimados de “ $\hat{b}$ ” para cumplir lo siguiente.

$$-\frac{v_n(t + \tau)^2}{2b_n} + v_n(t + \tau) \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right) - [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] + \frac{v_n(t)\tau}{2} + v_{n-1}(t)^2/2b \leq 0 \dots (5)$$

Tanto los valores de “ $\theta$ ” como de “ $\tau$ ” son importantes para determinar los comportamiento de los conductores. Si se considera que el retraso “ $\theta$ ” es igual a la mitad del tiempo de reacción “ $\tau/2$ ” y que la intención del conductor anterior para frenar fuertemente no debe ser desestimada. Un vehículo que está viajando a una velocidad y distancia segura estará permitido de mantener un estado de seguridad indefinido. De forma que se puede reescribir la anterior ecuación de la siguiente manera.

$$v_n(t + \tau) \leq b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n [2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}]} \dots\dots\dots (6)$$

Además, se asume que el conductor viaja tan rápido y seguro como se lo permiten las limitaciones del vehículo. La nueva velocidad está definida por la siguiente ecuación.

$$v_n(t + \tau) = \min\left\{v_n(t) + 2.5a_n\tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \left(0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n}\right)^{1/2}, b_n\tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n [2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{b}]} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

Finalmente, el modelo presentado por Gipps, es el modelo más comúnmente utilizado para trabajar con distancias seguras o a la prevención de una colisión. El objetivo de este modelo es especificar una distancia de seguimiento seguro y, a partir de esto, adaptar el comportamiento del conductor de forma que siempre mantenga una distancia segura. La idea principal es que cada conductor planee su velocidad de forma que pueda detenerse de manera segura incluso si el conductor líder frena repentinamente (Ciuffo et al., 2012).

#### 2.4.2. Modelo de Wiedemann

El modelo de seguimiento vehicular de Rainer Wiedemann fue presentado en 1974. Este define los límites de percepción de los conductores y las consecuencias de esos límites. Después de este modelo, se presentó también el modelo conocido como Wiedemann 99. Esta última versión contiene más parámetros y límites que los usuarios pueden calibrar. Gao (2008), señala que muchos consideran que es más sencillo que la primera versión y que permite obtener un mejor modelo de tráfico.

El software Vissim en su versión 8.0 permite utilizar cualquiera de estos dos modelos, sin embargo, utiliza una versión modificada cuya base teórica es evidentemente de propiedad privada y no está al alcance del público. Por ejemplo en la ecuación 8 se

muestra el parámetro  $Ax$  que se obtenía, originalmente, mediante diversos parámetros, pero en la actualidad el modelador ingresa su valor directamente.

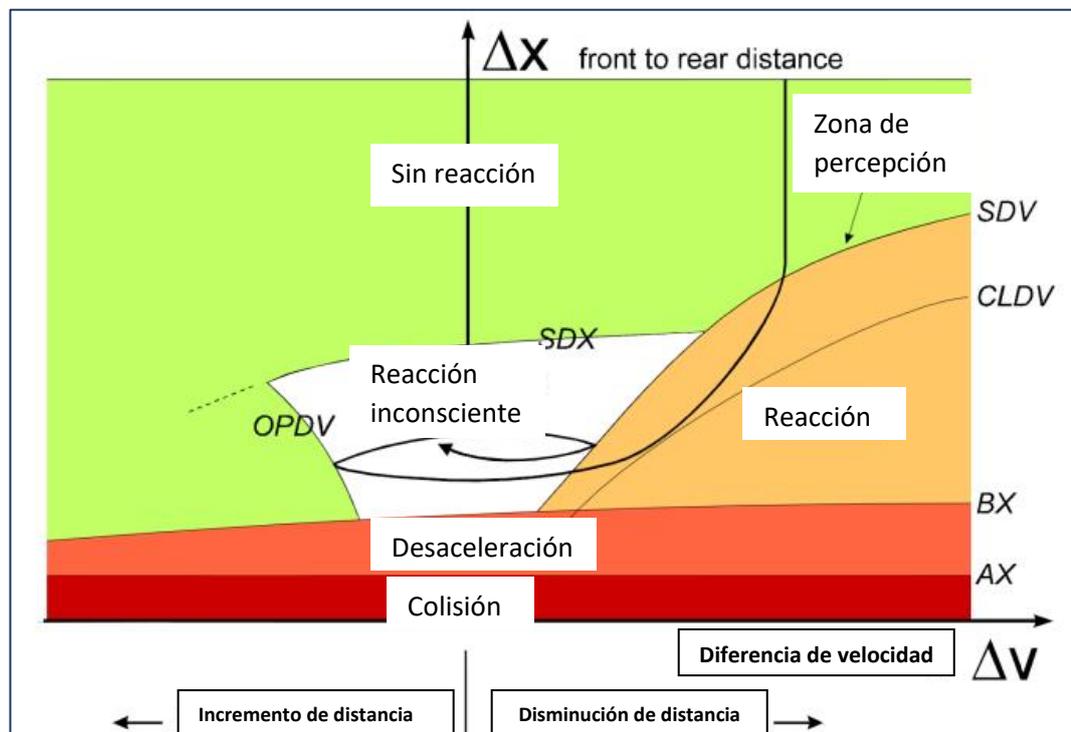


Figura 2: Representación gráfica adaptada al modelo de seguimiento vehicular de Wiedemann 74

Fuente: Adaptado de PTV, (2007)

La figura 2 muestra de forma gráfica las consideraciones del software Vissim para el modelo de Wiedemann 74. Muestra como la separación entre vehículos " $\Delta X$ " va disminuyendo en función de la diferencia de velocidad " $\Delta V$ ". La parte naranja, debajo del límite  $SDV$ , es el área donde los vehículos reducen la velocidad. Luego de esto, el vehículo, antes de cruzar otro límite  $CLDV$ , reduce su velocidad para entrar a una región de reacción inconsciente. El conductor permanece en la región que esta contenido por los límites  $OPDV$ ,  $SDX$  y  $SDV$  (Higgs et al., 2011).

Es importante señalar que la siguiente información, que permite conocer el modelo original de Wiedemann, fue obtenida de Janso y Tapani (2004).

$AX$  es la distancia deseada entre vehículos estacionados. Donde  $AXadd$  y  $AXmult$  son parámetros de calibración y  $RND1_n$  es un parámetro de distribución normal.

$$AX = L_{n-1} + AXadd + RND1_n * AXmult \quad \dots\dots\dots (8)$$

Así también,  $ABX$  o  $BX$  es la distancia deseada mínima de seguimiento en baja velocidad. Donde  $BXadd$  y  $BXmult$  son parámetros de calibración.

$$ABX = AX + BX \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$BX = (BXadd + BXmult * RND1_n) * \sqrt{v} \quad \dots\dots\dots (10)$$

La velocidad “v” se define de la siguiente forma.

$$v = \begin{cases} v_{n-1} & \text{para } v_n > v_{n-1} \\ v_n & \text{para } v_n \leq v_{n-1} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (11)$$

Además,  $SDX$  es la máxima distancia de seguimiento. La empresa PTV señala que esta distancia varía entre 1.5 y 2.5 veces la distancia mínima de seguimiento ( $ABX$ ). Donde  $EXadd$  y  $EXmult$  son parámetros de calibración.  $NRND$  es un número aleatorio de distribución normal y  $RND2_n$  es un parámetro dependiente de distribución normal.

$$SDX = AX + EX * BX \quad \text{con} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$EX = EXadd + EXmult * (NRND - RND2_n) \quad \dots\dots\dots (13)$$

Por otro lado,  $SDV$  es el punto de aproximación. Este límite se utiliza para describir los puntos donde el conductor nota que se aproxima a un vehículo más lento. Donde  $CXconst$ ,  $CXadd$  y  $CXmult$  son parámetros de calibración.

$$SDV = \left( \frac{\Delta x - L_{n-1} - AX}{CX} \right)^2 \quad \text{con} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$CX = CXconst * (CXadd + CXmult * (RND1_n + RND2_n)) \dots\dots\dots (15)$$

Donde, *CLDV* representa el decrecimiento en la diferencia de velocidad.

De la misma forma, Wiedemann incluye otro límite similar a *SDV* para modelar la percepción de las pequeñas diferencias de velocidad en cortas distancias. De acuerdo a la empresa PTV, en su software, ellos ignoran este límite y se asume a *CLDV* igual a *SDV*. De la misma forma, *OPDV* representa el incremento de la diferencia de velocidad. Este límite describe el punto donde el conductor observa que está viajando a una velocidad menor que el vehículo líder. Donde *OPDVadd* y *OPDVmult* son parámetros de calibración y *NRND* es un parámetro de distribución normal.

$$OPDV = CLDV * (-OPDVadd - OPDVmult * NRND) \dots\dots\dots (16)$$

Los límites anteriores dan lugar a los siguientes regímenes de seguimiento vehicular.

**En seguimiento:**

Los límites *SDV*, *SDZ*, *OPDV* y *ABX* o *BX* constituyen este régimen. La aceleración de los vehículos se asume siempre como diferente de cero, y cuando un vehículo pasa al régimen de seguimiento, ya sea por pasar el límite *SDV* o *ABX* o *BX* se le asigna un valor de aceleración negativa igual a *-bnull*, así también, cuando pasa el límite *OPDV* o *SDX*, se le asigna una aceleración positiva igual a *+bnull*. Donde *BNULLmult* es un parámetro de calibración, *RND4n* es un parámetro de distribución normal y *NRND* es un número aleatorio de distribución normal.

$$b_{null} = BNULLmult * (RND4_n + NRND) \dots\dots\dots (17)$$

**En conducción libre:**

Los vehículos se encuentran encima de los límites y los viajes no son influenciados por el tráfico adyacente, en otras palabras, los vehículos utilizan su máxima aceleración para alcanzar su velocidad deseada. No obstante, cuando esta velocidad es

alcanzada, se le asigna al vehículo una aceleración negativa igual  $-b_{null}$  o una positiva igual a  $+b_{null}$ . La máxima aceleración  $b_{max}$ , para los pasajeros de los vehículos, está definido por la siguiente ecuación. Donde  $V_{max}$  es la máxima velocidad del vehículo y el factor  $FAKTORV_{mult}$  es un parámetro de calibración.

$$b_{max} = BMAX_{mult} * (v_{max} - v * FaktorV) \quad \text{con} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$FaktorV = \frac{v_{max}}{v_{des} + FAKTORV_{mult} * (v_{max} - v_{des})} \quad \dots\dots\dots (19)$$

**Acercamiento:**

Cuando se pasa el límite  $SDV$ , los conductores notan que se están acercando a un vehículo más lento, entonces, desaceleran para evitar una colisión. El valor de desaceleración es el siguiente. Donde  $b_{n-1}$  es la desaceleración del vehículo líder.

$$b_n = \frac{1}{2} * \frac{(\Delta v)^2}{ABX - (\Delta x - L_{n-1})} + b_{n-1} \quad \dots\dots\dots (20)$$

**Régimen de emergencia:**

Cuando el vehículo tiene una distancia menor al límite de  $ABX$  o  $BX$ , el conductor desacelera su velocidad para evitar una colisión.

$$b_n = \frac{1}{2} * \frac{(\Delta v)^2}{AX - (\Delta x - L_{n-1})} + b_{n-1} + b_{min} * \frac{ABX - (\Delta x - L_{n-1})}{BX} \quad \dots\dots (21)$$

La máxima desaceleración del vehículo,  $b_{min}$ , se muestra a continuación. Donde  $BMIN_{add}$  y  $BMIN_{mult}$  son parámetros de calibración y  $RND3_n$  es un parámetro de distribución normal.

$$b_{min} = -BMIN_{add} - BMIN_{mult} * RND3_n * BMIN_{mult} * v_n \quad \dots\dots (22)$$

### 2.4.3. Modelo de la General Motors

Mathew (2014) señala que muchos consideran al modelo de la General Motors el modelo más popular de seguimiento vehicular por dos razones. Primero, porque coincide con los datos recogidos en campo y los modelos basados en este modelo muestran una gran relación con los datos obtenidos de campo. Y segundo, porque tiene una relación matemática con los modelos macroscópicos. Incluso el modelo logarítmico de Greenberg, para la relación de densidad-velocidad, puede derivarse de uno de los modelos de la General Motors.

El modelo de la GM es un modelo generalizado de seguimiento vehicular. Por ejemplo, como se cita en Chakroborty y Kikuchi (1999), los modelos desarrollados por Pipes (1953), (1967); Forbes et al. (1958) y Forbes (1963), son casos específicos del modelo de la General Motors.

Además, este es un modelo de estímulo-respuesta, pues asume que el vehículo de seguimiento responde a una velocidad relativa diferente de cero, que varía de acuerdo al proceso de aceleración y desaceleración. El modelo considera la hipótesis de que el grado en el que un estímulo afecta la respuesta está en función del progreso de la distancia que separa al vehículo líder con el vehículo de seguimiento y la velocidad de este último. En la figura 3, se puede apreciar de manera gráfica la base del modelo vehicular.

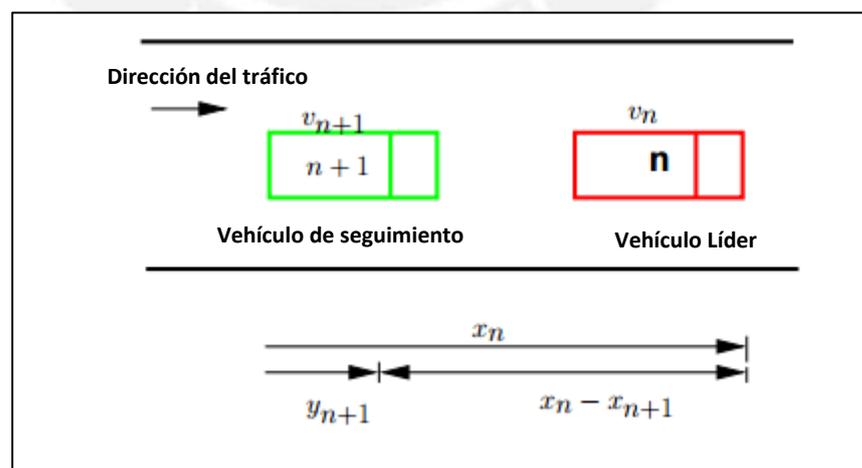


Figura 3: Representación gráfica del modelo de seguimiento vehicular de la General Motors.

Fuente: Adaptado de Mathew y Krishna, (2007)

Mathew (2014) muestra que el modelo de seguimiento vehicular de la General Motors se basa en seguir al líder. Este concepto está basado en dos supuestos. El primero, a mayor velocidad del vehículo, mayor será el espacio entre los vehículos. Y el segundo, para evitar la colisión, los conductores deben mantener una distancia segura entre los vehículos. Donde “ $\Delta x_{n+1}^t$ ” es el espacio disponible para un “ $(n + 1)^{th}$ ” vehículo y “ $\Delta x_{safe}$ ” es la distancia segura. “ $v_{n+1}^t$ ” y “ $v_n^t$ ” son las velocidades.

El espacio requerido se define como:

$$\Delta x_{n+1}^t = \Delta x_{safe} + \tau v_{n+1}^t \quad \dots\dots\dots (23)$$

Donde “ $\tau$ ” es el coeficiente de sensibilidad. La ecuación puede reescribirse de la siguiente manera.

$$x_n - x_{n+1}^t = \Delta x_{safe} + \tau v_{n+1}^t \quad \dots\dots\dots (24)$$

Derivando la ecuación anterior respecto al tiempo se obtiene que.

$$v_n^t - v_{n+1}^t = \tau a_{n+1}^t \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$a_{n+1}^t = \frac{1}{\tau} [v_n^t - v_{n+1}^t] \quad \dots\dots\dots (26)$$

Finalmente, la General Motors propone varias formas de representar el coeficiente de sensibilidad. La representación más general tiene la siguiente forma.

$$a_{n+1}^t = \left[ \frac{\alpha_{l,m} (v_{n+1}^t)^m}{(x_n^t - x_{n+1}^t)^l} \right] [v_n^t - v_{n+1}^t] \quad \dots\dots\dots (27)$$

Donde “ $l$ ” es un exponente de *distance headway* y puede tomar valores de (+4) a (-1). Así mismo, “ $m$ ” es un exponente de velocidad que puede tomar valores desde (-2) a (+2) y “ $\alpha$ ” es el coeficiente de sensibilidad. Estos parámetros son calibrados con la información de campo.

Mathew (2014) también señala que en los software de microsimulación existen tres puntos que deben ser recordados. El primer lugar, un conductor reaccionará al cambio de velocidad respecto al vehículo líder en un lapso de tiempo denominado “tiempo de reacción”, durante el cual, el vehículo de seguimiento percibe el cambio de velocidad y reacciona a ello. El segundo lugar, la posición del vehículo, su velocidad y aceleración será actualizado en determinados periodos de tiempo, que dependen de la precisión requerida. A intervalos más cortos, la precisión será mayor. Y tercero, la posición y la velocidad del vehículo se rigen por la ley de movimiento de Newton y la aceleración por la del modelo de seguimiento.

Finalmente, las ecuaciones de flujo de tráfico pueden desarrollarse de la siguiente manera.

$$v_n^t = v_n^{t-\delta t} + a_n^{t-\delta t} * \delta t \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$x_n^t = x_n^{t-\delta t} + v_n^{t-\delta t} * \delta t + \frac{1}{2} a_n^{t-\delta t} \delta t^2 \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$a_{n+1}^t = \left[ \frac{\alpha_{l,m} (v_{n+1}^{t-\delta t})^m}{(x_n^{t-\Delta T} - x_{n+1}^{t-\Delta T})^l} \right] (v_n^{t-\Delta T} - v_{n+1}^{t-\Delta T}) \quad \dots\dots\dots (30)$$

Donde:

$\Delta T$ : Tiempo de reacción

$\Delta t$ : Tiempo de actualización.

## 2.5. Métodos para modelar el comportamiento de ciclistas

Twaddle et al. (2014), identifica a los modelos que buscan representar el comportamiento de los ciclistas en cuatro categorías: Modelos longitudinalmente continuos, modelos autómatas celulares, modelos de fuerza social y modelos lógicos.

### 2.5.1. Modelos longitudinalmente continuos

Twaddle et al. (2014), menciona que la mayoría de las herramientas de simulación del tráfico como Vissim, Aimsun, Sumo, etc. utilizan dos modelos para representar de forma independiente tanto el movimiento longitudinal como el movimiento lateral. Señala que estos modelos son continuos espacialmente y temporalmente, y que generalmente, están basados en uno de los tres modelos: (i) Gazis-Herman-Rothery, (ii) modelos de distancia segura o (iii) modelos psicofísicos; donde la velocidad y la posición del vehículo líder determina el comportamiento del vehículo sucesor. Mientras tanto, el movimiento lateral realiza un proceso similar y que es representado mediante modelos discretos de elección de carril, donde también, la posición y la velocidad de otros usuarios y la ruta deseada individual se toman en cuenta en el proceso de la elección del carril.

Por otra parte, Falkenberg et al. (2003) propone un modelo con un eje lateral continuo, es decir, los ciclistas eligen su posición lateral dentro del carril con el objetivo de maximizar el tiempo mínimo de colisión a otros ciclistas, peatones o vehículos. Este tiempo se define como el tiempo que existe antes de que se produzca el choque entre dos vehículos. La idea base del modelo se muestra en la figura 4.

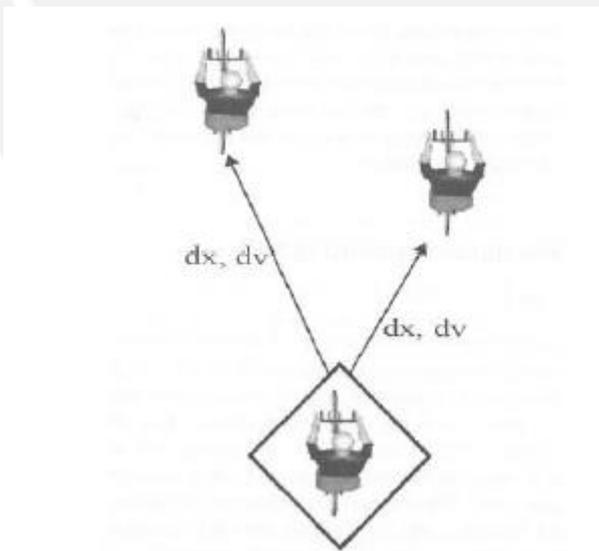


Figura 4: Modelo gráfico del movimiento lateral  
Fuente: Falkenberg et al., (2003)

En la figura, las flechas representan el tiempo mínimo de colisión entre vehículos cercanos. Si no existiesen otros usuarios, en este caso ciclistas, escogerían una posición pre-definida que generalmente es hacia la derecha.

Igualmente, considera que este comportamiento está guiado también por el modelo psicofísico de Wiedemann 74 y Wiedemann 99. Falkenberg et al. (2003), asume que los ciclistas se rigen por factores psicológicos (velocidad deseada y distancia de seguimiento) y por factores físicos (umbral de percepción y control de vehículo imperfecto); si bien esta hipótesis no ha sido verificada, los modelos producidos por Vissim demuestran, en la mayoría de los casos, una gran representación de la realidad al momento de modelar ciclistas macroscópicamente.

Por otro lado, Carrignon y Buchana (2009) señalan que en Vissim, los ciclistas no interactúan de manera realista con los bordes de la infraestructura, generalmente con el bordillo o las líneas marcadas. Y si bien, esta característica no afecta significativamente a los modelos con pocos usuarios o en contextos con carriles anchos, en situaciones diferentes, esta característica reduce la superficie efectiva de tránsito. En la figura 7 se muestra esta característica.

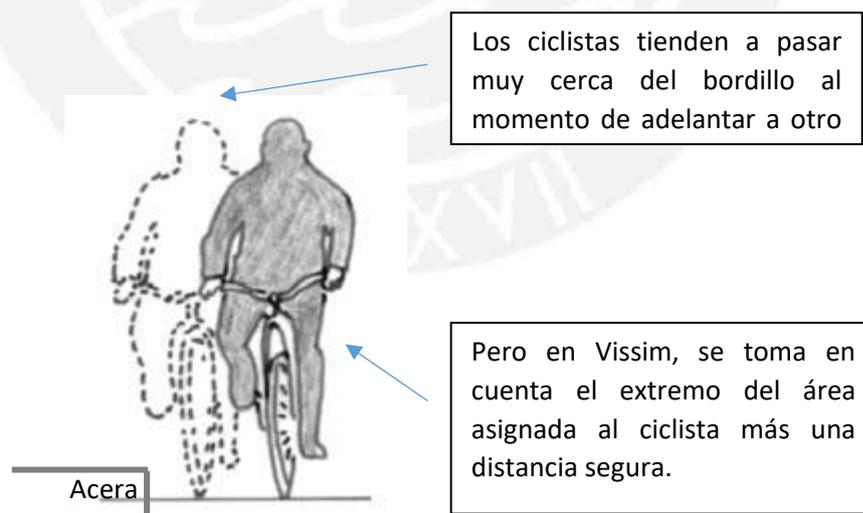


Figura 5: Comparación de las consideraciones en Vissim y lo real  
Fuente: Adaptado de Carrignon y Buchana, (2009)

### 2.5.2. Modelo autómatas celular

Twaddle et al. (2014) menciona también que los modelos autómatas celular son modelos discretos en tiempo y espacio. También señala que en el modelo original de Nagel y Schreckenberg (1992), el espacio de dos dimensiones es dividido en cuadrículas similares a la longitud de un vehículo y que estos siguen rutas predefinidas a través de las celdas. Estas rutas son guiadas por cuatro regímenes: aceleración, desaceleración, aleatorización y movimiento. Este modelo, como lo define Nagel y Schreckenberg (1992), permite simular el tráfico en camino libre. Así mismo, indican que al restringir que solo un vehículo pueda ocupar una celda provee una forma simple y rápida para modelar el tráfico heterogéneo; pero, que al mismo tiempo, limita la representación del tráfico mixto.

Por otro lado, en China, Yao et al. (2009) propone otra alternativa que, a diferencia del anterior, plantea dividir las celdas en función al más pequeño de los elementos, pero, al mismo tiempo, permite que diferentes usuarios puedan ocupar una misma celda a la vez. En el proyecto, se representaron a los vehículos con espacios de 5x3 celdas y a los ciclistas con espacios de 3x1 celdas. Sin embargo, como señala Twaddle et al. (2014), el modelo todavía no ha sido calibrado y validado empíricamente. Otra investigación realizada por Mallikarjuna y Ramachandra Rao (2010) en la India, plantea un proceso similar. En este modelo, la longitud de las celdas están basadas en las propiedades de aceleración y desaceleración de los usuarios del camino; y el ancho de las celdas, en base al ancho y el espaciamiento lateral observado entre diferentes grupos de usuarios.

Finalmente, Vasic y Ruskin (2011), plantean una nueva propuesta para modelar una red urbana, basado en el modelo celular autómatas y las reglas de movimiento de Nagel y Schreckenberg (1992), la simulación es mixta y es evaluada en dos condiciones, uno es en el tramo de una calle y otro en una intersección. En este modelo, la velocidad depende de la distancia entre dos vehículos, es decir, entre el número de celdas libres que los separa. Así mismo, como se aprecia en la figura 6 también se permiten los traslapes en las celdas. Finalmente, como señalada Twaddle et al. (2014), la ventaja de este modelo es que la geometría de una intersección puede ser directamente trasladada a una adecuada malla de celdas.

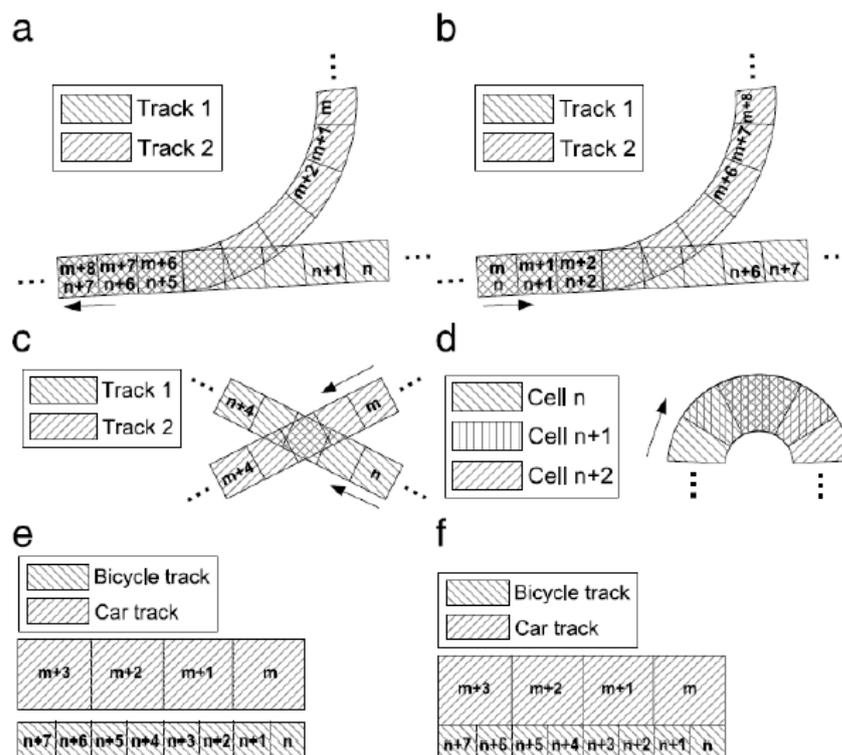


Figura 6: Ejemplo de la construcción espacial utilizada en un modelo automático celular.  
Fuente: Vasic y Ruskin, (2011)

### 2.5.3. Modelo de la fuerza social

La investigación realizada por Liang et al. (2012), señala que las bicicletas poseen características especiales de tráfico que no pueden o son difícilmente representadas por teorías de flujo o modelos tradicionales. En tal sentido, el estudio se basa en dos modelos. El primero es el modelo de la fuerza psicofísica y el segundo es el modelo de elección de trayectoria. El autor señala que el primer reto en modelar el comportamiento de los ciclistas es el cómo hacer frente a la interacción entre el movimiento lateral y el movimiento longitudinal.

#### Modelo psicofísico

Liang et al. (2012) describe el movimiento como el resultado directo de la superposición de las dos fuerzas que actúan en el centro de cada ciclista, y que está basado en la segunda ley de Newton, como se muestra en la ecuación 31.

$$\begin{aligned}
m_i \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} &= \vec{F}_i(t) := \vec{F}_i^{psy}(t) + \vec{F}_i^{phy}(t) \\
&= \vec{F}_i^{drv}(t) + \Sigma \vec{F}_i^{ca}(t) + \Sigma \vec{F}_i^{att}(t) + \Sigma \vec{F}_i^{cont}(t) + \Sigma \vec{F}_i^{frc}(t)
\end{aligned}
\tag{31}$$

Donde:

$\vec{F}_i^{psy}$ : Fuerza psicológica

$\vec{F}_i^{phy}$ : Fuerza física

En la ecuación, la fuerza de conducción ( $F_i^{drv}$ ), la fuerza de repulsión hacia otros usuarios ( $F_i^{ca}$ ) y la fuerza de atracción ( $F_i^{att}$ ) describen los efectos psicológicos entre individuos ( $\vec{F}_i^{psy}$ ) y obstáculos. Mientras que la fuerza de contacto ( $F_i^{cont}$ ) y la fuerza de fricción ( $F_i^{frc}$ ) describen los efectos físicos entre individuos ( $\vec{F}_i^{phy}$ ).

Como se aprecia en las figuras 7 y 8, en este modelo los ciclistas se representan como elipses. Donde la fuerza de conducción ( $F_i^{drv}$ ) permite a los ciclistas moverse en una dirección determinada y a una velocidad deseada. Además, la fuerza de repulsión ( $F_i^{ca}$ ), se produce en el sentido que permite evitar los obstáculos cercanos, como lo son otros ciclistas, peatones, bordes, etc., y la dirección de la fuerza se produce en sentido perpendicular a la normal producida. Así mismo, la fuerza de atracción ( $F_i^{att}$ ), representa las atracciones que afecta el comportamiento de los ciclistas. Esta atracción puede ser dividida en dos partes: la atracción hacia otras personas (amigos, pareja, familia) y la otra atracción hacia los objetos (sombras, paisajes). La diferencia entre ellas radica en que la atracción hacia objetos cambia en el tiempo.

De la misma forma, la fuerza de contacto ( $F_i^{cont}$ ) es la resultante de la fuerza de repulsión con la fuerza de conducción. Puesto que, cuando se produce el traslape entre ciclistas, esta fuerza contrarresta la compresión de las elipses y mientras mayor sea este traslape, mayor es la fuerza. Finalmente, la fuerza de fricción ( $F_i^{frc}$ ) se produce durante el contacto de ciclistas que están lo suficientemente cerca.

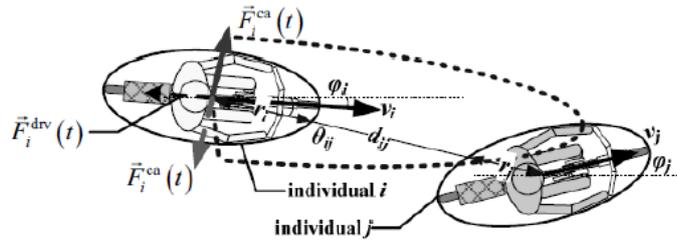


Figura 7: Diagrama de fuerzas que evitan la colisión entre bicicletas  
Fuente: Liang et al., (2012)

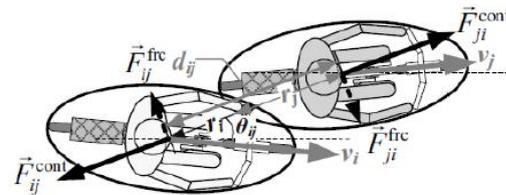


Figura 8: Descripción de la fuerza física provocada  
Fuente: Liang et al., (2012)

### Modelo de elección de trayectorias

Este modelo sirve para determinar qué dirección tomará el ciclista, también analiza su respuesta ante obstáculos y además, decide a qué lado moverse por condiciones previamente definidas. La elección de la trayectoria está guiada por la siguiente ecuación.

$$\vec{t}_{ij} = \begin{cases} (-\vec{n}_{ij}^2, \vec{n}_{ij}^1) & \rho_L > \rho_R \\ (\vec{n}_{ij}^2, -\vec{n}_{ij}^1) & \rho_L < \rho_R \\ random & \rho_L = \rho_R \end{cases} \dots\dots\dots (32)$$

Donde:

$\rho_L$ : Densidad izquierda en el rango de percepción

$\rho_R$ : Densidad derecha en el rango de percepción

Finalmente, para calibrar y validar el modelo planteado, se efectúa un proceso de simulación en computadora. Esta comparación se hace en base a la velocidad en metros por segundo versus densidad en ciclistas por metro cuadrado.

Se modeló una sección de 60 metros de longitud y 5.3 metros de ancho, con 50 ciclistas, y como se observa en la figura 9, se seleccionó el área mostrada como zona de estudio. Los resultados se muestran en la figura 10.

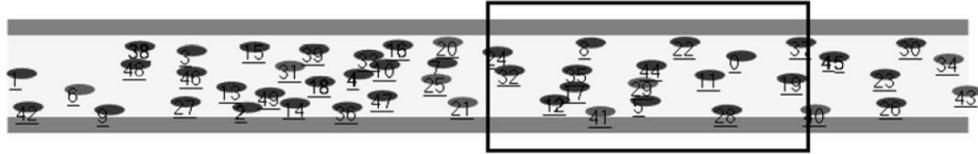


Figura 9: Captura del escenario de simulación  
Fuente: Liang et al., (2012)

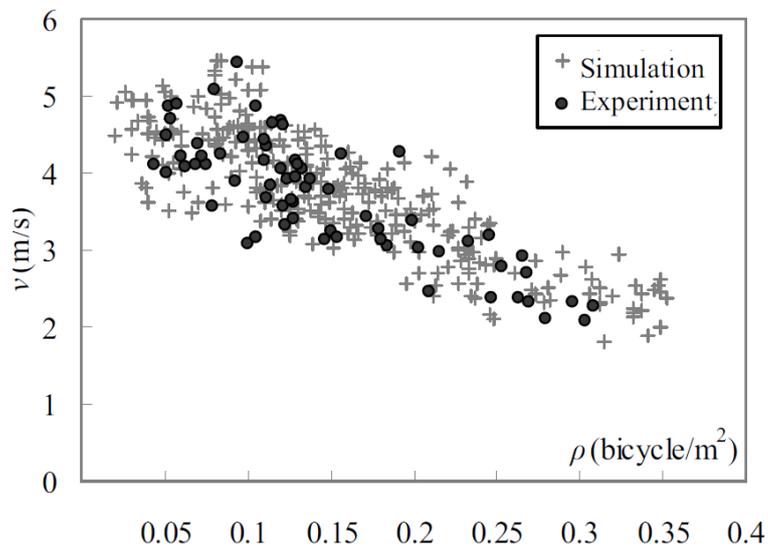


Figura 10: Diagrama fundamental de velocidad por densidad  
Fuente: Liang et al., (2012)

Como se aprecia en la figura 10, en la primera parte, para densidades entre 0.07 y 0.11 ciclistas/m<sup>2</sup>, la velocidad varía entre 3.5 y 5.5 m/s. Liang et al. (2012) señala que este mayor intervalo puede deberse a que generalmente en densidades bajas la fuerza psicológica controla el movimiento, pero que al aumentar la densidad y aumentar los traslapes entre ciclistas el movimiento se ve afectado. En densidades mayores la fuerza física predomina y la velocidad desciende significativamente. La velocidad libre es 5.04 m/s (18.1 km/hr) y la densidad de parada es 0.6 ciclistas/m<sup>2</sup>.

## **2.6. Microsimulación de ciclistas: estudios empíricos**

En los últimos años se han realizado una gran cantidad de investigaciones en sistemas de transporte utilizando microsimulación, sin embargo, la mayoría de estas investigaciones están enfocadas en vehículos motorizados y al transporte público, y en menor medida, en otros usuarios como son los ciclistas y peatones.

En 1976, un modelo simple de simulación fue creado con el objetivo de analizar los espacios de cruces para bicicletas (Ferrara, 1976). Después de esto, Botma y Papendrecht (1991) crearon un programa de simulación que examinaba el nivel de servicio de un sistema separado de bicicletas. Por otro lado, la DHV Environment and Infrastructure, desarrollaron una herramienta de planeamiento llamada QUOVADIS/BICYCLE que determinaba la mejor posibilidad para la instalación de una red de bicicletas y también, la mejor asignación del presupuesto disponible. Después de esto, HUTSIM, software de simulación desarrollado por la Universidad de Tecnología de Helsinki, agregó bicicletas en sus modelos; no obstante, estos eran tratados como peatones de alta velocidad, que podría ser apropiado para Finlandia, donde los ciclistas y los peatones comparten los mismos espacios e interactúan con los vehículos motorizados solo en los cruces (Faghri y Egyhaziova, 1999).

Sin embargo, no fue hasta que Faghri y Egyhaziova (1999) desarrollaron el primer software de microsimulación que consideraba las interacciones entre vehículos motorizados y ciclistas, el software se llamó BICSIM por BICycle SIMulator. El proyecto tuvo como objetivo desarrollar un algoritmo que serviría de base para BICSIM, y que, finalmente, permitiera representarlo en un programa de computadora. Pero en general cualquier software requiere de datos y submodelos que se obtienen a partir de estudios empíricos de comportamiento.

### **2.6.1. Consideraciones por género y edad en ciclistas**

Una investigación reciente, realizada en la provincia de Ontario, Canadá, llevada a cabo por Mereu (2015) planteó dos objetivos principales. El primero, obtener parámetros más reales que puedan ser aplicados en la microsimulación de ciclistas y segundo, obtener recomendaciones a fin de darle una aplicación específica en la

provincia de Ontario. Para la evaluación se consideró registros por GPS cada 3 segundos en cada usuario. La investigación señala que después de la recolección y la evaluación de los datos, se concluyó que no existe una diferencia considerable en las velocidades de usuarios de distinto género. Sin embargo, es necesario mencionar que el proyecto se realizó solo con 74 usuarios que previamente fueron contactados, es decir, bajo un estudio controlado. Los resultados se aprecian en la tabla 1.

Tabla 1: Velocidad promedio por género

	Mujeres	Varones
Velocidad Deseada (km/hr)	22.57	22.5
Varianza	20.47	26.56
Observaciones	28	46
Hipotesis de diferencia de medias	0	
df	63	
t Stat	0.06243535	
P(T<=t) one-tail	0.475206905	
t Critical one-tail	1.669402222	
P(T<=t) two-tail	0.95041381	
t Critical two-tail	1.998340522	

Fuente: Mereu, (2015)

El resultado muestra que t-Stat es significativamente menor que el valor de t-critical. Esto sugeriría que la probabilidad de reproducir el resultado de la muestra es muy alta si las medias de ambos datos se asumen iguales. Por lo tanto, se podría aceptar la hipótesis nula de medias iguales y que el género no tiene un efecto relevante en la velocidad. La segunda es un análisis de varianza (ANOVA) a fin de determinar las diferencias existentes entre grupos de diferente edad. Se ordenaron a los participantes previamente en cuatro grupos como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2: Velocidad promedio por edad

Grupo de edad	Media Deseada			
	Cantidad	Suma	Velocidad (km/hr)	Varianza
19-30	20	441	22.05	25.94474
31-50	29	725	25	122.7143
51-60	15	349	23.2667	13.78095
60+	10	222	22.2	30.84444

Fuente de variacion	SS	df	MS	F	P-value	F-critic
Entre grupos	124.9626	3	41.6542	0.662758	0.577727	2.735541
Dentro del grupo	4399.483	70	62.84976			
Total	4524.446	73				

Fuente: Mereu, (2015)

Se obtuvo un alto valor de p-value, con lo cual también es posible aceptar la hipótesis nula en que las medias son iguales. La evaluación sugiere que la edad no tiene un efecto en la velocidad y, en consecuencia, separarlos por grupos no es necesario.

Es importante mencionar que, debido a que cada ciclista llevaba un rastreador GPS, es probable que su velocidad se vea afectada por el hecho de sentirse que están siendo estudiados, así mismo, el propósito del viaje consistió en seguir una ruta previamente definida.

### **2.6.2. COWI: Microsimulación de ciclistas en hora pico**

La ciudad de Copenhague en Dinamarca, es una de las ciudades donde la mayor parte de la población utiliza la bicicleta como medio de transporte. La Municipalidad de la ciudad presentó un estudio donde señala que entre el 2006 y el 2010, un 36% de los viajes a centros educativos o de trabajo se realizaron utilizando bicicletas (COWI, 2012)

La municipalidad de Copenhague tiene como objetivo que para el año 2025, la ciudad pueda convertirse en una ciudad carbono cero. En tal sentido, uno de sus objetivos principales es ampliar las vías de ciclistas, razón por la cual contrataron a la empresa COWI, para que realice un estudio sobre los parámetros y las consideraciones que deben tenerse para obtener mejores modelos computacionales de ciclistas.

En agosto del 2012, la empresa COWI presentó un informe donde mostraba los resultados medidos y los parámetros a configurarse utilizando el software Vissim. Donde se consideran los siguientes parámetros.

Tabla 3: Parámetros de vehículos identificados

CARACTERÍSTICAS DE VEHÍCULOS	
1	Distribución de velocidades
2	Distribución de aceleraciones
3	Parámetros de seguimiento
4	Parámetros de adelantamiento
5	Comportamiento en estrechamientos
6	Comportamiento en paradas de autobuses
7	Comportamiento en zonas de espera
8	Comportamiento en líneas de parada
9	Comportamiento en giros a la derecha

Fuente: COWI, (2012)

Si bien la empresa COWI señala que el modelo de Wiedemann 99 y 74 son muy similares en cuanto a resultados, indican que el primero es capaz de representar mejor el comportamiento de ciclistas a pesar de ser concebido originalmente para automóviles.

En este informe se presentan diferentes curvas de velocidades y curvas de aceleración deseada en diferentes contextos. Como ejemplo, se muestra en la figura 11 la distribución de las velocidades obtenidas durante la hora pico. Así mismo, los valores para los parámetros de Wiedemann 99 obtenidos por COWI, pueden servir como un punto de partida para el desarrollo de futuros proyectos.

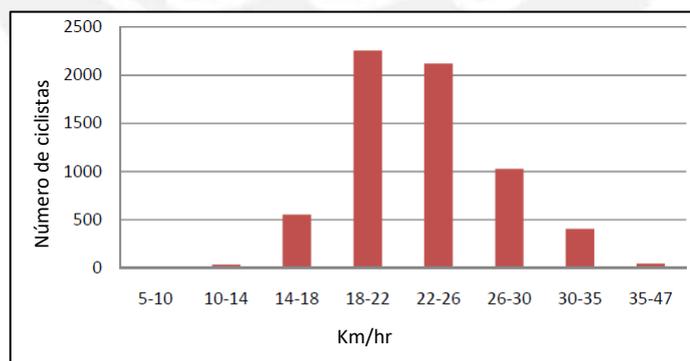


Figura 11: Número de ciclistas por rango de velocidad

Fuente: COWI, (2012)

Como se aprecia en la figura 11, a diferencia de la investigación realizada en Ontario, el estudio se hizo con más de 6000 usuarios. Donde el mayor grupo de ciclistas circula a una velocidad promedio de entre 18 y 26 km/hr. Así mismo, también señala los valores de los parámetros que encontraron y que permiten tener una mejor representación de la realidad. La figura 12 muestra los parámetros de Wiedemann 74.

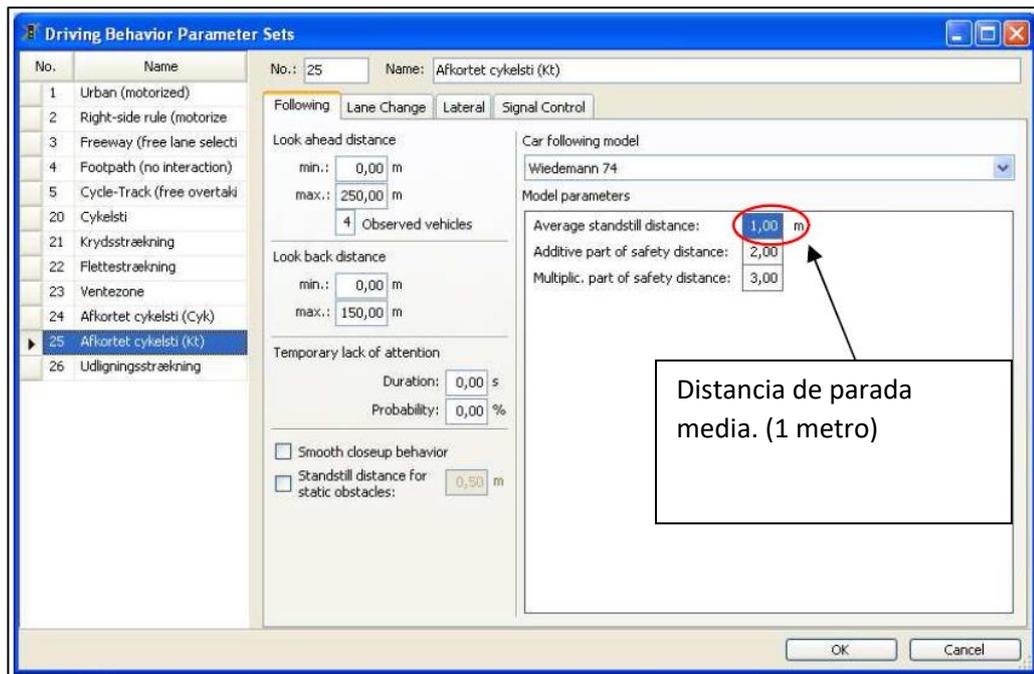


Figura 12: Parámetros por defecto del software de comportamiento del conductor  
Fuente: COWI, (2012)

## 2.7. Software Vissim

### 2.7.1. Modelo de seguimiento

Vissim 8.0 nos permite utilizar dos tipos de modelos de seguimiento psicofísico. Uno es el modelo de Wiedemann 74 y el otro es Wiedemann 99. Estos modelos utilizan vehículos, conductores y unidades que incorporan variaciones estocásticas, de forma que no hay dos vehículos que tengan exactamente el mismo comportamiento en la conducción (PTV, 2015). Como podemos ver en la figura 13, el segundo modelo permite modificar una mayor cantidad de parámetro. Y si bien ambos modelos ofrecen resultados similares, algunos estudios recomiendan utilizar el segundo.

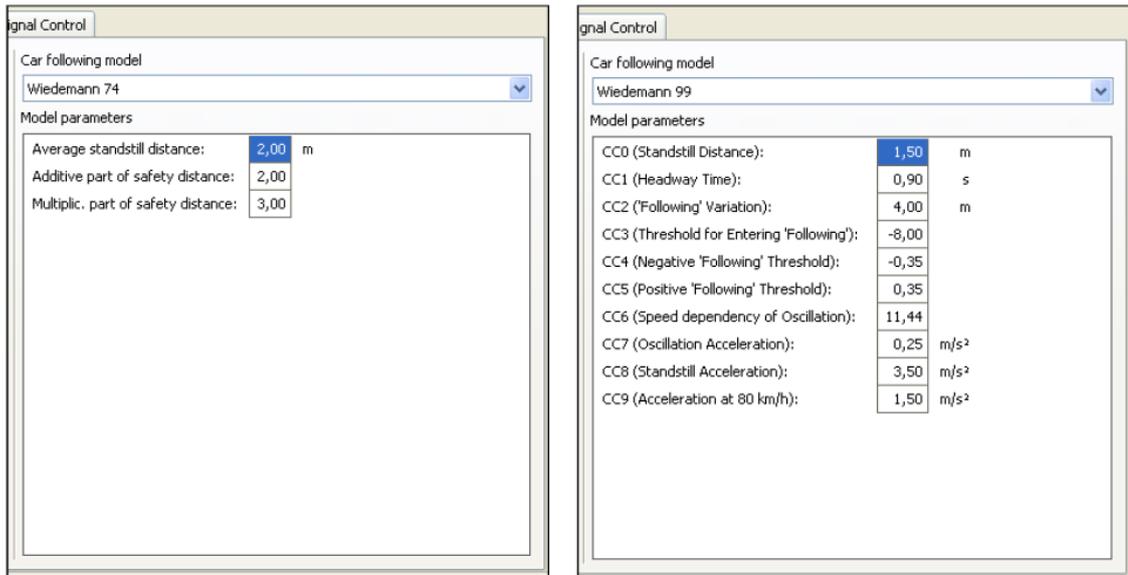


Figura 13: Parámetros de comportamiento del conductor: Wiedemann 74 y Wiedemann 99  
Fuente: COWI, (2012)

Generalmente los vehículos ocupan el carril completo en los modelos; sin embargo, no siempre ocurre esta situación, especialmente cuando se trata de motociclistas o de ciclistas. El parámetro de comportamiento lateral permite a los vehículos moverse lateralmente dentro de un mismo carril; esto también permite que un vehículo pueda adelantar a otro si es que el carril es lo suficientemente ancho. PTV Vissim señala que este tipo de comportamiento, incluido en su software, es exclusivo de la empresa. Además, COWI (2012) menciona que la elección de la posición lateral dentro de un carril es importante si se permite que ciertos vehículos rebasen dentro del mismo carril o avancen uno al lado del otro.

En el manual de usuario de Vissim se explican las consideraciones que deben tenerse al emplear el modelo de comportamiento lateral. Para activarlo es necesario marcar la casilla *Keep lateral distance to vehicles on next lane*. Luego, al tener la casilla activada, los vehículos consideran la posición de los demás vehículos en los carriles adyacentes y mantienen una distancia lateral mínima, incluso, los vehículos ajustan su orientación lateral en su propio carril.

“El vehículo que adelanta también toma en cuenta su desaceleración máxima. Si esto no permite frenar a tiempo, se adelanta a otro vehículo si es posible, incluso si no está permitido por los parámetros de comportamiento de conducción”. (PTV, 2016)

Dicho de otra forma, el comportamiento de los conductores, para un movimiento lateral, tiene que manejar dos situaciones no incluidas en los modelos tradicionales de seguimiento vehicular y cambios de carril. La primera es que los conductores deben escoger una posición lateral dentro del carril y la segunda es que el comportamiento lateral debe incorporar más de un vehículo en el mismo carril (Fellendorf & Vortisch, 2010).

En la ventana de configuración del parámetro, podemos elegir en qué posición están los vehículos en flujo libre: izquierda, derecha o al medio, sin especificar una orientación lateral determinada.

***Diamond shaped queuing:*** permite que las colas tomen en cuenta una especie de compensación entre vehículos. Por ejemplo, como se aprecia en la figura 14, las bicicletas ya no se representan como rectángulos sino como rombos, esto permite que se forme una cola de ciclistas más realista.

***Collision time gain:*** hace referencia al valor mínimo de la ganancia de tiempo antes de la colisión respecto a (i) otro vehículo o (ii) a una señal que se debe alcanzar, por lo que un cambio en la posición lateral en la línea vale la pena y se llevaría a cabo. El valor por defecto es de dos segundos de simulación. Valores menores a este llevan a que se realice un comportamiento lateral más vivo.

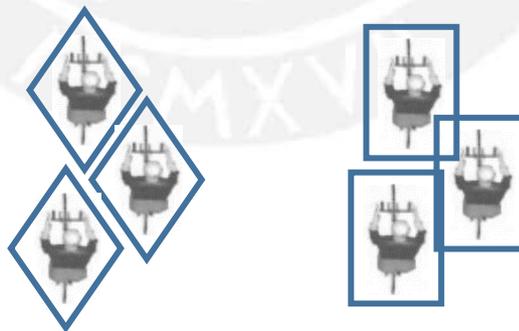


Figura 14: Representación del efecto de considerar como rombo a los ciclistas en vez de la forma rectangular como se hace con los vehículos  
Fuente: Propia

**Minimum longitudinal speed:** representa la mínima velocidad que sigue permitiendo realizar los movimientos laterales. El valor por defecto es un kilómetro por hora, esto asegura que los vehículos también pueden moverse lateralmente aún si están cerca a detenerse.

**Time between direction changes:** define el tiempo mínimo de simulación que se debe tener entre empezar el movimiento lateral en una dirección y empezar en una dirección opuesta. A mayor valor, menores son los movimientos laterales de los ciclistas.

La figura 15 muestra la ventana de configuración de parámetros del comportamiento lateral en los conductores.

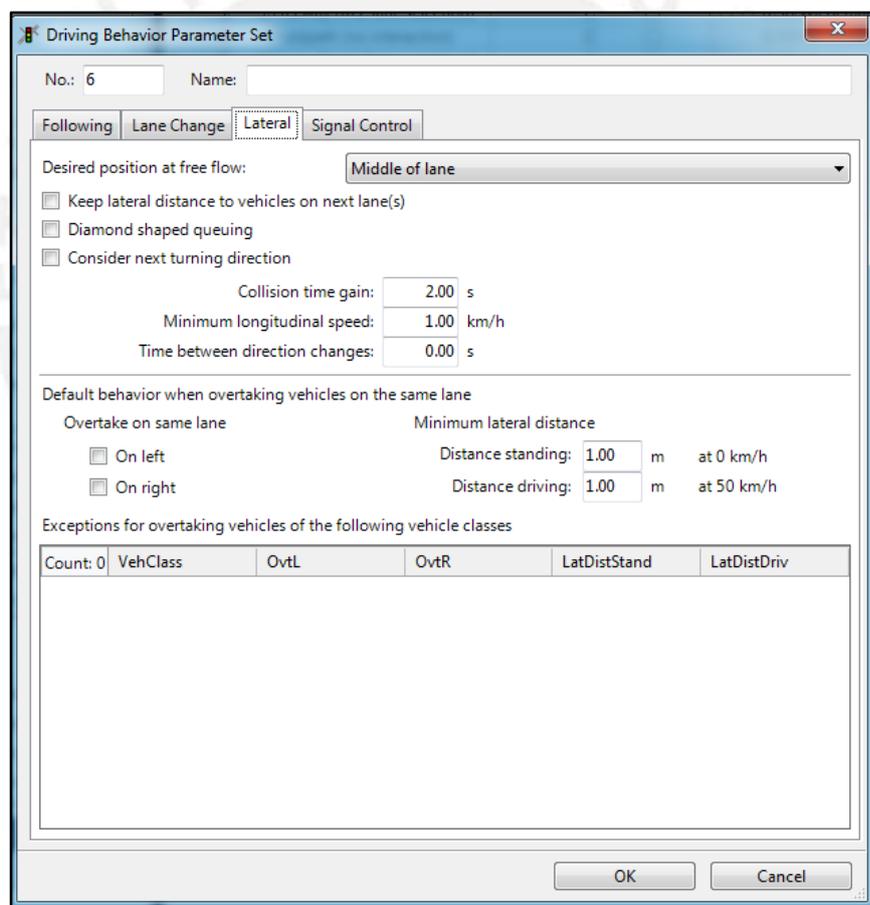


Figura 15: Ventana de configuración de comportamiento del conductor  
Fuente: PTV, (2016)

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se considera el método cuantitativo. Hernandez et al., (2010) señala que un enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

En este capítulo se describen tres procesos: el primero está relacionado a la recolección y el procesamiento de datos, el segundo describe el modelamiento del sistema y finalmente, las condiciones iniciales para evaluar las configuraciones y los algoritmos internos del software Vissim.

### 3.1. Recolección de datos

#### 3.1.1. Ubicación

La zona de estudio está ubicada en la avenida Arequipa, en el distrito de Miraflores, entre la avenida Angamos y la calle Gonzáles Prada. Desde hace algunos años se viene implementado el ciclo día, que consiste en restringir el tránsito de vehículos por esta avenida desde las 6:00 am, hasta la 1:00 pm. Promoviendo que los vecinos y los residentes puedan utilizarla para movilizarse en bicicleta, si bien el objetivo principal fue ese, se pudo observar que existen algunos usuarios que también la utilizan como vía de patinaje o como un espacio para correr. Al ser una avenida, cada dirección cuenta con dos carriles de seis metros y treinta centímetros de ancho total.



Figura 16: Avenida Arequipa  
Fuente: Google Street View, (2016)

La recolección de datos se realizó entre la calle Gonzáles Prada y la avenida Angamos.  
La zona marcada en la figura 17 muestra el espacio de muestreo.

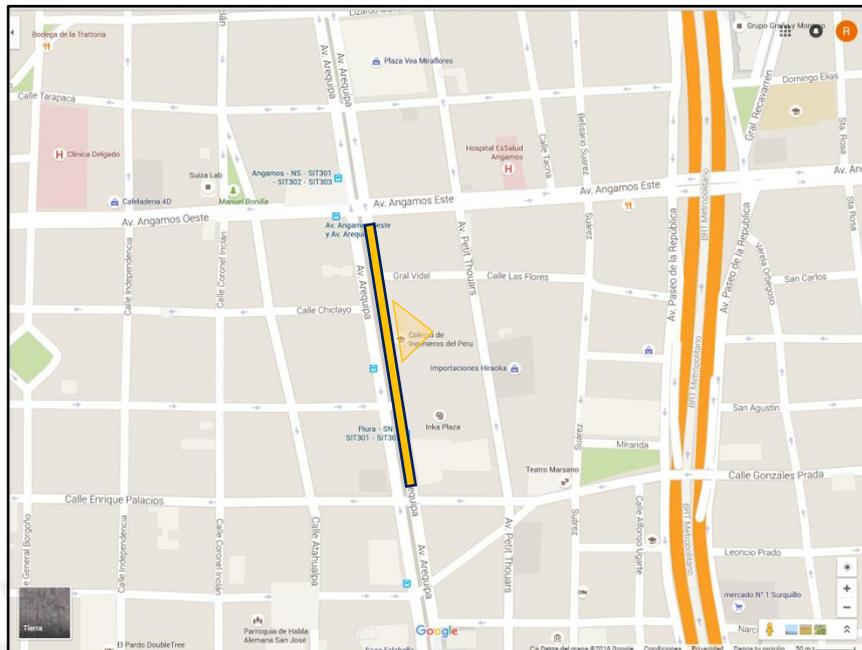


Figura 17: Zona de estudio  
Fuente: Google Maps, (2016)

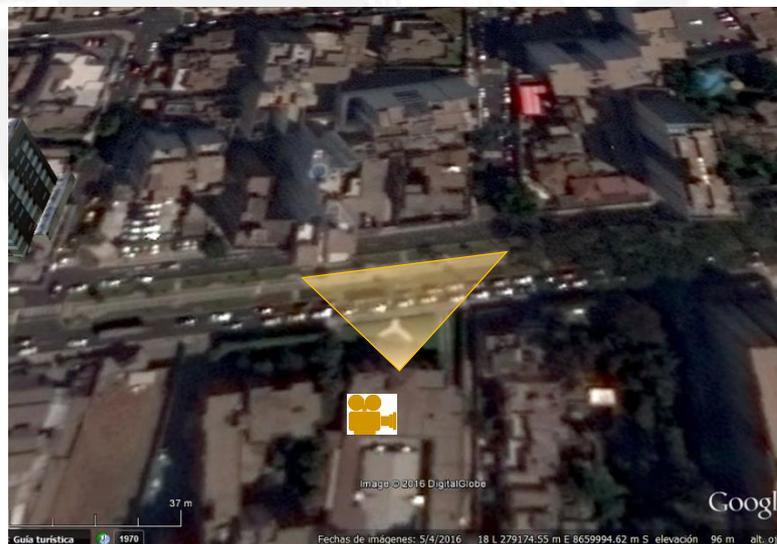


Figura 18: Zona de filmación  
Fuente: Google Earth, (2016)

### 3.1.2. Instrumentos empleados

- ✓ Video cámara: Para la filmación se utiliza una videocámara marca Sony – HDR PJ230, como la mostrada en la figura 20 y para la evaluación se reemplazó la batería incluida por una externa de una hora y media de duración. Para este proyecto se utilizó la máxima capacidad de registro y se necesitó alrededor de ocho gigabytes de almacenamiento para una hora y veinte minutos de registro.
- ✓ Wincha topográfica: Se utilizó para medir el ancho y la distancia a lo largo del carril, que luego se emplearía para obtener los tiempos de viaje.



Figura 19: Wincha  
Fuente: [www.minexproducts.com](http://www.minexproducts.com) (2016)



Figura 20: Videocámara  
Fuente: [www.filmadorasperu.com](http://www.filmadorasperu.com) (2016)

- ✓ Cinta adhesiva gruesa que sirvió para realizar marcas en el sitio de estudio. Se realizaron diferentes marcas a lo largo del carril.

### 3.1.3. Procedimiento

**Selección de la ubicación:** Se optó por una zona que no tuviese zonas de parada intermedias, si bien a lo largo de la avenida Arequipa la mayor parte de calles perpendiculares están cerradas durante el ciclo día, muchas avenidas principales como la avenida Angamos, la avenida Javier Prado y entre otras, no lo están. En tal sentido, se decidió buscar el mayor espacio de flujo libre sin paradas, razón por la cual se escogió el espacio ubicado entre la avenida Angamos y la calle Gonzáles Prado. Luego de esto, se seleccionó el espacio dentro de las instalaciones del Colegio de Ingenieros del Perú, que se muestra en la figura 21, debido a que ofrecía un mayor ángulo de filmación.



Figura 21: Posición de la videocámara A  
Fuente: Google Maps (2016)



Figura 22: Posición de la videocámara B  
Fuente: Propia

**Demarcación del espacio:** Como se muestra en la figura 23, con la cinta adhesiva gruesa se delimitó los espacios en una sección del carril. A diferencia de otros instrumentos como tizas o plumones, por lo apreciado en la recolección de datos, esta no se degradó y mantuvo su estado original. Para delimitar el espacio previamente se observó, a través de la videocámara, el mayor ángulo de visión posible, que en este caso resultó ser de diecisiete metros de extremo a extremo. Es importante señalar que la recolección de datos se realizó solo en un sentido, desde la calle Gonzáles Prada y en dirección a la avenida Angamos.



Figura 23: Delimitación de una sección del carril  
Fuente: Propia

**Filmación:** La filmación se realizó durante una hora y veinte minutos aproximadamente. No obstante, para el desarrollo del modelo solo se consideró necesario los datos recogidos durante una hora. Respecto al almacenamiento, este dependerá de la resolución y del tipo de grabación a utilizarse. En este caso se utilizó un registro de alta calidad a 30 cuadros por segundos que representó casi ocho gigabytes de almacenamiento para una hora y veinte minutos de registro.

**Tiempo de viaje:** Para el procesamiento de datos de tiempo de viaje se utilizó un reproductor de video y se registró el tiempo que tardan los ciclistas en cruzar el espacio delimitado de diecisiete metros. Como se aprecia en la figura 24 y la figura 25, la medición se hizo a partir del eje de la rueda posterior, desde el instante en que cruza la primera marca, hasta el instante en que la sobrepasa. Se consideró el tiempo de viaje de 313 ciclistas, incluyendo niños menores de ocho años.



Figura 24: Fotografía de muestra de video  
Fuente: Propia



Figura 25: Fotografía de muestra de video: consideraciones de registro  
Fuente: Propia

## 3.2. Vissim 8.0

Si bien ya se mencionó previamente que software se utiliza para el análisis del proyecto y cuáles son sus principales características. En esta sección se muestra la modelación del sistema y los puntos que se deben calibrar para obtener el modelo más realista.

### 3.2.1. Parámetros

El municipio de Copenhague en cooperación con Ramboll, identificaron diferentes parámetro; sin embargo, para este proyecto se considera solo la distribución de velocidades y la curvas de aceleración y desaceleración.

**Distribución de las velocidades:** Para obtener las velocidades, se utilizó los datos del tiempo de viaje y la distancia delimitada de diecisiete metros. Se asumió una velocidad constante, luego se las clasificó en diez intervalos de tres kilómetros por hora de amplitud. Los datos obtenidos se muestran en el capítulo 4: Análisis de datos.

**Distribución de la aceleración:** Las curvas de aceleración y desaceleración a utilizarse serán las obtenidas en el estudio de COWI (2012). Las figuras 30 y 31 muestra que curvas se utilizaron para este proyecto.

### 3.2.2. Proceso de modelamiento

Para el modelamiento del sistema, se considera el proceso mostrado en la figura 26. En la siguiente sección, se describe con más detalle el procedimiento completo.



Figura 26: Procedimiento típico para la modelación de un sistema  
Fuente: Adaptación del modelo de la FHWA, (2004)

### 3.2.3.Desarrollo del modelo

A continuación, se describe el procedimiento para realizar el modelo del sistema.

En primer lugar, se obtuvo el *background* de google maps y se definió un *link* con doble carril, de tres metros y quince centímetros de ancho cada uno. Así mismo, se define que el tipo de comportamiento vehicular para el *link* será el de “Ciclistas” y que no tendrá ningún nivel de pendiente.

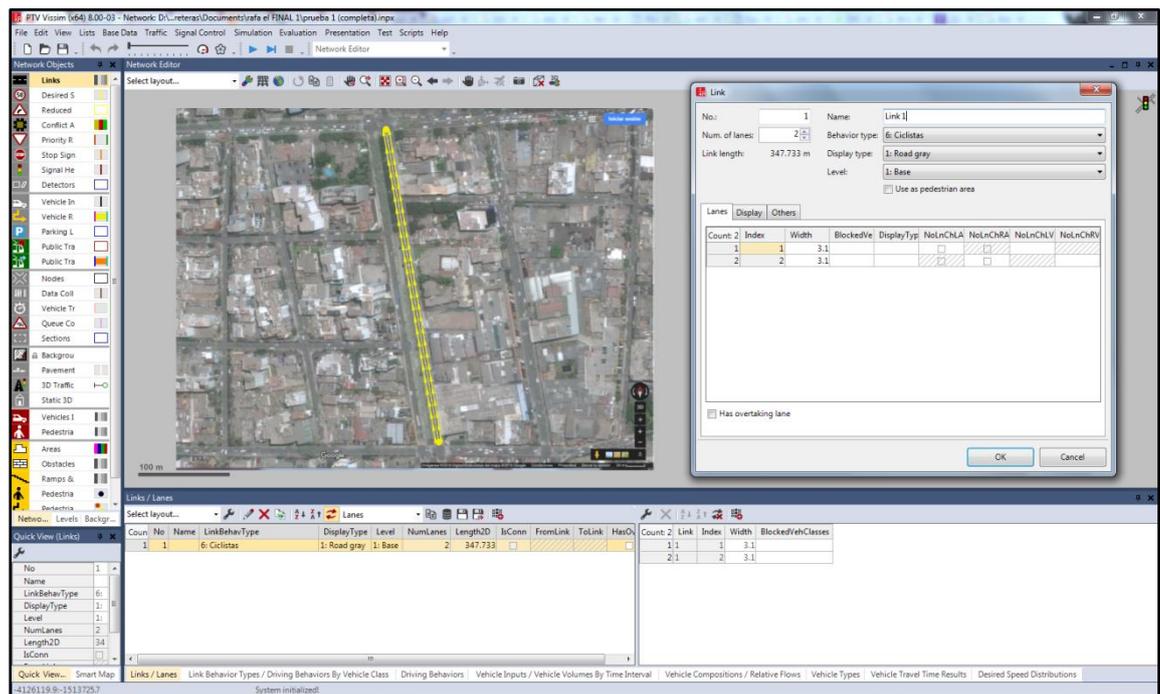


Figura 27: Delimitando link en la construcción del modelo  
Fuente: Propia

Luego de elegir el comportamiento vehicular “Ciclistas”, es necesario configurar que modelo de seguimiento vehicular se utilizará, por esta razón se define un nuevo comportamiento llamado “Ciclistas.Cowi”. En la figura 28 se aprecia el modelo de Wiedemann 99. No obstante, durante los ensayos se utilizó también el modelo de Wiedemann 74.

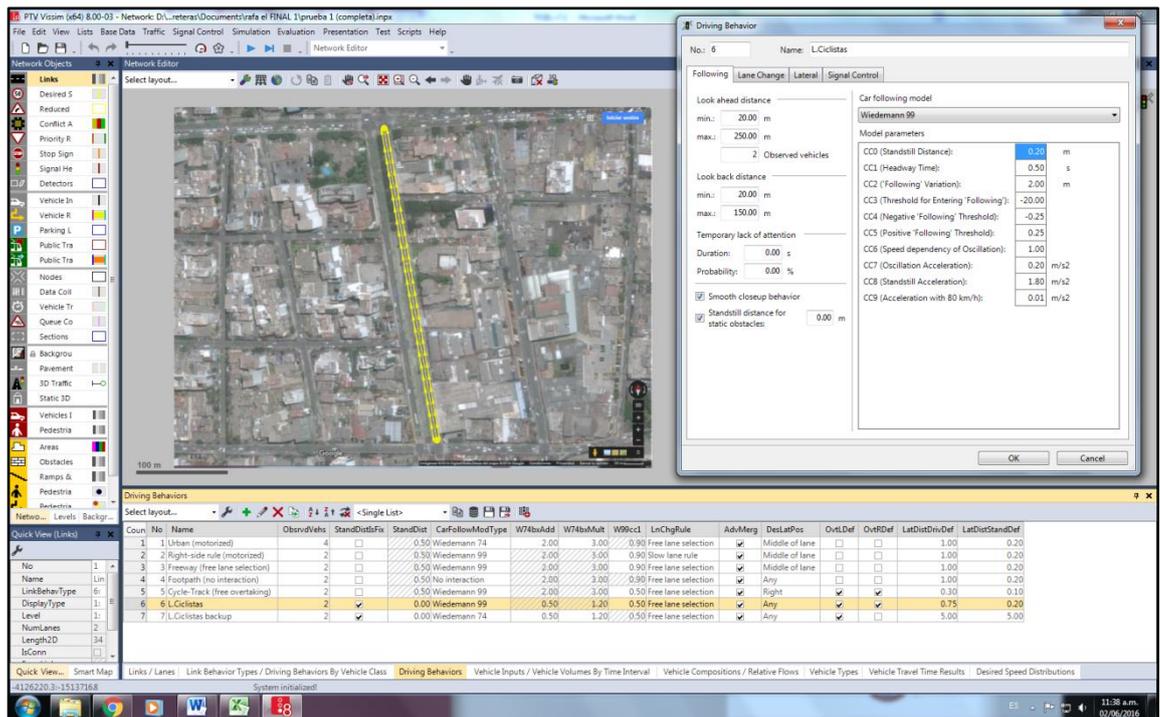


Figura 28: Definiendo el modelo de seguimiento vehicular a emplearse  
Fuente: Propia

Seguidamente, se define el tipo de vehículo a emplearse, ingresamos a *Vehicle types* y se crea un nuevo tipo de vehículo. De igual manera, se introdujo la curva de frecuencia acumulada de velocidad obtenida en campo en la opción *Desired Speed Distribution*, como se muestra en la figura 29. Para seleccionarla, es necesario abrir la ventana *Vehicle Compositions* y sincronizarla al tipo de vehículo determinado.

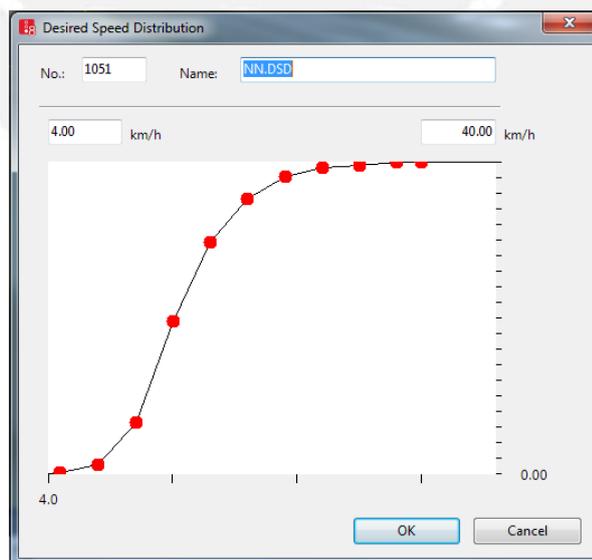


Figura 29: Ventana de distribución de velocidad deseada  
Fuente: Propia

En relación a los valores de aceleración-desaceleración, se utilizó las curvas para ciclistas en condiciones normales, sin pendiente, halladas por la empresa COWI, como las que se muestran en la figura 30 y 31.

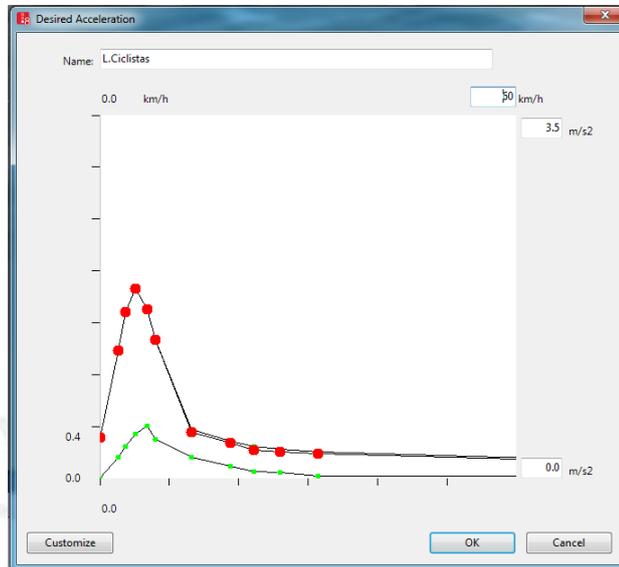


Figura 30: Ventana de aceleración deseada con los valores obtenidos por COWI, (2012)  
Fuente: Propia

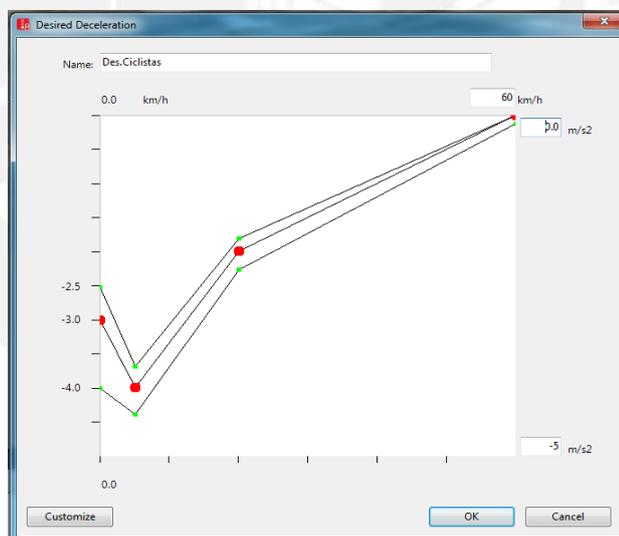


Figura 31: Ventana de desaceleración deseada con los valores obtenidos por COWI, (2012)  
Fuente: Propia

Estas curvas, luego se ingresan en el tipo de vehículo respectivo, en este caso, se creó uno nuevo con el nombre “Cowi.Bike” y, como se aprecia en la figura 32, se seleccionó la aceleración y desaceleración previamente configuradas.

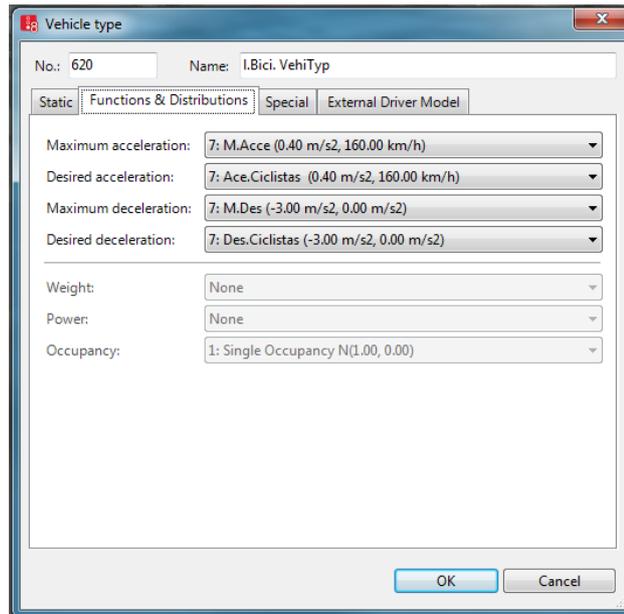


Figura 32: Ventana de tipo de vehículo  
Fuente: Propia

Respecto al periodo de recolección de datos, se consideró redactar la información desde los 600 segundos, luego de haberse iniciado la simulación, hasta un tope de 3600 segundos. Este valor de *warm up* considerado es utilizado comúnmente, no obstante, según la FHWA (2004) se debe considerar que el valor mínimo debería ser al menos el doble del tiempo en que un vehículo, en este caso un ciclista, recorre todo el sistema en flujo libre que, para este caso, resultó ser de 200 segundos.

### 3.3. Procedimiento para evaluar las configuraciones internas de Vissim 8.0

En esta sección se describe bajo qué condiciones se realizó cada análisis. Señalando también que las siguientes evaluaciones se realizaron sobre el modelo ya calibrado.

**Análisis del efecto de la aceleración deseada:** Se comparan dos tipos de ciclistas. El primero, denominado “Bike” que tiene asignado la aceleración por defecto del software respecto a otro que tiene los valores obtenidos por COWI (2012). La evaluación compara los resultados de tiempo de viaje de 30 simulaciones y se realiza respecto a diferentes volúmenes de ciclistas.

**Análisis del efecto por tipo de carril:** Se evalúa si existen diferencias significativas entre utilizar un modelo con un carril ancho o uno con dos carriles angostos. La

evaluación nuevamente se compara con los resultados de tiempo de viaje de 30 simulaciones y se realiza respecto a diferentes volúmenes de ciclistas. La comparación se realiza a través, del *randomization test* con 10 mil permutaciones y considerando una hipótesis nula de igualdad de medias y un nivel de confianza del 95%.

**Análisis del efecto del número de intervalos considerados en la distribución de velocidad deseada:** En esta sección, se evalúa si existen diferencias al construir la curva de *desired speed distribution*. Se evalúa con tablas de frecuencia construidas con distinto número de intervalos. De la misma forma, se evalúa los resultados de tiempo de viaje obtenidos en 30 simulaciones y diferentes volúmenes de ciclistas. Finalmente, para comparar los resultados, se realiza una evaluación ANOVA.

**Análisis del efecto del comportamiento vehicular:** Se comparan los resultados al considerar los modelos por defecto de Wiedemann 74 y Wiedemann 99. Así mismo, se compara con los valores obtenidos por COWI (2012) y se plantea otro grupo de opciones como intentos de representar a los ciclistas con el modelo de Wiedemann 74. Igualmente, la evaluación se realiza con los resultados de 30 simulaciones y ante diferentes volúmenes de ciclistas.

**Análisis del efecto del número de actualizaciones por segundo de simulación:** Se evalúa si existen diferencias significativas entre utilizar 5, 10, 15 y 20 actualizaciones por segundo de simulación. La evaluación se realiza también con los resultados de tiempo de viaje de 30 simulaciones y para distintos volúmenes, nuevamente, por medio de una evaluación ANOVA.

**Análisis del efecto del número semilla:** En esta última sección se evalúa si existen grupos que den como resultados de tiempos de viaje, valores con una desviación estándar significativamente menor al de otros grupos. Para la evaluación se simulan las 100 primeras semillas y luego se comparan grupos de 20 semillas, y al igual que en las secciones anteriores, se realiza esta evaluación para diferentes volúmenes. Finalmente, se normaliza los valores obtenidos de las 100 semillas respecto a su valor promedio del total. Se entiende como normalización al proceso de dividir el resultado de cada simulación respecto al valor promedio del total.

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE DATOS

### 6.1. Datos recolectados

Para el proceso de calibración del modelo es necesario recolectar una muestra de la población, por tal razón, se utilizó la ecuación 33 que representa el número mínimo de datos para una muestra de distribución normal con un nivel de confianza del 95%. Se evalúa la sección con la desviación estándar de una muestra aleatoria de 100 ciclistas, y se obtuvo que el valor mínimo necesario para este proyecto es de 85 ciclistas.

$$n = \left( \frac{1.96 * DS}{Error} \right)^2 \dots\dots\dots (33)$$

No obstante, como se demuestra más adelante con la prueba de bondad de ajuste, los datos de velocidad no representan una distribución normal. En tal sentido, autores como Lehmann (1998) sugieren que si no se tiene una distribución paramétrica de datos, el tamaño mínimo de la muestra puede ser un 15% adicional al valor que debería utilizarse en una muestra paramétrica, es decir, un total de 98 ciclistas.

Sin embargo, debido a que estos datos serían utilizados para la calibración del modelo, se decidió considerar un mayor número, debido también a que se pretendía clasificar las velocidades de los ciclistas por rango de edad. Para el proceso de calibración se registró el tiempo de viaje de 313 ciclistas y para el proceso de validación se registró el tiempo de viaje de 110 ciclistas.

Si bien se identificaron niños durante la recolección de datos, 10 niños en una hora de video, no se los incluyó en el modelo por dos razones: la primera es porque utilizan un modelo de bicicleta distinto al tamaño típico que se cuenta en el software Vissim y la segunda es porque representarlos en el modelo de forma adecuada requiere de estudios más detallados y ya que representan una fracción muy pequeña respecto del total, el no considerarlos para este proyecto, no influye significativamente en los resultados del modelo.

No obstante, para otro tipo de proyectos, sobre todo en aquellos donde la presencia de niños es alta, debería estudiarse también, en el caso que sean ciclistas, el comportamiento de los cuidadores (padres, hermanos, familia) y el cómo otros ciclistas responden ante ellos, por ejemplo: si reducen su velocidad al estar cerca o si tal vez, conservan una distancia mayor de separación.

Las siguientes figuras se realizaron en base a la información recolectada únicamente para la calibración del modelo, es decir, de 313 ciclistas. Como se aprecia en la figura 33, los ciclistas de género masculino son aproximadamente el doble que los ciclistas de género femenino.

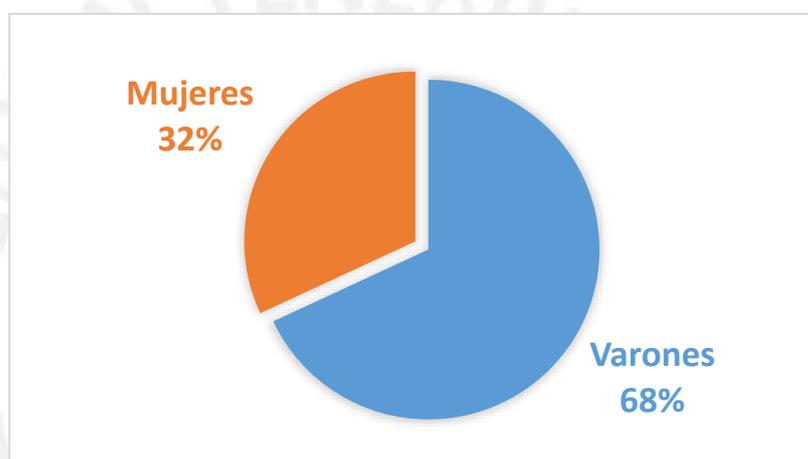


Figura 33: Relación de ciclistas por género  
Fuente: Propia

De igual forma, se los clasificó por rango de edad y si bien no se realizó encuestas para definir la edad exacta de cada ciclista, se establecen tres grupos, considerando como niños a los usuarios menores de ocho años, como jóvenes a los menores de dieciséis años y como adultos a los usuarios de dieciséis a más años. A partir de esta clasificación se obtuvo lo que se aprecia en la figura 34.

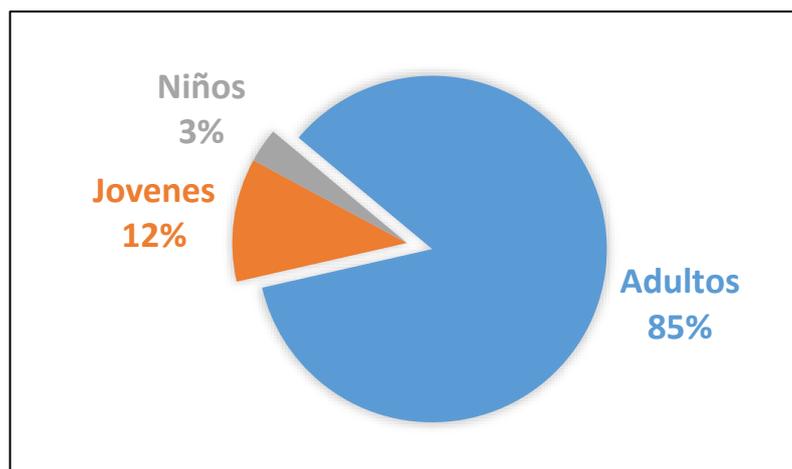


Figura 34: Relación de ciclistas por edad  
Fuente: Propia

Se observa que el 85% de los ciclistas que recorren la zona de estudio son adultos, 12% son jóvenes y el 3% son niños menores de ocho años. De la misma forma, se halló la velocidad promedio por rango de edad y se obtuvo lo mostrado en la figura 35.

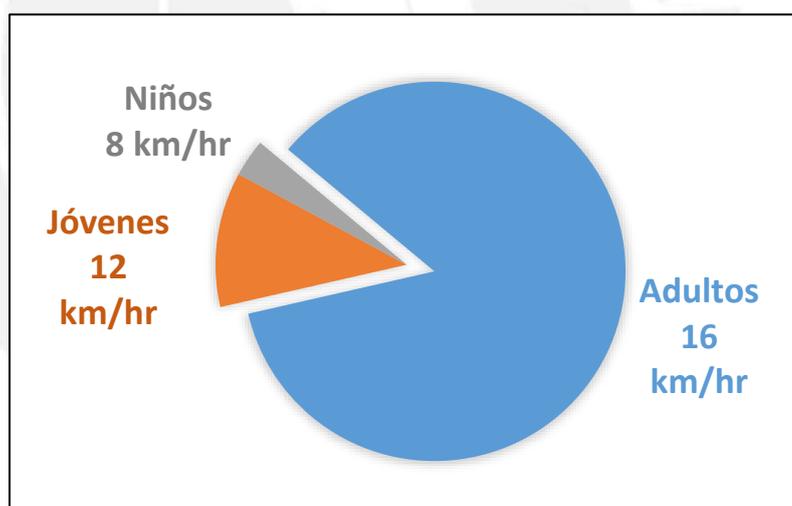


Figura 35: Velocidad promedio de ciclistas por edad  
Fuente: Propia

Como se aprecia las velocidades son mayores en los adultos. Así mismo, si se analiza la velocidad de todo el conjunto, se obtiene que la velocidad media es de casi 15 kilómetros por hora.

## 4.2. Análisis de velocidades

Para esta sección, como se menciona previamente, no se consideró la velocidad de los ciclistas denominados niños, que son los usuarios menores a ocho años. De la misma forma, no se hizo distinción por género. Una vez obtenido los tiempos de viaje y la distancia delimitada de diecisiete metros, por división se obtuvo la velocidad, dado que, para este tramo, se asume una velocidad constante. Lo obtenido se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Velocidad promedio en campo

Valor promedio	14.91	km/hr
Desviación estándar	4.31	km/hr
Valor máximo	33	km/hr
Valor mínimo	5	km/hr
n	303	

Fuente: Propia

La tabla 4 hace referencia al conjunto de valores sin distinción de género. Así mismo, se realizó la distribución de frecuencia de velocidades con un intervalo constante de 3 km/hr de amplitud, tal como se muestra en la tabla número 5.

Tabla 5: Tabla de frecuencia de velocidades

Lím. Inf.	Lím. Sup.	fi	Fi	hi	Hi	MC
5	8.1	9	9	0.030	0.030	6.6
8.1	11.1	42	51	0.139	0.168	9.6
11.1	14.1	100	151	0.330	0.498	12.6
14.1	17.1	74	225	0.244	0.743	15.6
17.1	20.1	43	268	0.142	0.884	18.6
20.1	23.1	21	289	0.069	0.954	21.6
23.1	26.1	7	296	0.023	0.977	24.6
26.1	29.1	5	301	0.017	0.993	27.6
29.1	32.1	1	302	0.003	0.997	30.6
32.1	35	1	303	0.003	1.000	33.6
TOTAL		303		1.00		

Fuente: Propia

\*Límites en kilómetros por hora

El valor mínimo de velocidad obtenido fue de 5 km/hr y el valor máximo de 33 km/hr. En la figura 36 se observa la curva de frecuencia acumulada obtenida.

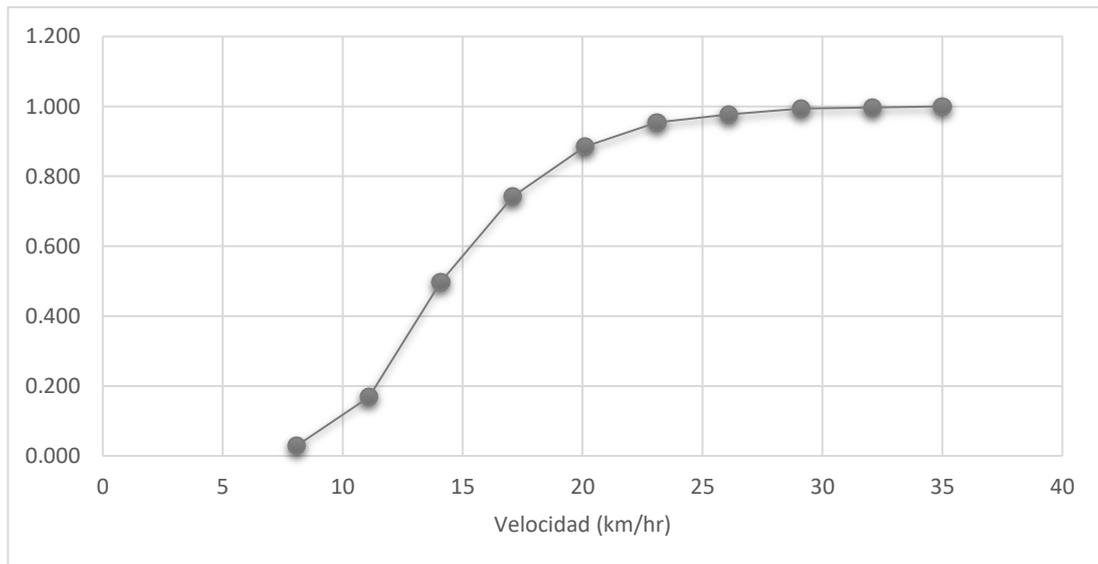


Figura 36: Frecuencia relativa acumulada de velocidad  
Fuente: Propia

Y como se observa en la figura 37, el mayor grupo de ciclistas, mayor al 50% del total, se encuentran entre las velocidades de 11.1 y 17.1 km/hr.

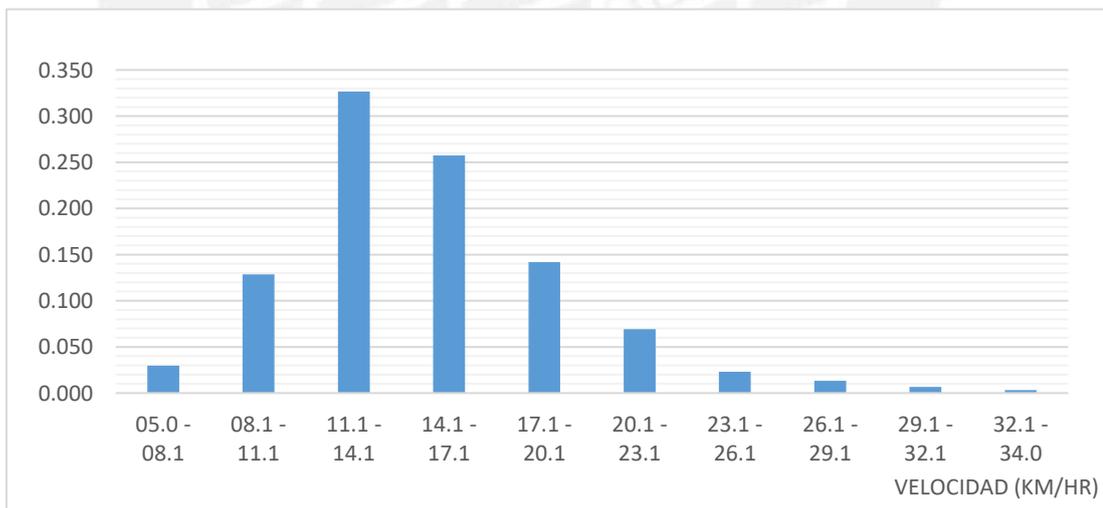


Figura 37: Histograma de velocidades  
Fuente: Propia

Como se aprecia en la figura 37, el histograma parece no seguir una distribución normal, sino más bien una distribución lognormal. A fin de comprobar si los datos recolectados están distribuidos normalmente, se realiza la prueba de bondad de ajuste.

Para un nivel de significancia del 5%, se define el valor crítico para el rechazo de la hipótesis:

*Ho: Los datos recolectados siguen una distribución normal.*

*Hn: Negación de Ho*

$$\alpha = 0.05, v = k - 1 = 6$$

$$\text{Entonces: } \chi^2_{0.05} > 12.59$$

Tabla 6: Prueba de bondad de ajuste

Observado	Esperado	O - E	(O - E) <sup>2</sup> / E	% of chisq
9	17.148	-8.148	3.871	16.18
42	39.631	2.369	0.142	0.59
100	71.762	28.238	11.111	46.43
74	81.546	-7.546	0.698	2.92
43	58.156	-15.156	3.95	16.51
21	26.023	-5.023	0.969	4.05
14	8.725	5.275	3.19	13.33
303	302.99	0.01	23.931	100

Fuente: Propia

Así mismo, en la tabla 6 se indica que el valor de Chi-cuadrado obtenido resulta 23.93, que es mayor a 12.59. En tal sentido, se dice que hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, es decir, se rechaza la presunción de que los datos siguen una distribución normal.

Finalmente, con la herramienta Minitab, se realizó una gráfica de probabilidad de velocidad lognormal con un nivel de confianza del 95%, que resultó en un p-value = 0.081 (> 0.05). Por tal razón, podría decirse que los datos recolectados siguen una distribución lognormal.

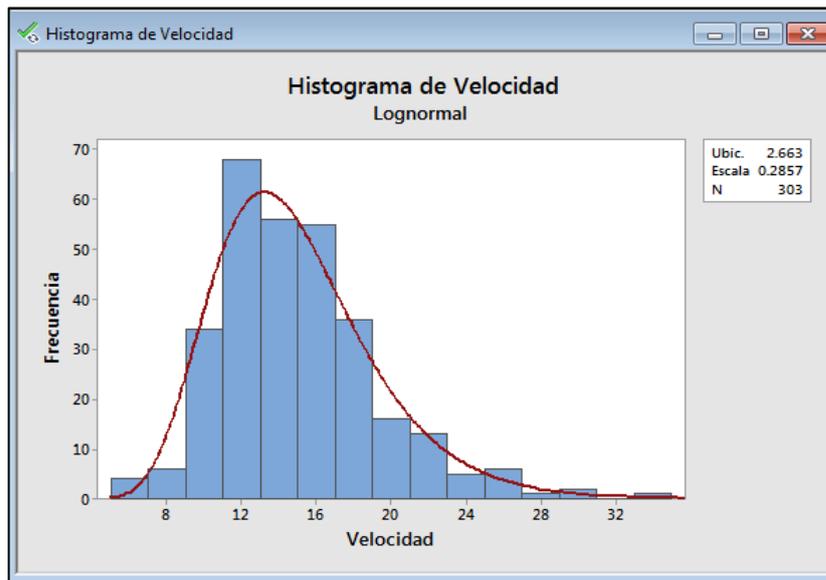


Figura 38: Histograma de velocidades con curva de distribución lognormal  
Fuente: Propia

### 4.3. Contraste de velocidades

En esta sección, se compara los resultados obtenidos del primer registro, que considera las velocidades de 303 ciclistas en la avenida Arequipa en el carril dedicado los días domingos, con los obtenidos por la empresa COWI (2012) en Copenhague, los presentados por Mereu (2015) en Ontario y lo obtenido por Jiang et al. (2013) en Beijing. La figura 39 muestra el histograma de los ciclistas de Copenhague, Ontario y lo obtenido en Lima.

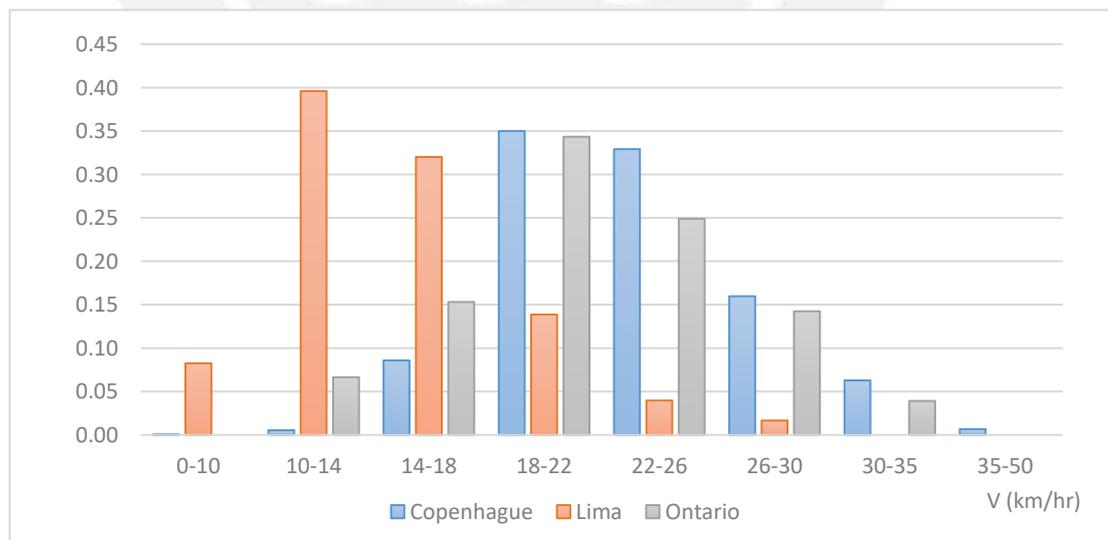


Figura 39: Histograma de velocidades de ciclistas entre Copenhague, Lima y Ontario  
Fuente: Propia

Como se aprecia, tanto en la ciudad de Copenhague como en Ontario, la mayor parte de ciclistas se trasladan a una velocidad de entre 18 y 26 km/hr. Mientras que en la ciudad de Lima, la mayor parte de ciclistas se ubica entre 10 y 18 km/hr. A través de la figura 40 se observa la comparación de las curvas de frecuencia acumulada de velocidades.

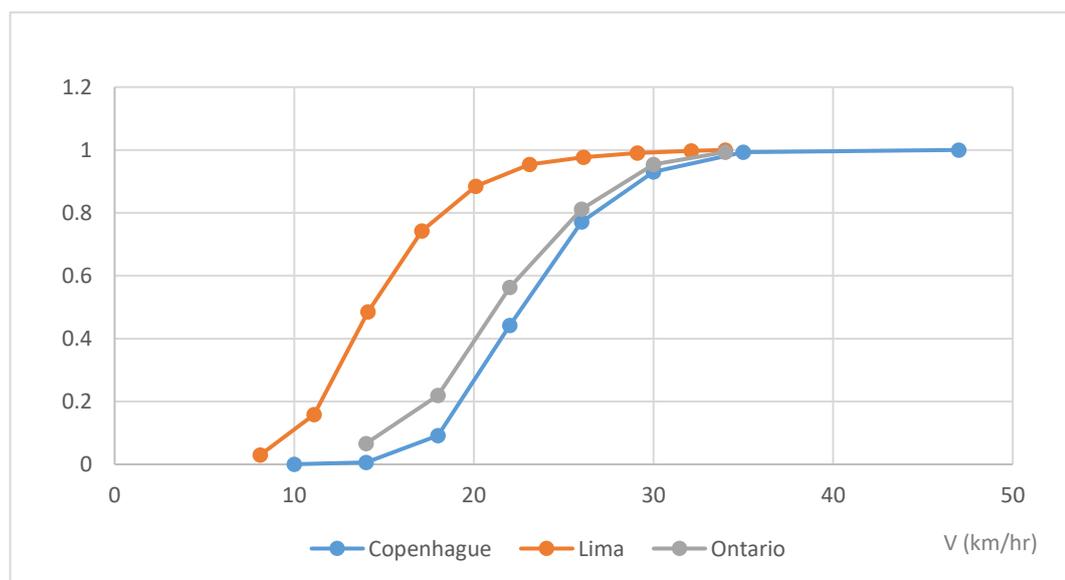


Figura 40: Diagrama de frecuencia acumulada de velocidad bajo condiciones normales en Copenhague, Ontario y Lima  
Fuente: Propia

Se observa que existe una alta similitud entre los datos obtenidos en Ontario y Copenhague, mientras que si se compara con lo obtenido en Lima, se observa diferencias significativas. Lo obtenido en Lima es, en promedio, 8km/hr menor con respecto a las velocidades en las otras ciudades. Esto nos muestra que la velocidad recolectada en este carril dedicado, es menor que los obtenidos en otras ciudades. Y aunque una posibilidad es que los ciclistas en otras ciudades, por la experiencia y por tener vías dedicadas, pueden haber alcanzado una velocidad de circulación mayor a la del promedio, la razón más probable radica en el propósito del viaje.

De la misma forma, se realizó la misma comparación de velocidades pero esta vez con ciclistas que utilizan bicicletas de carga en Copenhague, conocidos también como *cargobike*, y el resultado se muestra en la figura 41.

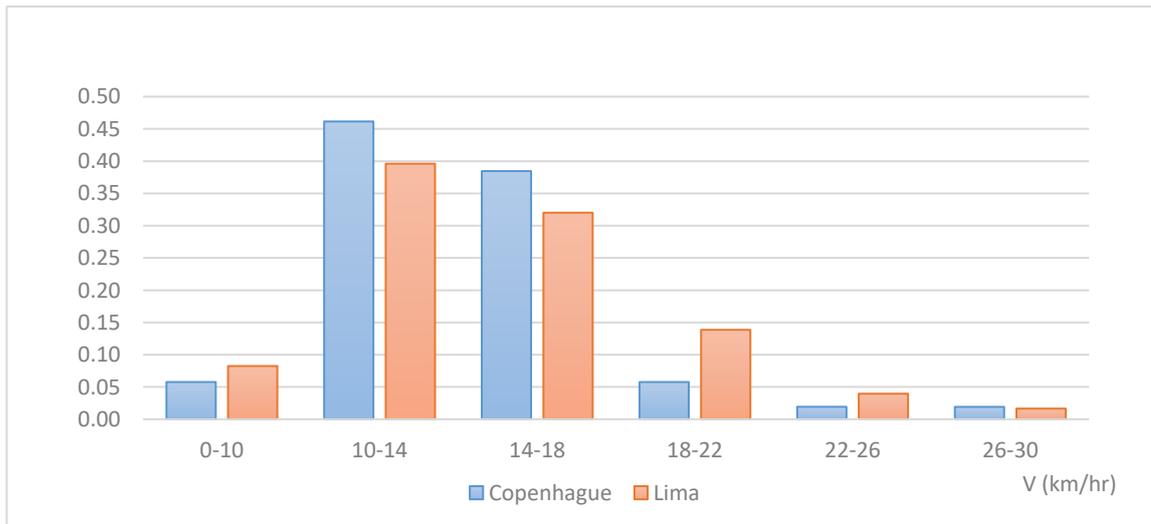


Figura 41: Histograma de velocidades entre cargobike en Copenhague y ciclistas normales en Lima  
Fuente: Propia

Y como se observa, la relación entre la distribución de ciclistas respecto a su velocidad resulta muy similar. De la misma forma se aprecia en la figura 42 la comparación del diagrama de frecuencia acumulada.

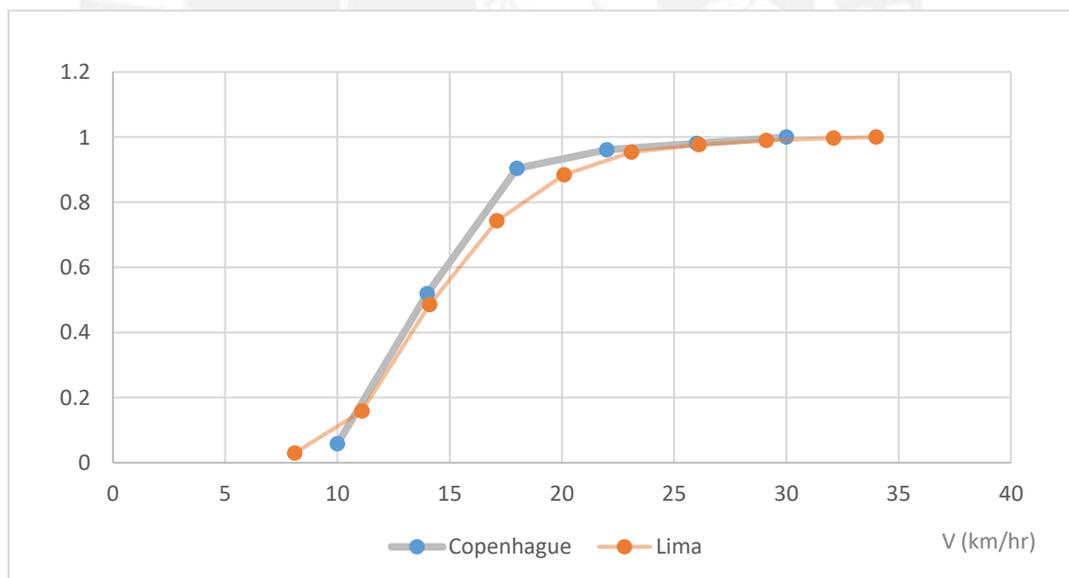


Figura 42: Diagrama de frecuencia acumulada de velocidad entre cargobike en Copenhague y ciclistas normales en Lima  
Fuente: Propia

Se observa en el diagrama que existe una gran semejanza en las curvas. Más adelante se plantea algunas posibles explicaciones de esta similitud.

Así mismo, se comparó también con los resultados del estudio de Jiang et al. (2013) en Beijing. En la figura 43 se realiza la comparación, pero esta vez, utilizando los resultados de los ciclistas con *cargobike* en Copenhague.

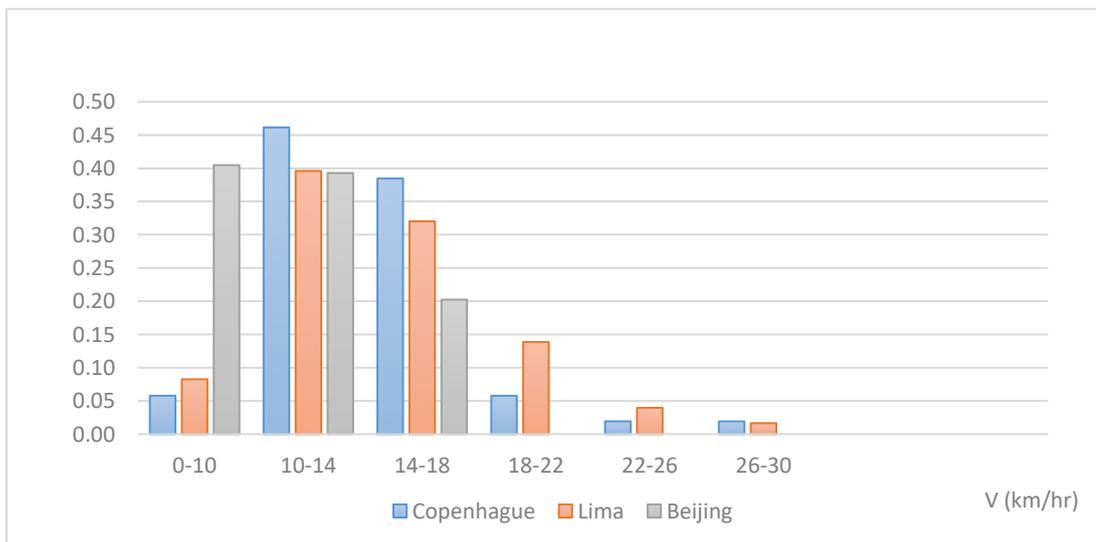


Figura 43: Histograma de velocidad de ciclistas con *cargobike* en Copenhague y ciclistas normales en Lima y Beijing  
Fuente: Propio

Nuevamente, se observa que existe una gran similitud entre los resultados. Esto señalaría que la velocidad no necesariamente resulta menor o más lenta que en otras ciudades, sino que existen diferentes variables, como el propósito del viaje o la interacción con otros modos de transporte, que afectan el resultado.

Por ejemplo, la velocidad que se tiene un lunes por la mañana con dirección al trabajo, es distinta a la velocidad que se tiene un fin de semana circulando en un parque. De la misma forma, las velocidades recolectadas por COWI (2012) durante diferentes días, reflejan en su mayoría desplazamientos a centros laborales o centros de estudio que resulta en velocidades mayores, mientras que lo recolectado en la avenida Arequipa, son velocidades de usuarios que no tienen como propósito llegar a un determinado lugar, sino que al contrario, utilizan el espacio para realizar actividad física, pasar el tiempo en compañía y disfrutar el viaje, por tal razón, cuando se comparó con ambas velocidades, éstas últimas resultaban menores, y es por esta misma razón, que se asemejan más a la velocidades de las *cargobike* en Copenhague.

# CAPÍTULO 5: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO EN VISSIM 8.0

## 5.1. Resultados obtenidos del proceso de calibración y validación

En esta sección se muestran los resultados del proceso de calibración y validación. En otras palabras, se compara los datos recolectados en campo con los obtenidos del proceso de simulación usando los modelos de Wiedemann 74 y Wiedemann 99, tanto para los valores por defecto como los propuestos por COWI. La primera comparación se realiza hasta que el valor promedio de los resultados de tiempo de viaje de la simulación se encuentre en el rango de +/- 1% respecto al tiempo medido en campo de 4.45 segundos, es decir, entre 4.40 y 4.50 segundos. Si el valor resultante de la simulación se encuentra dentro del rango, se procede a realizar la evaluación por permutaciones denominada *randomization test*, utilizando la herramienta virtual StatKey.

**Wiedemann 74:** Como primer paso y en sentido de encontrar respuesta a la hipótesis planteada, se simuló el sistema para 500 ciclistas por hora considerando los valores por defecto del sistema y utilizando el modelo de Wiedemann 74, que contiene como parámetros los valores mostrados en la figura 44. Los resultados se muestran en la tabla 7.

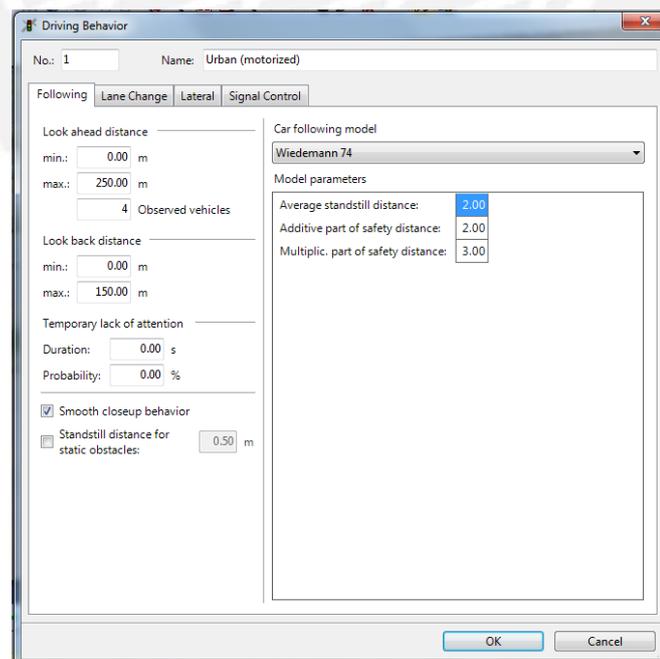


Figura 44: Valores por defecto del software Vissim 8  
Fuente: Propia

Tabla 7: Resultado de asumir los valores por defecto del software Vissim

	CAMPO	SIMULACION
VALOR PROMEDIO	4.45	4.70
DESVIACION ESTANDAR	1.369	0.060
VALOR MINIMO	1.83	4.58
VALOR MAXIMO	11.67	4.82

Fuente: Propia  
\*Tiempo de viaje en segundos

Como se aprecia en la tabla, existe una diferencia mayor al 5% entre el valor medio obtenido en campo y los resultados de la simulación. Esto debido a que los valores por defecto se adecúan más a representar el comportamiento de los vehículos y solo intentan replicar el comportamiento de los ciclistas.

**Wiedemann 99:** Así mismo, la versión 8.0 de Vissim, cuenta con un *driving behavior* especial denominado “cycle-track”, Este comportamiento considera el modelo vehicular Wiedemann 99 y asumen los valores mostrados en la figura 47. Al aplicar este comportamiento vehicular, se obtiene los resultados de la tabla 8.

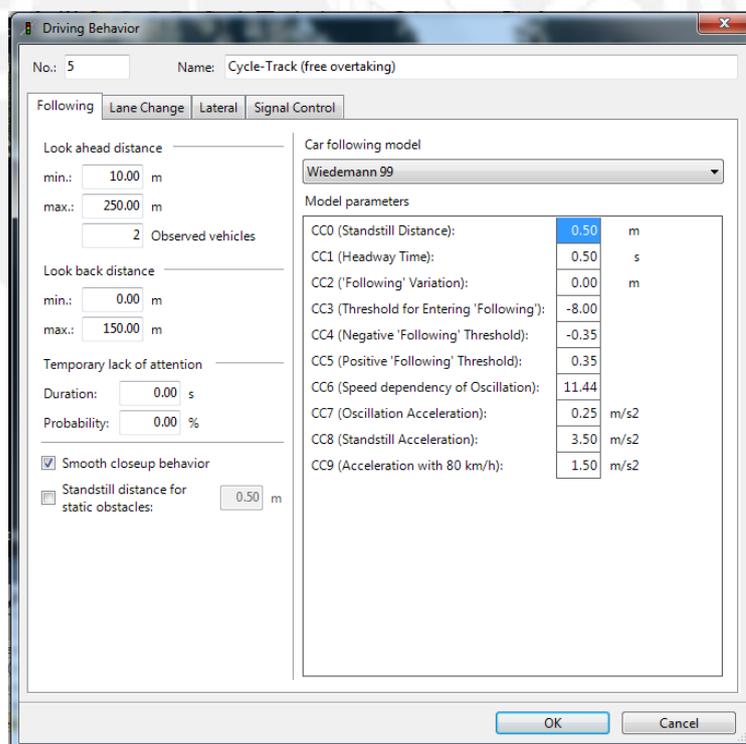


Figura 45: Valores por defecto del software Vissim 8  
Fuente: Propia

Tabla 8: Resultado de asumir los valores por defecto del software

	CAMPO	SIMULACION
VALOR PROMEDIO	4.45	4.66
DESVIACION ESTANDAR	1.37	0.055
VALOR MINIMO	1.83	4.55
VALOR MAXIMO	11.67	4.76

Fuente: Propia  
 \*Tiempo de viaje en segundos

Como se muestra, el valor promedio obtenido de la simulación es 4.6% mayor al valor de campo. No obstante, si bien puede existir una similitud estadística, no necesariamente esta representa la realidad y lo que se observa, en este caso, es que los ciclistas tienen un comportamiento diferente al que se busca simular, especialmente porque tienden a distribuirse a la derecha del carril y porque el tipo de adelantamiento que realizan es forzado.

**Valores obtenidos por la empresa COWI sin movimiento lateral:** Así también, se realizó otra simulación con los valores obtenidos por la empresa COWI (2012), que son los mostrados en la figura 46, pero, sin activar la función de movimiento lateral. Los resultados se muestran en la tabla 9

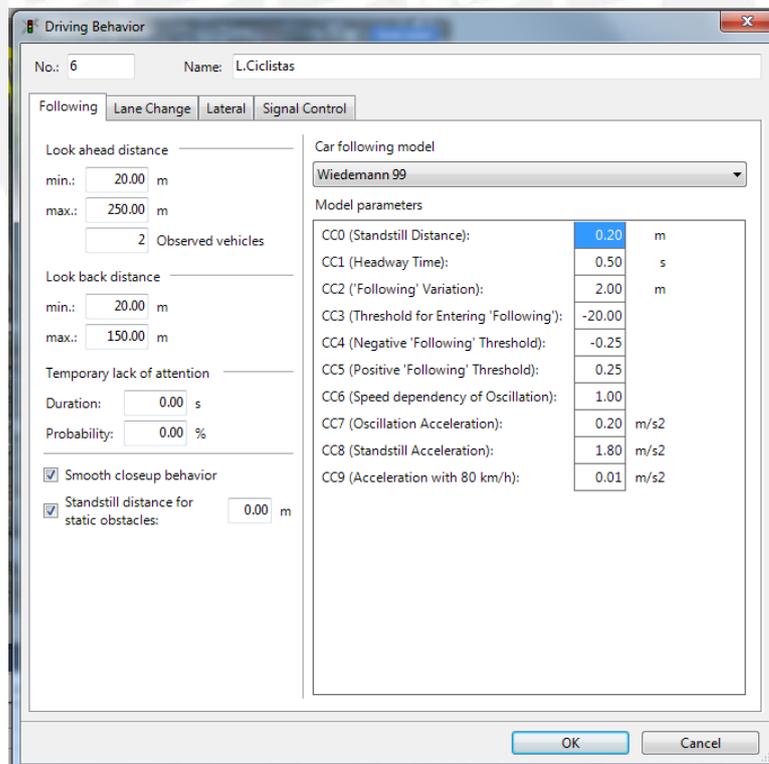


Figura 46: Valores obtenidos por la empresa COWI  
 Fuente: COWI, (2012)

Tabla 9: Resultado de asumir los valores de COWI sin considerar keep lateral distance

	CAMPO	SIMULACION
VALOR PROMEDIO	4.45	4.502
DESVIACION ESTANDAR	1.369	0.046
VALOR MINIMO	1.83	4.41
VALOR MAXIMO	11.67	4.58

Fuente: Propia

\*Tiempo de viaje en segundos

Nuevamente se observa que los valores obtenidos por COWI (2012), permiten obtener resultados que, comparados en su valor promedio, muestran una gran semejanza con el promedio de los valores de campo.

**Valores obtenidos por la empresa COWI con movimiento lateral:** De la misma forma, parte del proyecto consiste en evaluar el efecto que tiene el movimiento lateral a la hora de representar ciclistas, en tal sentido, se evaluaron los parámetros mostrados en la figura 47, que previamente ya fueron descritos en el capítulo anterior.

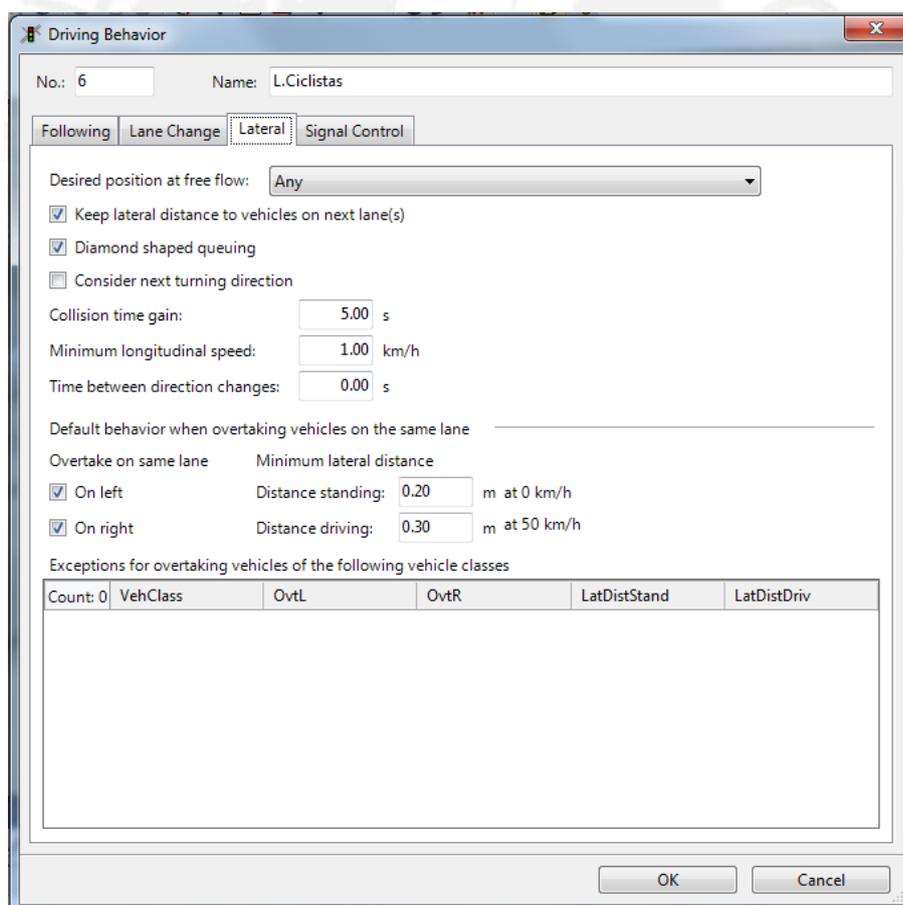


Figura 47: Ventana de configuración del movimiento lateral

Fuente: Propia

La posición deseada en flujo libre, en este caso, se asume con valor de “any”, puesto que, a diferencia de otras condiciones, los ciclistas en la zona de estudio no se rigen a una determinada reglamentación que les indique en qué lado deben permanecer.

Se activa la casilla de mantener una distancia lateral hacia otros vehículos, debido a que, los carriles son lo suficientemente anchos para que los ciclistas comparten el carril la mayor parte del tiempo. Activar esta casilla habilita la casilla de “*minimum lateral distance*”. Por otro lado, no se ha considerado “*next turning direction*”.

El valor de “*collision time gain*”, como ya se mencionó previamente, hace referencia al tiempo en que vale la pena hacer un cambio de carril, es decir, el tiempo que se ahorra un usuario para que valga la pena hacer el movimiento lateral. Se ha evaluado con diferentes valores y mientras más pequeño sea este valor, los ciclistas realizan más movimientos laterales. Para representar el comportamiento en la zona de estudio, se evalúa con diferentes valores hasta observar un comportamiento similar. Cabe destacar que este valor influye de forma muy significativa en el parámetro de calibración tiempo de viaje, a menor valor considerado, los ciclistas realizan más movimientos laterales y alcanzan más espacios de flujo libre y, por lo tanto, mayor velocidad.

El valor asumido en “*minimum longitudinal speed*” se considera en un kilómetro por hora. Este valor se asume por defecto en el software, y en este caso, hace referencia a la velocidad mínima con que se puede realizar un movimiento lateral. Para este proyecto, como se apreció en secciones anteriores, la velocidad media no es muy alta, de forma que si desea fomentar que en el modelo se realicen más movimientos laterales se considera un menor valor.

Para el parámetro de “*time between direction changes*”, se ha considerado un valor de cero. Este valor dependerá en gran medida de la velocidad que tenga el ciclista. Sin embargo, durante la recolección de datos, no se observó cambios repentinos de dirección en los ciclistas, por tal razón, se decidió dejar el valor por defecto.

Respecto al parámetro “*overtake on same lane*”, para este proyecto no existe limitaciones a que el adelantamiento solo pueda hacerse por un determinado lado, por

tal razón, se considera permitido en ambos lados. Por lo que este factor también tiene una gran relevancia en el rendimiento del sistema. Así mismo, por las evaluaciones durante la calibración, se observa que existe una gran variación al considerar si el adelantamiento es permitido por ambos lados o solo por uno.

Finalmente, “*mínimum lateral distance*” permite la posibilidad de analizar dos situaciones distintas, la primera es la distancia mínima entre ciclistas a una velocidad menor a 50 kilómetros por hora y la otra a una velocidad mayor a 50 kilómetros por hora. Como se mencionó en la sección anterior, los ciclistas en esta zona de estudio tienen un promedio de 15 kilómetros por hora, de forma que el segundo valor no afecta al rendimiento del sistema. En este proyecto se observó que la distancia mínima entre usuarios fue de aproximadamente veinte centímetros. Así mismo, se hizo ensayos con distancias menores como diez centímetros y mayores como treinta centímetros, y no se observó cambios significativos en el tiempo de viaje. No obstante, si a este valor se le asigna una distancia mayor como el valor de un metro, si representa un cambio importante en el rendimiento del sistema. Como se observa en la figura 49, se asumió un valor extremo, de dos metros, para dar un ejemplo de su efecto en la simulación.



Figura 48: Fotografía del efecto distancia lateral mínima  
Fuente: Propia

Por último, se hizo la simulación considerando los valores asumidos por la empresa COWI para el modelo de Wiedemann 99 y también considerando los valores de movimiento lateral mencionados previamente. El resultado se muestra en la tabla 10.

Tabla 10: Resultado de asumir los valores presentados por COWI

	CAMPO	SIMULACION
VALOR PROMEDIO	4.45	4.50
DESVIACION ESTANDAR	1.369	0.046
VALOR MINIMO	1.83	4.41
VALOR MAXIMO	11.67	4.58

Fuente: Propia  
 \*Tiempo de viaje en segundos

Como se aprecia, los valores obtenidos del proceso de simulación son muy cercanos a los obtenidos en el campo, con una diferencia menor al 1%, en tal sentido, se procedió a utilizar la herramienta virtual STATKEY, se realizó la prueba *randomization test* de diferencia de medias para verificar que la calibración sea correcta, la evaluación se realizó 10 000 permutaciones y se obtuvo como resultado lo mostrado en la figura 49.

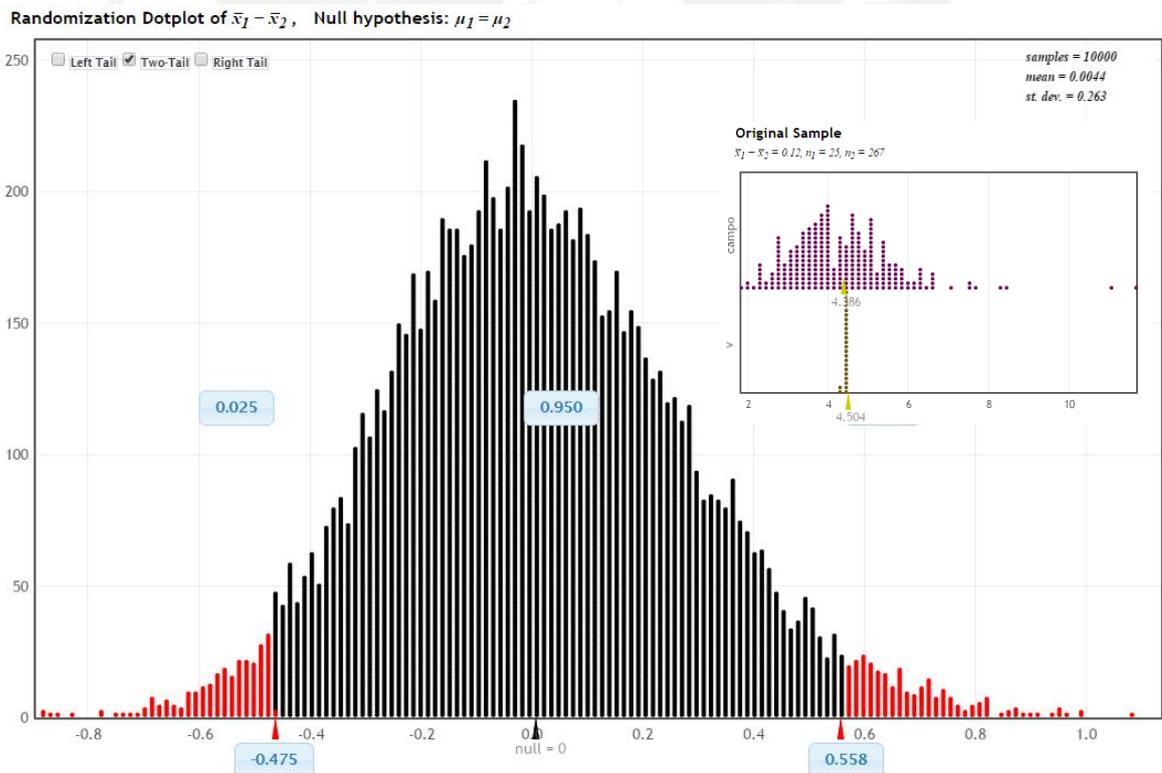


Figura 49: Randomization Dotplot del proceso de calibración  
 Fuente: Propio

Como se puede observar, la diferencia de medias es de 0.12 y cae dentro del intervalo de confianza asumido en 95%, por lo tanto, se puede señalar que con estos valores, no hay evidencia que niegue que el grupo de datos ingresados sean diferentes, por lo tanto, puede decirse que el sistema ya está calibrado, estadísticamente, por tiempo de viaje. No obstante, es necesario verificar en todo momento que la simulación en video represente de la mejor forma la realidad. Como se mencionó previamente, puede suceder que exista similitud estadística, pero al momento de evaluar el video, este no represente la realidad.

El siguiente paso es verificar con una nueva colección de datos, a este proceso se le denomina validación y como también se mencionó previamente, representa un paso fundamental en el proceso de simulación. Así mismo, se utiliza la herramienta virtual STATKEY, se realizó la prueba *randomization hypothesis* de diferencia de medias para verificar que la validación sea correcta, además, se realizó con 10 000 permutaciones como se muestra en la figura 50 y el resultado se muestra en la tabla 11.

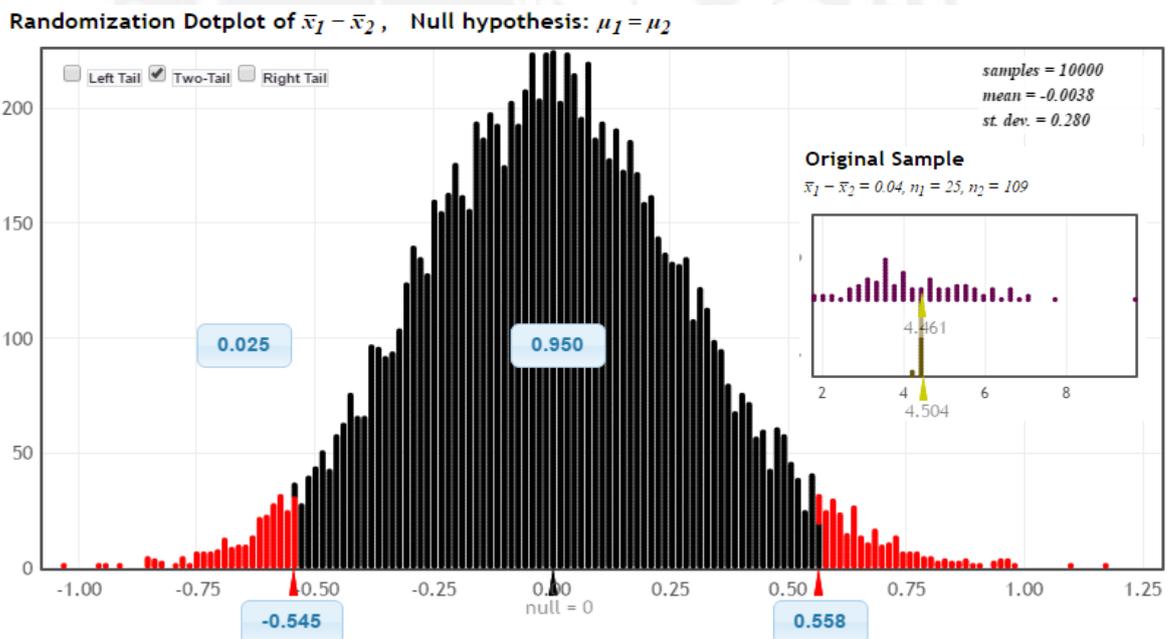


Figura 50: Randomization Dotplot del proceso de validación  
Fuente: Propia

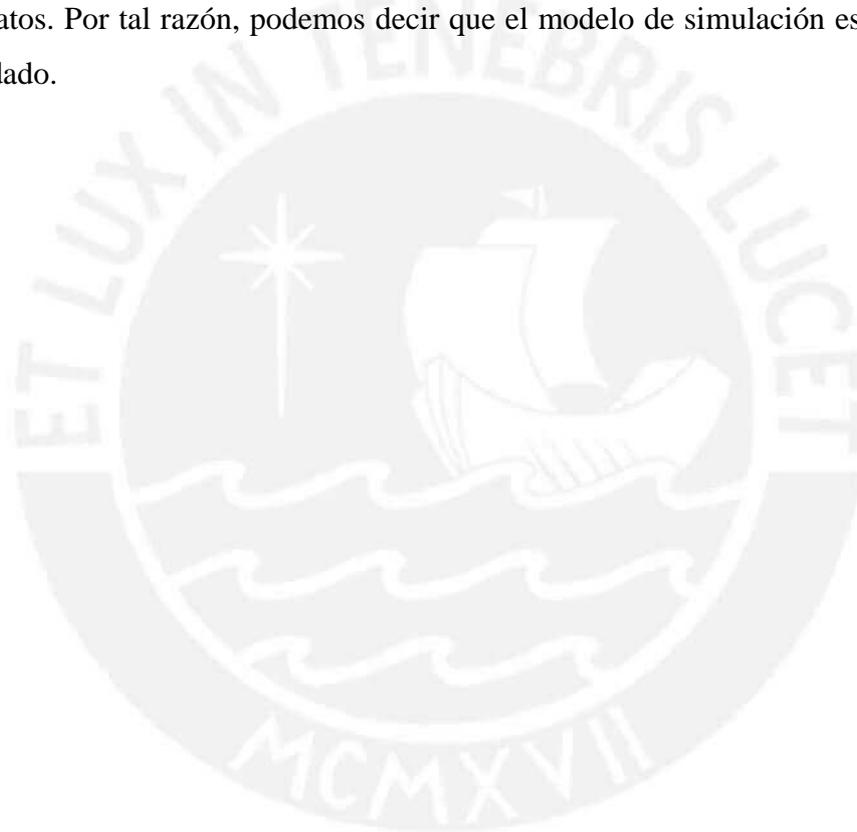
Tabla 11: Comparación de resultados durante la validación

	CAMPO	SIMULACION
VALOR PROMEDIO	4.46	4.50
DESVIACION ESTANDAR	1.410	0.046
VALOR MINIMO	1.80	4.41
VALOR MAXIMO	9.70	4.58

Fuente: Propia

\*Tiempo de viaje en segundos

Finalmente, la diferencia de medias en este caso, resulta aún menor (0.04), y este valor se encuentra dentro del intervalo de confianza asumido en un 95%, lo que significa que no existe evidencia que niegue la hipótesis que existe similitud entre ambos grupos de datos. Por tal razón, podemos decir que el modelo de simulación está calibrado y validado.



## CAPÍTULO 6: EVALUANDO LAS CONFIGURACIONES INTERNAS DE VISSIM 8.0

Durante la creación de los modelos, es usual enfocar los esfuerzos en configurar los parámetros del comportamiento vehicular o, si se trata de peatones, el comportamiento peatonal. También se realizan esfuerzos en representar correctamente los enlaces, las rutas y la verificación de errores. Sin embargo, no se le da mucha importancia al efecto que pueden tener las configuraciones internas y los algoritmos propios del software. En este capítulo se evalúa los efectos que resultan al variar (i) el nivel de detalle (en intervalos) de la curva asignada al *desired speed distribution*, (ii) el efecto del *driving behaviour* asignado, (iii) el número de actualizaciones por segundo y (iv) el número semilla, y todo dentro del marco de los ciclistas y las consideraciones mencionadas en la sección de alcances. Adicionalmente, se compara la aceleración de los ciclistas que tiene por defecto el software contra los obtenidos por COWI (2012) y finalmente, el efecto de los carriles en el software, que originalmente fueron planteados para automóviles, pero que en este proyecto se intenta adaptarlos para ciclistas.

### 6.1. Análisis del efecto de la aceleración deseada

Para esta evaluación se comparó dos tipos de ciclistas. El primero, denominado “Bike” tiene asignado la aceleración por defecto del software, mientras que el segundo tiene los valores obtenidos por COWI (2012). Se cambió los atributos de aceleración y desaceleración deseada; y se evaluó con diferentes volúmenes de ciclistas. Para la evaluación se consideró el seguimiento vehicular predeterminado “Cycle Track” y un *Desired Speed Distribution* de 8 intervalos. Cabe resaltar que cada valor promedio de tiempo de viaje consta de 30 simulaciones, que representa un total de 600 simulaciones para este análisis. Los resultados se muestran en la tabla 12.

Tabla 12: Tiempo de viaje al variar la aceleración deseada

Volumen (ciclistas/hr)	Bike (defecto)	COWI (2012)
5000	4.790	4.928
4500	4.758	4.853
4000	4.727	4.800
3500	4.706	4.750
3000	4.684	4.718
2500	4.670	4.689
2000	4.663	4.674
1500	4.658	4.664
1000	4.657	4.660
500	4.665	4.666

Fuente: Propia  
\*Tiempo de viaje en segundos

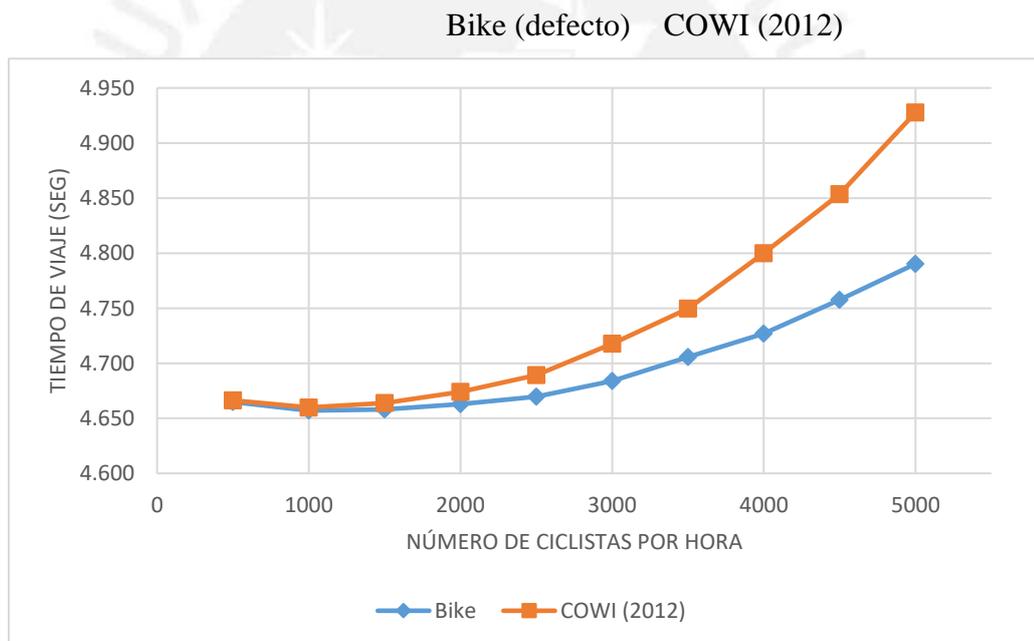


Figura 51: Gráfica del efecto de la aceleración de COWI (2012) versus la establecida por defecto en "Bike"

Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura 51, para el volumen evaluado en campo de 500 ciclistas, es posible decir que no existiría diferencia en considerar la aceleración por defecto o la obtenida por COWI (2012); sin embargo, para cantidades mayores si existiría diferencia, sobre todo si en el modelo existe un alto nivel de interacción con otros peatones, ciclistas u otros modos de transporte.

## 6.2. Análisis del efecto por tipo de carril

Investigaciones paralelas a esta en Ing. Civil (PUCP) buscan representar el comportamiento de otro tipo de usuarios en los modelos, como son los patinadores en Lima, mototaxis en los alrededores de la ciudad y triciclos en Puno. Sin embargo, es necesario considerar que las bases del software pretendían representar el comportamiento de automóviles y las adaptaciones que se pretenden dar a los nuevos modos, mencionados previamente, son adecuaciones a los espacios para vehículos. En esta sección, se evalúa si existe un efecto en los resultados si se considera un carril dedicado de 6.3 m. de ancho o dos carriles de 3.15 m. de ancho. En la tabla 13 se muestra, en resumen, el tiempo de viaje obtenido para cada volumen considerado, y se compara el resultado de utilizar un carril contra dos carriles.

Tabla 13: Tiempo de viaje respecto al número de carriles

Volumen (ciclistas/hr)	500	1000	2000	3000	4000	5000
1 carril	4.488	4.496	4.579	4.727	4.932	5.046
2 carriles	4.498	4.526	4.656	4.828	5.040	5.265
p-value	0.41600	0.01440	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

Fuente: Propia

\*Tiempo de viaje en segundos

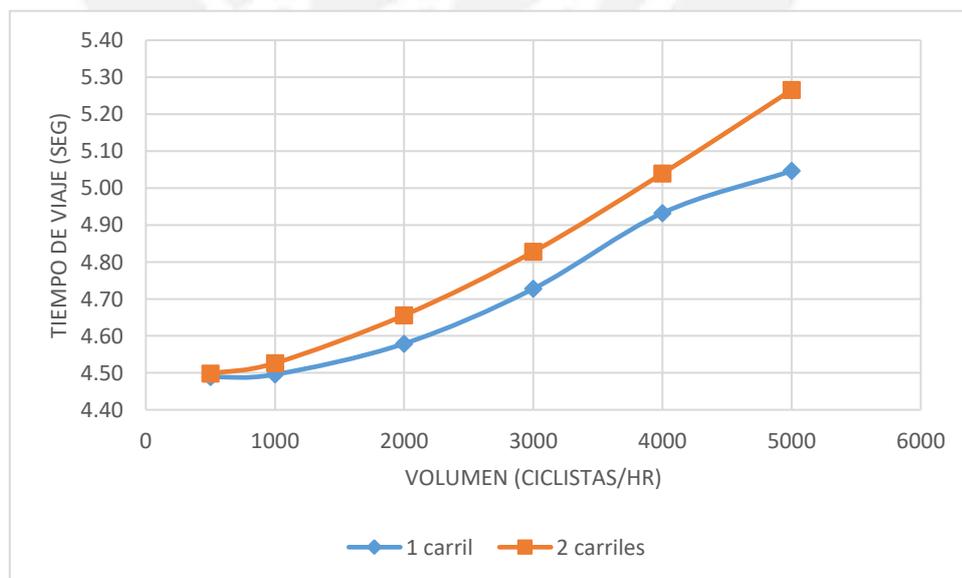


Figura 52: Gráfica de tiempo de viaje al considerar 1 o 2 carriles

Fuente: Propia

Como se aprecia en la tabla 13, para valores mayores a 1000 ciclistas, el tiempo de viaje varía entre un modelo u otro. A través de la herramienta virtual StatKey se realizó el *randomization test* con 10 000 permutaciones y con la hipótesis nula de medias iguales se obtuvo el p-value mostrado, que evidencia que no es lo mismo considerar 2 carriles de 3.15 m, contra un único carril de 6.3 m. de ancho. Este resultado pretende señalar que existirían condiciones y configuraciones propias del software que alteran los resultados, elementos tan sencillos como elegir entre un carril ancho o dos angostos, pueden afectar significativamente los resultados del proyecto. No obstante, es importante señalar que también se observó que cada carril tiene una capacidad máxima de usuarios, para este proyecto, el valor es de aproximadamente 5000 ciclistas por hora. Volúmenes mayores a este ya no representan cambios en los resultados el tiempo de viaje, probablemente por una limitación del software a la capacidad de cada carril.

### 6.3. Análisis del efecto del número de intervalos considerados en la distribución de velocidad deseada

Existen diferentes métodos para determinar el número de clases que debe tener una tabla de frecuencias, como la tabla de Ryan o la regla de Sturges. No obstante, a pesar que al graficar las curvas éstas muestran una distribución muy similar, al comparar los resultados de tiempo de viaje, se aprecia que existe una diferencia considerable entre considerar 6, 7, 8 o 10 intervalos. Esta curva de frecuencia acumulada es luego asignada al parámetro de *desired speed distribution* de Vissim. Las tablas analizadas se muestran a continuación.

Tabla 14: Tabla de frecuencia acumulada de 6 intervalos

Intervalo = 5 km/hr						
Lim. Inf.	Lim. Sup.	fi	Fi	hi	Hi	MC
4	9.1	13	13	0.04	0.04	6.55
9.1	14.1	138	151	0.46	0.5	11.6
14.1	19.1	108	259	0.36	0.85	16.6
19.1	24.1	33	292	0.11	0.96	21.6
24.1	29.1	9	301	0.03	0.99	26.6
29.1	34	2	303	0.01	1	31.55
	TOTAL	303		1		

Fuente: Propia

Tabla 15: Tabla de frecuencia acumulada de 7 intervalos

Intervalo = 5 km/hr

Lim. Inf.	Lim. Sup.	fi	Fi	hi	Hi	MC
2	7.1	4	4	0.01	0.01	4.55
7.1	12.1	78	82	0.26	0.27	9.6
12.1	17.1	143	225	0.47	0.74	14.6
17.1	22.1	62	287	0.2	0.95	19.6
22.1	27.1	12	299	0.04	0.99	24.6
27.1	32.1	3	302	0.01	1	29.6
32.1	37	1	303	0	1	34.55
	TOTAL	303		1		

Fuente: Propia

Tabla 16: Tabla de frecuencia acumulada de 8 intervalos

Intervalo = 4 km/hr

Lim. Inf.	Lim. Sup.	fi	Fi	hi	Hi	MC
2	6.1	3	3	0.01	0.01	4.05
6.1	10.1	23	26	0.08	0.09	8.1
10.1	14.1	125	151	0.41	0.5	12.1
14.1	18.1	93	244	0.31	0.81	16.1
18.1	22.1	43	287	0.14	0.95	20.1
22.1	26.1	9	296	0.03	0.98	24.1
26.1	30.1	6	302	0.02	1	28.1
30.1	34	1	303	0	1	32.05
	TOTAL	303		1		

Fuente: Propia

Tabla 17: Tabla de frecuencia acumulada de 10 intervalos

Intervalo = 3 km/hr

Lim. Inf.	Lim. Sup.	fi	Fi	hi	Hi	MC
5	8.1	9	9	0.03	0.03	6.6
8.1	11.1	42	51	0.139	0.168	9.6
11.1	14.1	100	151	0.33	0.498	12.6
14.1	17.1	74	225	0.244	0.743	15.6
17.1	20.1	43	268	0.142	0.884	18.6
20.1	23.1	21	289	0.069	0.954	21.6
23.1	26.1	7	296	0.023	0.977	24.6
26.1	29.1	5	301	0.017	0.993	27.6
29.1	32.1	1	302	0.003	0.997	30.6
32.1	35	1	303	0.003	1	33.6
	TOTAL	303		1		

Fuente: Propia

Si se utiliza una herramienta estadística que dé como resultado una tabla y una curva de frecuencia acumulada a partir de un grupo de datos ingresados, es posible obtener las tablas mostradas anteriormente. Y como se muestra en la figura 53, la gráfica de curvas traslapadas es muy similar una de la otra.

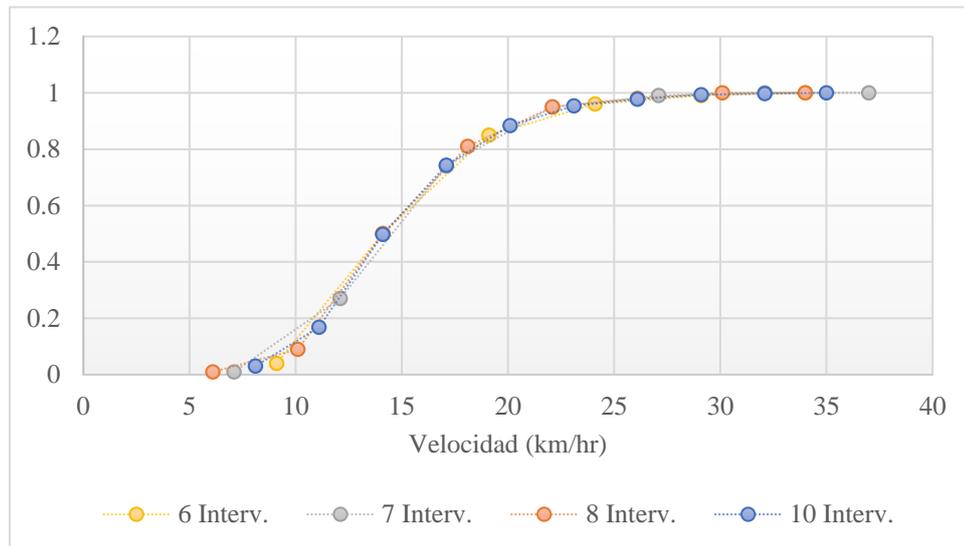


Figura 53: Curva de frecuencia acumulada de diferentes número de intervalos  
Fuente: Propia

Finalmente, se observó que si bien la tabla de 10 intervalos podría ser suficiente para representar la curva de frecuencia acumulada. Se plantea una nueva tabla, pero en este caso, se busca que la frecuencia de cada intervalo, no exceda los 50 ciclistas. Por tal motivo, se le agregó 4 intervalos intermedios de 1.5 km/hr de amplitud. La tabla obtenida se muestra a continuación. No obstante, es necesario mencionar que al asignar las curvas al parámetro de *desired speed distribution*, se estableció, en todos los casos, tanto el valor límite inferior como el valor límite superior igual para todas las tablas.

Tabla 18: Tabla de frecuencia acumulada de 14 intervalos

Intervalo = 3 km/hr

Lim. Inf.	Lim. Sup.	fi	Fi	hi	Hi	MC
5	8.1	9	9	0.03	0.03	6.55
8.1	9.6	10	19	0.033	0.063	8.85
9.6	11.1	32	51	0.106	0.168	10.35
11.1	12.6	50	101	0.165	0.333	11.85
12.6	14.1	50	151	0.165	0.498	13.35
14.1	15.6	33	184	0.109	0.607	14.85
15.6	17.1	41	225	0.135	0.743	16.35
17.1	18.6	33	258	0.109	0.851	17.85
18.6	20.1	10	268	0.033	0.884	19.35
20.1	23.1	21	289	0.069	0.954	21.6
23.1	26.1	7	296	0.023	0.977	24.6
26.1	29.1	5	301	0.017	0.993	27.6
29.1	32.1	1	302	0.003	0.997	30.6
32.1	35	1	303	0.003	1	33.55
	TOTAL	303		1		

Fuente: Propia

Y como se aprecia en la figura 54, no existen diferencias considerables entre una curva y otra, incluyendo, en este caso, a la curva de 14 intervalos.

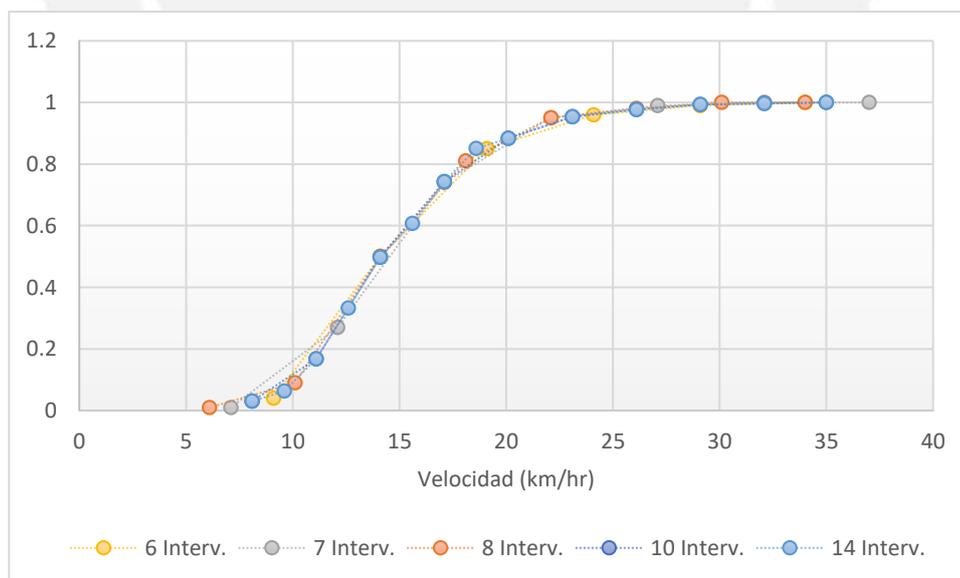


Figura 54: Curva de frecuencia acumulada que incluye la curva de 14 intervalos

Fuente: Propia

Sin embargo, como se observa en la tabla 19 y en la figura 55, para cada volumen 500, 1000, 2000 hasta 5000 ciclistas por hora, si existen diferencias en el resultado de tiempo de viaje. Puesto que el valor obtenido en campo es de 4.45 segundos, el resultado con más cercanía a este valor es el obtenido por la curva de frecuencia acumulada de 14 intervalos.

Tabla 19: Tiempo de viaje por número de intervalos utilizados y distinto volumen de ciclistas

Volumen (ciclistas/hr)	6 Interv.	7 Interv.	8 Interv.	10 Interv.	14 Interv.
500	4.532	4.607	4.593	4.527	4.498
1000	4.562	4.637	4.625	4.560	4.526
2000	4.708	4.799	4.776	4.697	4.656
3000	4.898	5.022	4.950	4.878	4.828
4000	5.120	5.313	5.205	5.103	5.040
5000	5.364	5.614	5.499	5.350	5.265

Fuente: Propia

\*Tiempo de viaje en segundos

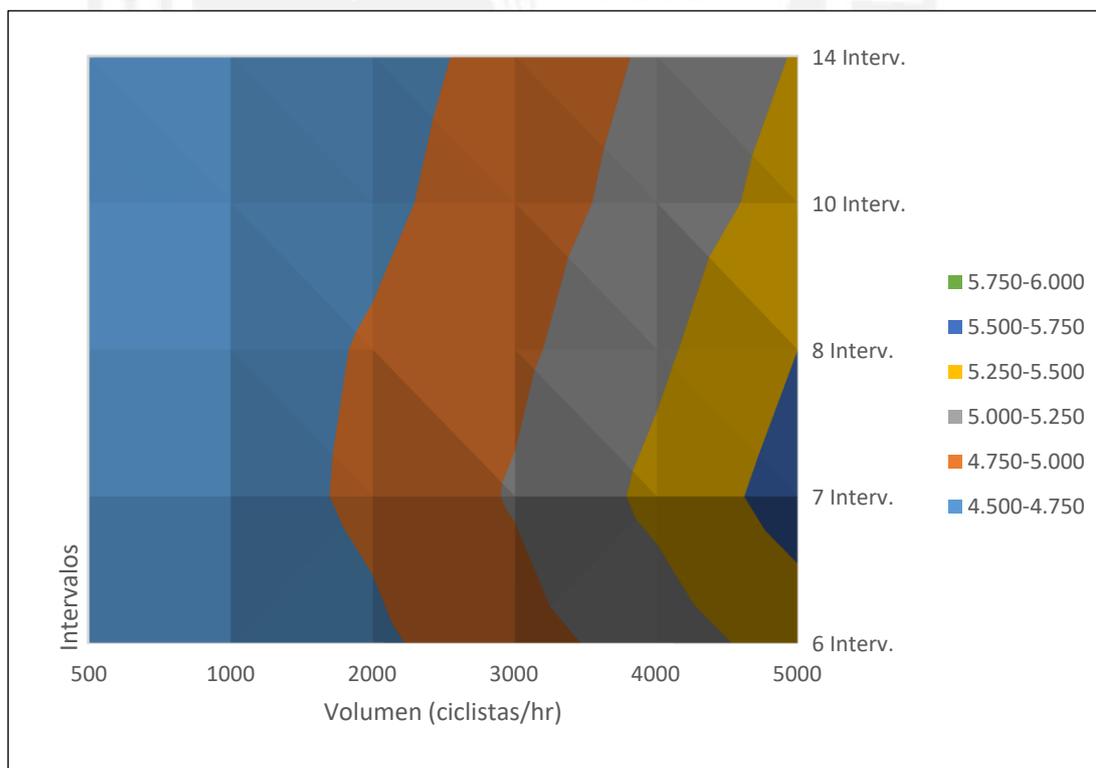


Figura 55: Superficie de resultados de tiempo de viaje en función del número de intervalos respecto a un determinado volumen de ciclistas

Fuente: Propia

Como se observa en la figura 55, para cada volumen de ciclistas, existen diferentes resultados de tiempo de viaje dependiendo el número de intervalos a considerarse en la construcción de la curva de frecuencia acumulada.

Finalmente, se realizó la evaluación ANOVA por el método de Tukey con las 30 simulaciones de cada grupo para un volumen de 500 ciclistas por hora. Se utilizó la herramienta Minitab y el resultado se muestra a continuación.

Tabla 20: Evaluación ANOVA por número de intervalos para un volumen de 500 c/hr

Método						
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales					
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente					
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$					
Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.						
Información del factor						
Factor	Niveles	Valores				
Factor	5	14 Interv., 8 Interv., 7 Interv., 6 Interv., 10 Interv.				
Análisis de Varianza						
Fuente	GL	SC	Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	4		0.2587	0.064676	23.18	0.000
Error	145		0.4045	0.002790		
Total	149		0.6632			
Resumen del modelo						
	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)		
	0.0528170	39.01%	37.33%	34.73%		
Medias						
Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%		
14 Interv.	30	4.49835	0.04863	(4.47929, 4.51741)		
8 Interv.	30	4.5932	0.0552	( 4.5742, 4.6123)		
7 Interv.	30	4.6068	0.0579	( 4.5877, 4.6258)		
6 Interv.	30	4.53186	0.05158	(4.51280, 4.55091)		
10 Interv.	30	4.52671	0.05026	(4.50765, 4.54577)		
Desv.Est. agrupada = 0.0528170						

Fuente: Propia

En la figura 56 vemos la gráfica de cajas generadas a partir de los datos de tiempo de viaje y además, al obtener un p-value menor a 0.05, entonces es posible indicar que las medias de los grupos propuestos son significativamente diferentes.

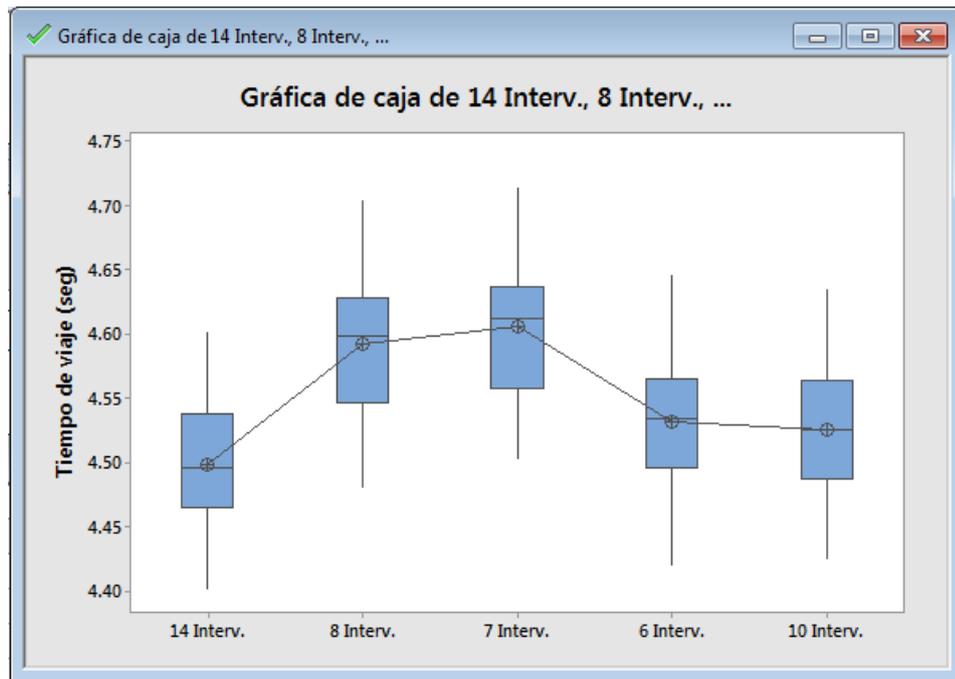


Figura 56: Comparación de medias de tiempo de viaje a través del gráfico de cajas  
Fuente: Propia  
\*Tiempo de viaje en segundos

De la misma forma, el método de Tukey muestra las diferencias individuales entre dos grupos, el resultado se muestra en la figura 57 y como se observa, solo existe similitud entre algunos intervalos.

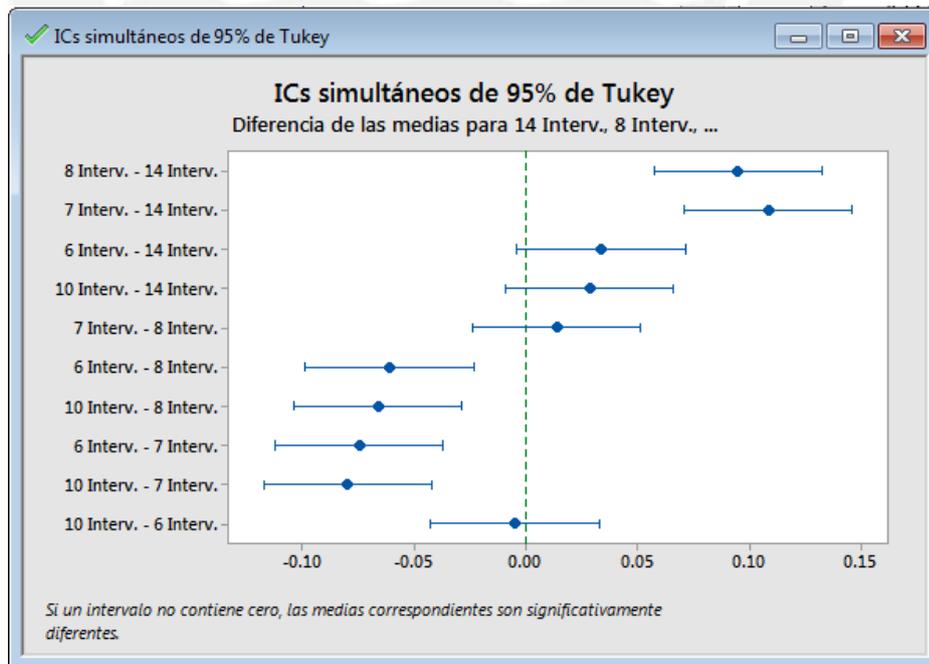


Figura 57: Diferencia gráfica de las medias de tiempo de viaje entre grupos de diferente número de intervalo  
Fuente: Propia

Finalmente, se realizó la evaluación ANOVA para 3000 y 5000 ciclistas por hora y se obtuvo como p-value un valor menor a 0.05 en ambos casos. De tal forma, podría decirse que las medias de los grupos propuestos son significativamente diferentes y que el número de intervalos si representa un factor importante en el desarrollo de los modelos de microsimulación.

#### **6.4. Análisis del efecto del comportamiento vehicular**

El software Vissim en la versión 8.0 cuenta con cinco comportamientos vehiculares predeterminados. Desde la versión inicial Urban, basado en el modelo de Wiedemann 74, hasta el comportamiento denominado Cycle-track basado en Wiedemann 99. Para modelar los ciclistas es posible utilizar ambos modelos, sin embargo, COWI (2012) menciona que el modelo de Wiedemann 99, al tener más parámetros, permite representar con mayor detalle el comportamiento de los ciclistas. Y si bien, los modelos fueron concebidos inicialmente para representar el comportamiento de los vehículos, se busca ajustar estos modelos para representar el comportamiento de los ciclistas. En este capítulo evaluamos los resultados del parámetro de calibración tiempo de viaje al utilizar ambos modelos de seguimiento vehicular.

Los comportamientos de seguimiento vehicular considerados en la evaluación son los siguientes:

El primer *driving behaviour* considerado es el obtenido por la empresa COWI (2012). El segundo es uno de los comportamientos predeterminados del software en la versión 8.0, denominado "Cycle Track". El tercero es similar al "Cycle Track" predeterminado, pero con la variación de la distancia en parada. Los dos siguientes son modificaciones al comportamiento "Urban", que utilizan el modelo de seguimiento de Wiedemann 74, pero se les ha activado la opción de adelantamiento en el mismo carril, la diferencia entre estos está en el valor de la distancia en parada. Los últimos cinco (Urban A, Urban B,..) representan los intentos de adaptar el modelo de Wiedemann 74 al comportamiento de los ciclistas. Se varían los parámetros "ax", "bxadd", "bxmult" y la distancia en parada.

Tabla 21: Valores asumidos para cada comportamiento vehicular

NOMBRE	COWI (2012)	Cycle Track	Cycle Track (modificado)	Urban (modif. A)	Urban (modif. B)	Urban A	Urban B	Urban C	Urban D	Urban E
Modelo de seguimiento vehicular	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 99	Wiedemann 74	Wiedemann 74	Wiedemann 74	Wiedemann 74	Wiedemann 74	Wiedemann 74	Wiedemann 74
ax	-	-	-	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
bx add	-	-	-	2	2	1	0.5	0.5	1	1
bx mult	-	-	-	3	3	3	3	2	3	2
cc0	0.2	0.5	0.5	-	-	-	-	-	-	-
cc1	0.5	0.5	0.5	-	-	-	-	-	-	-
cc2	2	0	0	-	-	-	-	-	-	-
cc3	-20	-8	-8	-	-	-	-	-	-	-
cc4	-0.25	-0.35	-0.35	-	-	-	-	-	-	-
cc5	0.25	0.35	0.35	-	-	-	-	-	-	-
cc6	1	11.44	11.44	-	-	-	-	-	-	-
cc7	0.2	0.25	0.25	-	-	-	-	-	-	-
cc8	1.8	3.5	3.5	-	-	-	-	-	-	-
cc9	0.01	1.5	1.5	-	-	-	-	-	-	-
Movimiento Lateral	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Distancia lateral en parada	0.20 metros	0.10 metros	0.20 metros	0.10 metros	0.20 metros	0.20 metros	0.20 metros	0.20 metros	0.10 metros	0.10 metros
Distancia lateral a más de 50 km/hr	0.75 metros	0.30 metros	0.75 metros	0.30 metros	0.75 metros	0.75 metros	0.75 metros	0.75 metros	0.30 metros	0.30 metros
Tiempo ganado para adelantar	2.0 segundos	2.0 segundos	2.0 segundos	2.0 segundos	2.0 segundos	2.0 segundos	2.0 segundos	2.0 segundos	2.0 segundos	2.0 segundos

Fuente: Propia

La evaluación se hace para 500, 1000, 2000 hasta 5000 ciclistas; no obstante, el software, en la opción estocástica, considera una cantidad menor en cada simulación. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 22: Resultados de tiempo de viaje por tipo de comportamiento vehicular para diferentes volúmenes

Volumen (ciclistas/hr)	COWI (2012)	Cycle Track	Cycle Track (modificado)	Urban (modif. A)	Urban (modif. B)
500	4.50	4.49	4.49	4.50	4.54
1000	4.53	4.48	4.51	4.54	4.65
2000	4.66	4.52	4.60	4.68	5.02
3000	4.83	4.59	4.73	4.93	6.08
4000	5.04	4.70	4.89	5.39	5.38
5000	5.27	4.82	5.08	6.13	-

Volumen (ciclistas/hr)	Urban A	Urban B	Urban C	Urban D	Urban E
500	4.53	4.53	4.53	4.50	4.50
1000	4.61	4.60	4.60	4.53	4.53
2000	4.80	4.78	4.75	4.63	4.62
3000	5.05	5.01	4.95	4.79	4.75
4000	5.43	5.33	5.21	5.02	4.96
5000	6.31	5.86	5.57	5.32	5.20

Fuente: Propia

\*Tiempo de viaje en segundos

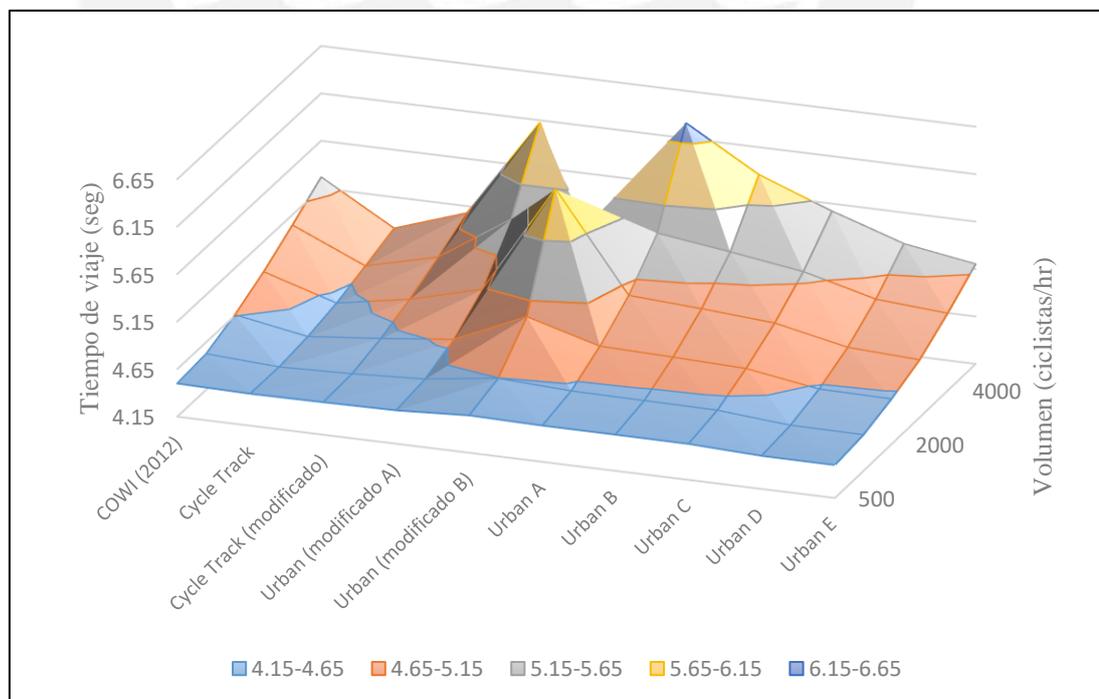


Figura 58: Superficie de resultados de tiempo de viaje por comportamiento vehicular para diferente volumen de ciclistas

Fuente: Propia

El volumen en la zona de estudio era aproximadamente de 500 ciclistas por hora. Como vemos en la tabla 21 y la figura 58, si se calibrase solo por tiempo de viaje, podría utilizarse cualquiera de los 10 modelos planteados para señalar que “estadísticamente” los resultados de la simulación se asemejan a los obtenidos en campo; no obstante, el tipo de comportamiento que realizan, en la mayoría de los casos, no representa la realidad.

Así mismo, se puede observar de la figura 59 que para la mayor parte de los modelos de seguimiento vehicular, el tiempo de viaje se incrementa proporcionalmente al volumen, excepto para Urban modificado A, Urban modificado B y Urban A, donde el incremento en el volumen genera picos en los resultados. Por otro lado, para el modelo Urban B, el sistema colapsó y no permitió el ingreso de más volumen que los 4000 ciclistas. En la figura 60 se muestra una imagen de lo producido.



Figura 59: Colpaso del sistema para volúmenes mayores de 5000 ciclistas.  
Fuente: Propia

Finalmente, a partir de los resultados anteriores, es posible señalar que si bien estadísticamente, para volúmenes bajos, los resultados de tiempo de viaje se asemejan unos a otros, no hay que olvidar que estos modelos fueron planteados originalmente para representar vehículos y que los ajuste que se realizan son adaptaciones al modelo original. Como se menciona en la sección 2.6, modelar ciclistas de forma microscópica implica mayores consideraciones que las de evaluar la distancia entre ellos o que aceleración máxima pueden alcanzar.

## 6.5. Análisis del efecto del número de actualizaciones por segundo de simulación

Una de las características de los modelos de microsimulación son el número de evaluaciones que se realiza en un determinado tiempo. En microsimulación, el valor utilizado en la mayoría de proyectos es de 10 actualizaciones por segundo. No obstante, se estima que, a más actualizaciones, se puede obtener un resultado más preciso, y como se aprecia en ésta sección, para este proyecto de ciclistas no necesariamente se cumple lo anterior.

La tabla 22 muestra, en resumen, los promedios de tiempo de viaje de 30 simulaciones con diferente volumen y con diferente *time steps per simulation second*. En este caso se evalúa desde 5 hasta 20 actualizaciones por segundo de simulación.

Tabla 23: Tiempo de viaje para diferente número de actualizaciones respecto a un determinado volumen

Volumen (ciclistas/hr)	Número de actualizaciones por segundo de simulación									
	20	18	16	15	14	12	10	8	6	5
500	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
1000	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53
2000	4.67	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66
3000	4.84	4.84	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	4.84
4000	5.06	5.06	5.04	5.04	5.03	5.05	5.04	5.04	5.05	5.06
5000	5.30	5.29	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.29

Fuente: Propia

\*Tiempo de viaje en segundos

El primer razonamiento es que a mayores actualizaciones por segundo de simulación los resultados podrían ser más precisos, pero como se muestra en la tabla 22 se observa que para este proyecto de 500 ciclistas, no existirían diferencias en el resultado, entre considerar 5 o 20 actualizaciones por segundo de simulación. Sin embargo, para volúmenes mayores a 3000 ciclistas, se observa una ligera variación. Se aprecia también que los resultados obtenidos de realizar la simulación con 5 actualizaciones por segundo, se asemejan más a los obtenidos con 20 actualizaciones que a los resultados de 10 actualizaciones.

Por otro lado, también se observa una ligera diferencia entre los resultados de 10 y 20 actualizaciones por segundo. En tal sentido, para analizar si esta diferencia es significativa, se realiza la evaluación ANOVA con la hipótesis nula de medias iguales para los resultados de tiempo de viaje de 5 hasta 20 actualizaciones por segundo. La evaluación se hace para 5000 ciclistas, que es donde se aprecia la mayor diferencia. Se utilizó la herramienta Minitab y el resultado se muestra a continuación.

Tabla 24: Evaluación ANOVA por número de actualizaciones para un volumen de 5000 c/hr

Método					
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales				
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente				
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$				
Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.					
Información del factor					
Factor	Niveles	Valores			
Factor	10	20, 18, 16, 15, 14, 12, 10, 8, 6, 5			
Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	9	0.03067	0.003408	1.00	0.440
Error	290	0.98866	0.003409		
Total	299	1.01933			
Resumen del modelo					
	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)	
	0.0583881	3.01%	0.00%	0.00%	
Medias					
Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%	
20	30	5.29606	0.04930	(5.27507, 5.31704)	
18	30	5.2858	0.0551	( 5.2648, 5.3067)	
16	30	5.2737	0.0613	( 5.2527, 5.2947)	
15	30	5.26517	0.05291	(5.24419, 5.28615)	
14	30	5.2674	0.0641	( 5.2464, 5.2884)	
12	30	5.2690	0.0556	( 5.2480, 5.2900)	
10	30	5.26539	0.04966	(5.24441, 5.28637)	
8	30	5.2702	0.0624	( 5.2492, 5.2911)	
6	30	5.2743	0.0590	( 5.2533, 5.2953)	
5	30	5.2875	0.0709	( 5.2665, 5.3085)	
Desv.Est. agrupada = 0.0583881					

Fuente: Propia

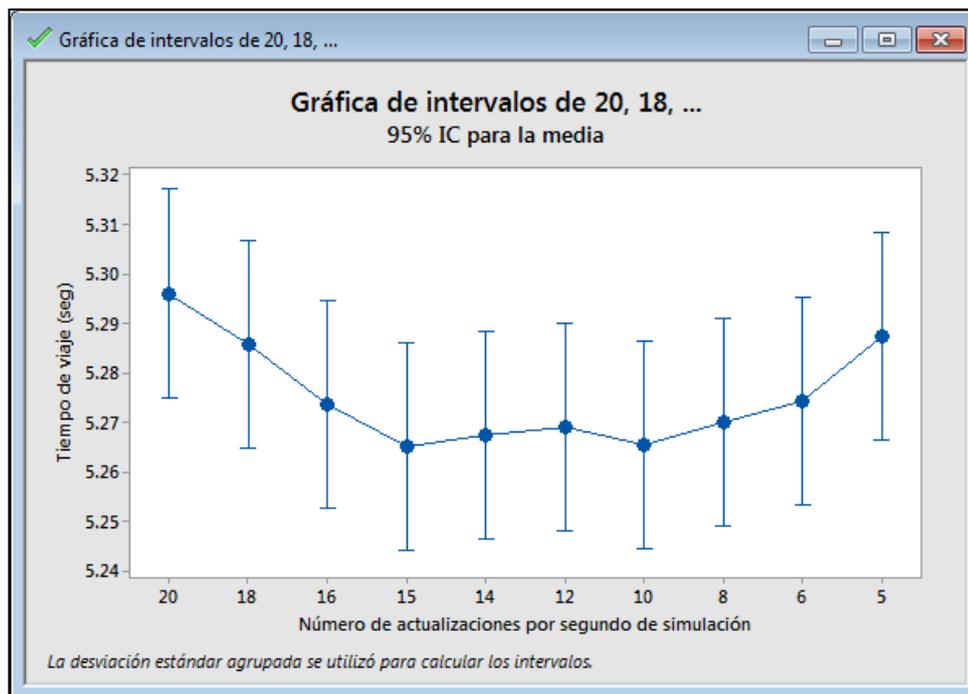


Figura 60: Gráfica de intervalos de tiempo de viaje por número de actualizaciones  
Fuente propia

Finalmente, como se observa en la figura 60 y al obtener que el p-value resulta mayor a 0.05. Esto señalaría que no existe evidencia que las medias sean diferentes. En tal sentido, podría decirse que para este modelo, y para volúmenes mayores a los 500 ciclistas, no existiría evidencia que señale diferencias entre utilizar 5 o 20 actualizaciones por segundo de simulación. No obstante, es importante recordar que esta evaluación se hace con ciclistas en una vía exclusiva y a flujo libre, y las interacciones se realizan solo con otros ciclistas y no con otros modos de transporte.

### 6.6. Análisis del efecto del número semilla

Como se mencionó previamente, una característica en los software estocásticos es el uso de algoritmos y consideraciones aleatorias en las simulaciones del sistema. En esta sección se evalúa grupos de 20 semillas de las primeras 100 y se analiza si existen diferencias considerables entre utilizar un grupo u otro. La evaluación se hizo para volúmenes de 500, 1000 hasta 5000 ciclistas.

Para las evaluaciones, cada grupo está conformado por 20 simulaciones, es decir, 20 números de semilla diferente. Las evaluaciones se realizan considerando saltos entre número de semilla de 1, 2, 3 y 5. Además, si bien es usual trabajar con un valor de error de aproximadamente el 10% del valor promedio, en este caso se considera como

valor al 1% del valor. Esto debido a que, si se considera un error del 10%, el valor mínimo de corridas resultaría menor a 1, es decir, bastaría una corrida para representar el modelo, esto sucede puesto que la desviación estándar entre los resultados es muy pequeña ( $< 0.1$  segundos). Entonces, a fin de poder comparar los grupos, se decide evaluar el valor mínimo de corridas con un error del 1% del valor promedio.

La siguiente tabla muestra el resultado de tiempo de viaje para un volumen de 500 ciclistas de las 100 primeras semillas.

Tabla 25: Tiempo de viaje para las 100 primeras semillas para un volumen de 500 ciclistas

Salto entre # semilla: 1

1	4.470	21	4.471	41	4.444	61	4.542	81	4.627
2	4.298	22	4.440	42	4.528	62	4.496	82	4.452
3	4.403	23	4.504	43	4.482	63	4.590	83	4.466
4	4.554	24	4.453	44	4.405	64	4.523	84	4.470
5	4.487	25	4.495	45	4.431	65	4.431	85	4.429
6	4.464	26	4.500	46	4.411	66	4.458	86	4.471
7	4.531	27	4.514	47	4.392	67	4.428	87	4.462
8	4.576	28	4.519	48	4.503	68	4.603	88	4.604
9	4.495	29	4.451	49	4.570	69	4.622	89	4.514
10	4.514	30	4.563	50	4.518	70	4.396	90	4.543
11	4.497	31	4.482	51	4.493	71	4.427	91	4.542
12	4.496	32	4.537	52	4.502	72	4.462	92	4.432
13	4.562	33	4.571	53	4.482	73	4.500	93	4.461
14	4.492	34	4.548	54	4.433	74	4.528	94	4.423
15	4.475	35	4.522	55	4.468	75	4.525	95	4.585
16	4.403	36	4.443	56	4.388	76	4.592	96	4.521
17	4.470	37	4.543	57	4.578	77	4.493	97	4.507
18	4.445	38	4.473	58	4.631	78	4.465	98	4.552
19	4.558	39	4.602	59	4.339	79	4.636	99	4.458
20	4.412	40	4.503	60	4.451	80	4.562	100	4.377
<i>Promedio</i>	4.480		4.507		4.473		4.514		4.495
<i>Desv. Est.</i>	0.066		0.045		0.072		0.071		0.065

Fuente: Propia

\*Tiempo de viaje en segundos

Como se observa en la tabla 23, el grupo de semillas de 21 a 40 presentan una menor desviación estándar respecto a las otras agrupaciones. De la misma forma, a partir de estos resultados, se evalúa diferentes combinaciones y se obtiene, en resumen, la tabla 24. Esto evaluado para un volumen de 500 ciclistas.

Tabla 26: Tiempo de viaje para diferentes agrupaciones de números semilla

Salto entre # semilla	Semilla	Promedio	Desv. Estan.	Número mínimo de corridas
1	01 - 20	4.480	0.066	8.35
	21 - 40	4.507	0.045	3.83
	41 - 60	4.473	0.072	9.75
	61 - 80	4.514	0.071	9.46
	81 - 100	4.495	0.065	8.12
2	02 - 40	4.482	0.066	8.21
	32 - 70	4.487	0.066	8.27
	62 - 100	4.496	0.067	8.46
	01 - 39	4.505	0.047	4.12
	31 - 69	4.501	0.076	11.07
3	61 - 99	4.512	0.070	9.24
	01 - 58	4.509	0.056	5.96
	43 - 100	4.501	0.079	11.74
	02 - 59	4.459	0.069	8.99
	41 - 98	4.476	0.070	9.35
5	03 - 60	4.491	0.055	5.71
	42 - 99	4.504	0.061	7.04
	01 - 96	4.482	0.061	6.97
	02 - 97	4.478	0.062	7.35
	03 - 98	4.520	0.063	7.44
	04 - 99	4.504	0.077	11.10
	05 - 100	4.484	0.059	6.60

Fuente: Propia

\*Tiempo de viaje en segundos

A partir de la tabla 24, podría decirse que existirían grupos de semillas que permiten obtener una desviación estándar menor respecto a otros grupos y que permiten, de cierta forma, realizar menos corridas en la simulación, es decir, calibrar y validar un modelo más rápidamente. Sin embargo, para señalar que existe evidencia de lo anterior, los mismos grupos de semillas deberían provocar un resultado similar para otros volúmenes, pero como se observa en la tabla 25, esta distribución no se repite en los mismos grupos.

Es importante mencionar que las distribuciones de los resultados para las 100 primeras semillas, con los distintos volúmenes, se asemejan a una distribución normal. La prueba se realizó utilizando el software Minitab por medio de una gráfica de probabilidad, las evaluaciones se muestran en la sección de anexos.



Tabla 27: Tiempo de viaje para diferentes agrupaciones de número semilla y volumen de ciclistas

Volumen (ciclistas/hr)		500			1000			2000		
Salto entre # semilla	Semilla	Promedio	Desv. Estan.	Número mínimo de corridas	Promedio	Desv. Estan.	Número mínimo de corridas	Promedio	Desv. Estan.	Número mínimo de corridas
1	01 - 20	4.480	0.0663	8.35	4.531	0.0260	1.28	4.661	0.0395	2.83
	21 - 40	4.507	0.0449	3.83	4.522	0.0555	5.84	4.655	0.0445	3.60
	41 - 60	4.473	0.0717	9.75	4.532	0.0427	3.46	4.678	0.0372	2.51
	61 - 80	4.514	0.0706	9.46	4.542	0.0463	4.06	4.678	0.0420	3.20
	81 - 100	4.495	0.0654	8.12	4.539	0.0596	6.74	4.689	0.0381	2.64
2	02 - 40	4.482	0.0658	8.21	4.515	0.0440	3.68	4.652	0.0438	3.48
	32 - 70	4.487	0.0660	8.27	4.527	0.0489	4.53	4.668	0.0456	3.77
	62 - 100	4.496	0.0668	8.46	4.536	0.0525	5.22	4.677	0.0396	2.84
	01 - 39	4.505	0.0466	4.12	4.538	0.0397	2.99	4.664	0.0395	2.84
	31 - 69	4.501	0.0764	11.07	4.541	0.0426	3.44	4.676	0.0347	2.18
3	61 - 99	4.512	0.0698	9.24	4.545	0.0538	5.50	4.690	0.0405	2.98
	01 - 58	4.509	0.0561	5.96	4.533	0.0445	3.75	4.652	0.0275	1.37
	43 - 100	4.501	0.0787	11.74	4.537	0.0570	6.17	4.679	0.0360	2.35
	02 - 59	4.459	0.0688	8.99	4.523	0.0352	2.35	4.668	0.0392	2.79
	41 - 98	4.476	0.0702	9.35	4.531	0.0437	3.63	4.673	0.0358	2.33
5	03 - 60	4.491	0.0548	5.71	4.529	0.0488	4.51	4.675	0.0516	4.83
	42 - 99	4.504	0.0609	7.04	4.546	0.0478	4.33	4.693	0.0433	3.40
	01 - 96	4.482	0.0606	6.97	4.523	0.0571	6.18	4.675	0.0435	3.43
	02 - 97	4.478	0.0623	7.35	4.534	0.0475	4.28	4.672	0.0453	3.73
	03 - 98	4.520	0.0626	7.44	4.542	0.0456	3.94	4.666	0.0411	3.07
	04 - 99	4.504	0.0765	11.10	4.535	0.0376	2.68	4.670	0.0317	1.83
	05 - 100	4.484	0.0590	6.60	4.531	0.0483	4.43	4.678	0.0474	4.08

Volumen (ciclistas/hr)		3000			4000			5000		
Salto entre # semilla	Semilla	Promedio	Desv. Estan.	Número mínimo de corridas	Promedio	Desv. Estan.	Número mínimo de corridas	Promedio	Desv. Estan.	Número mínimo de corridas
1	01 - 20	4.828	0.0473	3.74	5.043	0.0320	1.57	5.263	0.0453	2.81
	21 - 40	4.839	0.0335	1.87	5.044	0.0466	3.34	5.265	0.0526	3.79
	41 - 60	4.843	0.0409	2.79	5.054	0.0495	3.77	5.274	0.0618	5.23
	61 - 80	4.839	0.0447	3.33	5.052	0.0501	3.86	5.269	0.0560	4.29
	81 - 100	4.864	0.0275	1.26	5.077	0.0360	1.99	5.307	0.0425	2.47
2	02 - 40	4.832	0.0445	3.30	5.051	0.0391	2.35	5.273	0.0427	2.49
	32 - 70	4.844	0.0493	4.05	5.055	0.0562	4.86	5.273	0.0627	5.38
	62 - 100	4.846	0.0470	3.68	5.063	0.0440	2.97	5.297	0.0463	2.93
	01 - 39	4.834	0.0380	2.40	5.035	0.0391	2.35	5.255	0.0532	3.87
	31 - 69	4.841	0.0332	1.84	5.047	0.0479	3.53	5.263	0.0542	4.02
3	61 - 99	4.857	0.0287	1.37	5.066	0.0471	3.41	5.279	0.0584	4.66
	01 - 58	4.826	0.0362	2.18	5.041	0.0320	1.57	5.264	0.0499	3.40
	43 - 100	4.858	0.0393	2.58	5.064	0.0381	2.23	5.296	0.0571	4.46
	02 - 59	4.839	0.0314	1.64	5.045	0.0396	2.41	5.269	0.0484	3.21
	41 - 98	4.835	0.0363	2.20	5.048	0.0441	2.98	5.273	0.0446	2.72
5	03 - 60	4.845	0.0516	4.44	5.054	0.0550	4.66	5.270	0.0622	5.28
	42 - 99	4.853	0.0408	2.77	5.070	0.0551	4.66	5.282	0.0645	5.69
	01 - 96	4.848	0.0411	2.82	5.052	0.0497	3.79	5.279	0.0528	3.82
	02 - 97	4.836	0.0448	3.34	5.062	0.0449	3.10	5.268	0.0458	2.86
	03 - 98	4.840	0.0450	3.38	5.054	0.0520	4.15	5.276	0.0635	5.52
	04 - 99	4.839	0.0267	1.19	5.051	0.0408	2.55	5.274	0.0611	5.10
	05 - 100	4.848	0.0446	3.31	5.051	0.0365	2.05	5.282	0.0472	3.04

Si se analiza únicamente los datos obtenidos con el volumen de 500 ciclistas por hora, podría decirse que para cierto grupo de semillas, de la número 20 a la 40, la desviación estándar en esta agrupación es considerablemente menor respecto a las otras agrupaciones, pero, al realizar el ensayo con otros volúmenes, como 1000, 2000 hasta 5000 ciclistas por hora, se aprecia que cada grupo de semillas tiene una desviación estándar diferente del resto para distintos volúmenes y que, por lo tanto, no existiría evidencia suficiente para asumir que un grupo de semillas produce una desviación estándar menor en todos los casos.

De la misma forma, entendiendo como normalización al proceso de dividir el resultado de cada simulación respecto al valor promedio del total, se ha normalizado los valores de tiempo de viaje obtenidos con cada semilla respecto al valor promedio de las 100 y como se aprecia en la figura 61 y figura 62, existen claramente picos similares para los diferentes volúmenes. Por ejemplo, si se analiza la semilla 29, 30 y 31, se aprecia que la primera semilla provoca valores menores al promedio, el segundo sobre el promedio y el tercero debajo del promedio, para todos los volúmenes considerados. Esto podría señalar que una misma semilla provoca un comportamiento similar en todo un grupo de usuarios, en este caso ciclistas, aún si este varía en volumen.

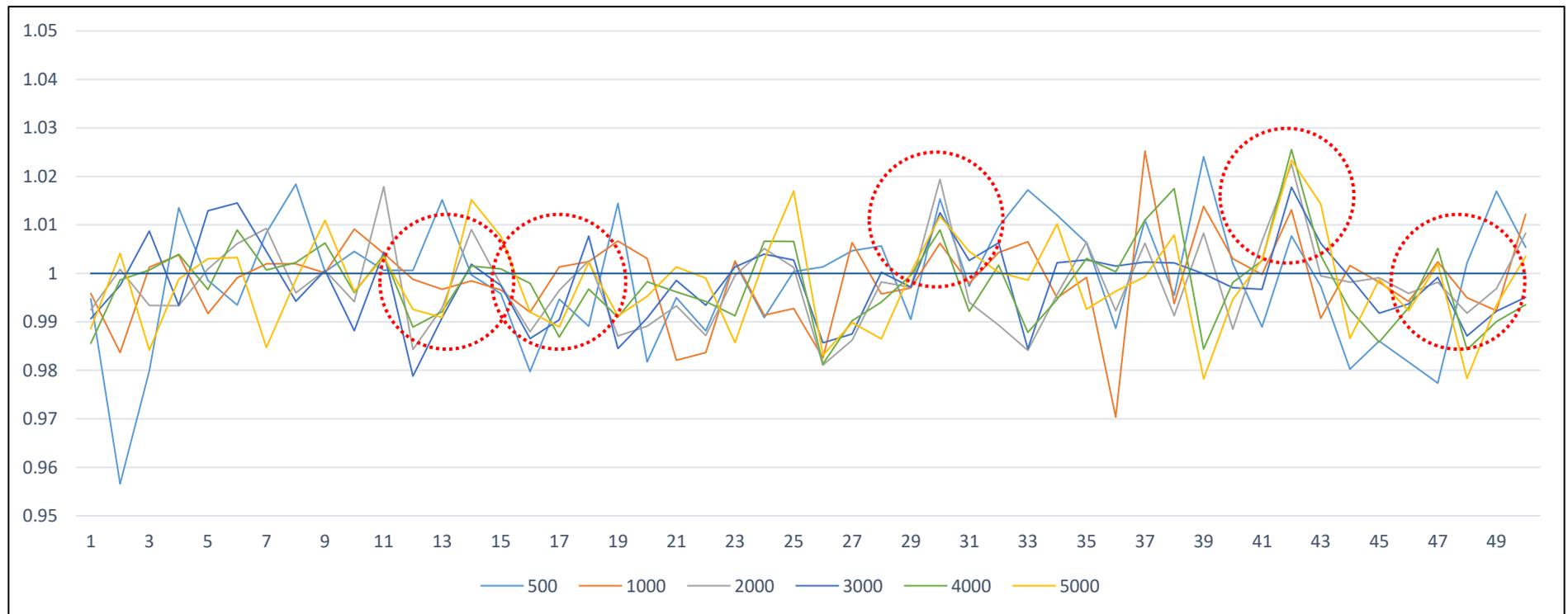


Figura 61: Tiempo de viaje normalizado respecto a cada número semilla y diferente volumen. Semillas: 1-50

Fuente: Propia

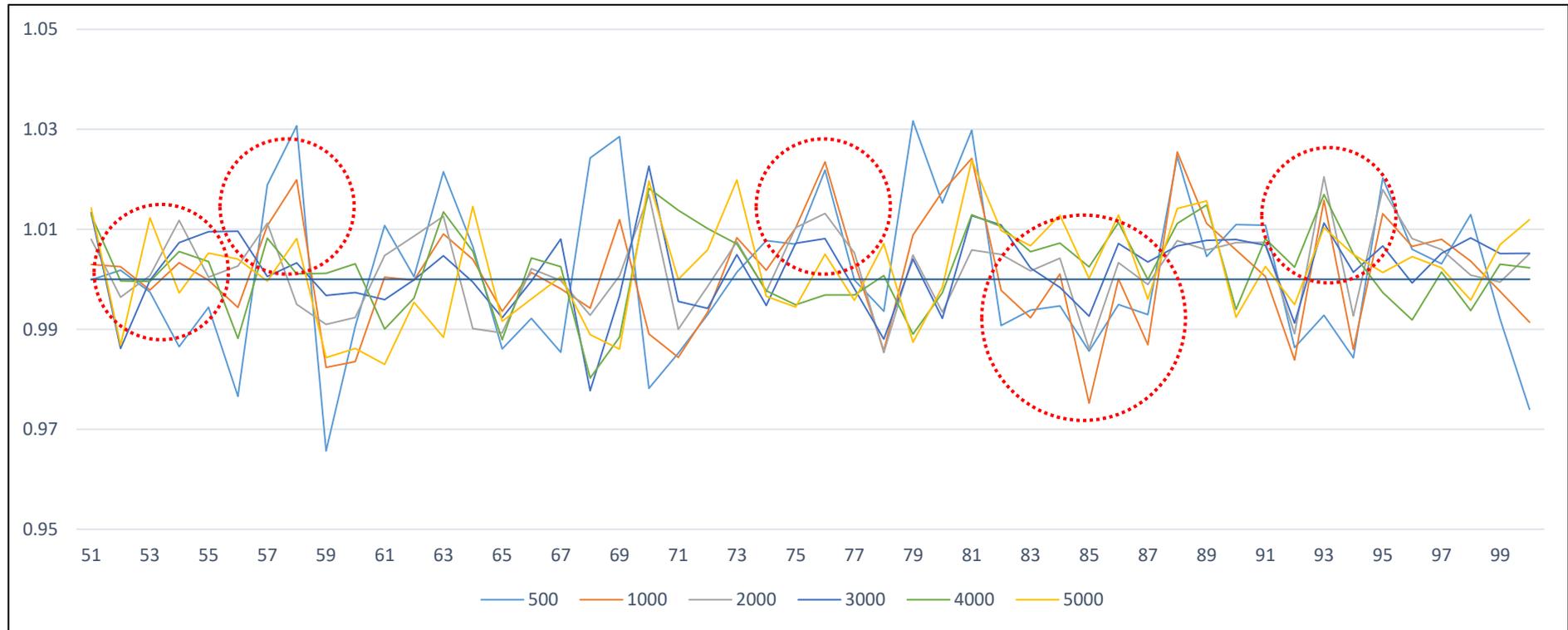
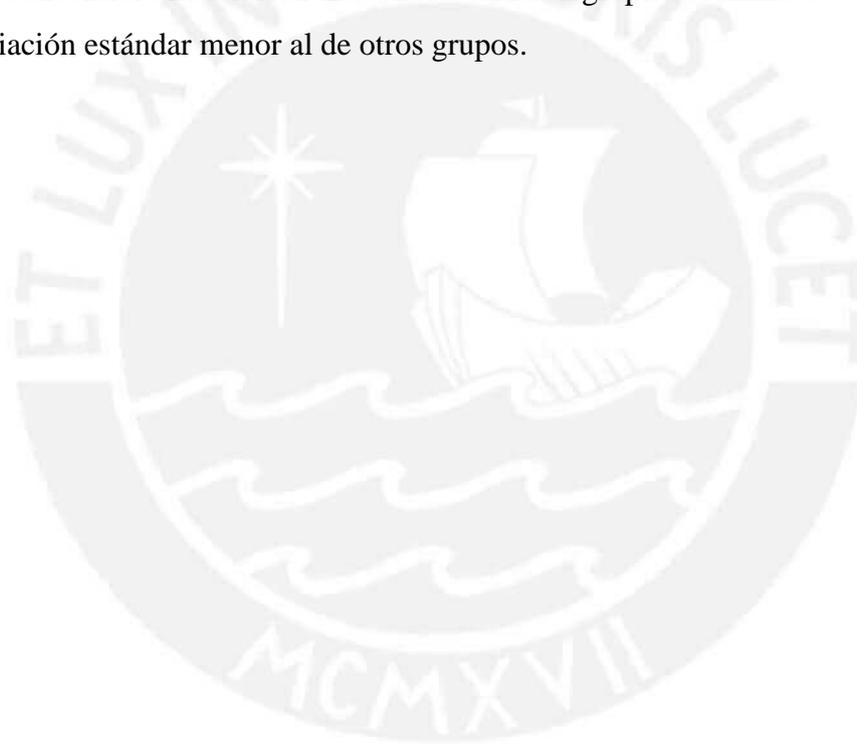


Figura 62: Tiempo de viaje normalizado respecto a cada número semilla y diferente volumen. Semillas: 51 - 100

Fuente: Propia

Adicionalmente, es importante señalar que, en la experiencia del uso del software a través de diferentes versiones, se observa que la desviación estándar es significativamente menor, sobre todo si se compara con los datos recolectados en campo. Vitoriano (2012) menciona algunos métodos y técnicas para reducir la varianza e incrementar la “eficiencia” estadística del análisis de simulación. Es posible que, a fin de reducir el tiempo de calibración y validación, el software utilice este tipo de técnicas.

Finalmente, es preciso recordar que estas simulaciones se realizaron en un espacio dedicado a ciclistas y sin la interacción con otros modos de transporte. Es probable que para otros modelos, como avenidas, rotondas e intersecciones más complejas se pueda encontrar una relación más directa entre un grupo de semilla determinado y una desviación estándar menor al de otros grupos.



## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. Conclusiones

Como lo planteado en la hipótesis, a partir de estos resultados se puede señalar que si bien los valores por defecto, del modelo de Wiedemann 74, dan resultados estadísticamente similares en los valores de tiempo de viaje, no necesariamente replican el comportamiento de los ciclistas en Lima, es necesario también observar el modelo y realizar ajustes de acuerdo a la zona de estudio.

Si bien el informe de la empresa COWI (2012) señala que el modelo de Wiedemann 99, al contar con más parámetros a calibrar, permite representar mejor el comportamiento de los ciclistas, durante el proceso de calibración de este proyecto, se pudo observar que no existe diferencias estadísticamente significativas, entre utilizar un modelo u otro. No obstante, la elección del modelo dependerá de cada proyecto y de sus diferentes factores, como el nivel de detalle necesario y la interacción con otros modos de transporte, incluso, la saturación misma del sistema.



Figura 63: Fotografía de ciclistas durante la simulación  
Fuente: Propia



Figura 64: Fotografía de ciclistas durante la recolección de datos  
Fuente: Propia

Respecto a los valores de velocidad obtenidos, como se aprecia en el capítulo 5, los resultados que más se asemejan a los obtenidos en Lima son los de *cargobike* en Copenhague, se estima que esto sucede por el propósito de viaje. En la zona de estudio, la mayor parte de ciclistas no tiene como propósito el llegar a un destino, sino que en cambio, buscan disfrutar el día y pasar un tiempo de esparcimiento. Por esa razón, es probable que las velocidades se asemejen más a las del *cargobike* en Copenhague.

También, se observa que el parámetro de comportamiento lateral tiene un alto nivel de influencia en el resultado del proceso; así mismo, definir una distancia mayor entre ciclistas y restringir que el adelantamiento sea solo por un lado: derecho, izquierdo o en ambos, afecta de manera muy significativa el rendimiento del sistema.

Por otro lado, de acuerdo a los análisis del capítulo 6, considerar las curvas de aceleraciones obtenidas por COWI (2012) versus las curvas por defecto del software, no representa cambios importantes para volúmenes menores a los 1000 ciclistas por hora, en un espacio total de 6.3 metros de ancho. No obstante, es probable que en espacios con mayor interacción entre ciclistas, peatones u otros modos de transporte, si sea necesario contar con una curva de aceleración deseada más detallada.

Así mismo, se observa diferencias al evaluar el modelo con dos carriles angostos o uno ancho. Por la experiencia en las evaluaciones, utilizar un único carril fomenta que el adelantamiento entre ciclistas sea más rígido y súbito que utilizando dos carriles. Además, utilizar un solo carril limita la cantidad máxima de usuarios, en este proyecto se observó que la cantidad máxima fue de 5000 ciclistas por hora.

De la misma forma, se observó que el número de intervalos y la forma de construcción de la curva de frecuencia acumulada, que luego es asignada al parámetro de *desired speed distribution*, afecta de manera significativa en los resultados. Pese a que, gráficamente, las curvas son muy similares unas a otras, los resultados no necesariamente cumplen esta relación. Fue necesario establecer una nueva tabla, que si bien contenía intervalos variables, permitió obtener resultados aún más cercanos a los obtenidos en campo.

Twaddle et al. (2014), también señala que si no hay otros vehículos cercanos o si el flujo es relativamente bajo, los vehículos buscan mantener una velocidad predefinida, que en este caso es el *desired speed distribution*. Esto apoya la posición que para calibrar este tipo de modelos, de flujo libre o espacios exclusivos, y en este caso, para ciclistas, el nivel de semejanza entre los resultados de la simulación y los datos de campo se basa en el nivel de detalle que se asume al construir la curva de frecuencia acumulada.

Por otro lado, evaluar el comportamiento de los ciclistas con diferentes *driving behaviour*, permitió mostrar que, para volúmenes bajos, estadísticamente no existirían diferencias importantes, pero que esto, no necesariamente significa que representen correctamente la realidad. Utilizar tanto el modelo de Wiedemann 74 como el de Wiedemann 99, son adaptaciones y ajustes que se realizan a fin de intentar simular el comportamiento de los ciclistas sobre modelos diseñados para vehículos, pero como se menciona en la sección 2.6, los ciclistas poseen un comportamiento más complejo y con más variables, puesto que están basados en aspectos tanto físicos como psicológicos, de modo que, a fin de representarlos correctamente, es necesario evaluarlos con otro tipo de modelos.

Con relación al número de actualizaciones por segundo de simulación que debe considerarse en el análisis microscópico, se observa que para este proyecto, y probablemente para evaluaciones de flujo libre o poca interacción con otros modos de transporte, el número de actualizaciones no tiene un efecto importante en los resultados, y que, a fin de objetos prácticos, pueda utilizarse un menor número de actualizaciones, pues como se conoce, a mayores actualizaciones por segundo, el software tarda más tiempo en cada simulación. No obstante, se observa también que los resultados obtenidos en tiempo de viaje, con 20 actualizaciones por segundo se asemejan más a los obtenidos con 5 actualizaciones que al de 10 actualizaciones por segundo. Sin embargo, el software Vissim también permite obtener otro tipo de resultados como son las emisiones vehiculares, en ese caso, el número de actualizaciones si afectaría directamente en el resultado al estar asociado a la velocidad y aceleración instantánea.

Esta conclusión pretende señalar que, para determinadas acciones y resultados específicos, podría simularse el modelo con menores actualizaciones a fin de obtener resultados más rápidamente. En el manual de PTV (2014), se señala que un mayor número de actualizaciones permite obtener una demostración más continua, y que, por ejemplo, valores entre 5 y 10 actualizaciones por segundo son suficientes para obtener resultados finales en la simulación.

Finalmente, se observa que no es posible señalar, de manera efectiva, que un determinado grupo de semillas provoca un resultado con una desviación estándar significativamente menor que otras agrupaciones. Y si bien hay indicios que demuestren que, si existirían estos grupos, no es posible generalizar el caso a un grupo especial de números semilla.

## **7.2. Recomendaciones**

Se observó durante la recolección de datos que existe un grupo muy importante de ciclistas que se trasladan de forma grupal, ya sea de dos o tres individuos, que comparten una velocidad similar. El software Vissim en la versión 8.0 aún no cuenta con alguna opción para agregar estos comportamientos. Se espera que, en futuras actualizaciones, el software pueda permitir incluir grupos de individuos, al menos, como un porcentaje del total.

Se recomienda también, evaluar el nivel de detalle en la construcción de la curva de frecuencia acumulada, que luego es asignada a la velocidad deseada, pues como se observó, tiene un alto nivel de influencia en los resultados finales.

Así mismo, si se desea modelar otras formas de transporte u otro tipo de usuarios que comparten un mismo carril, sería importante evaluar si dos o más carriles angostos representan mejor el comportamiento que en un carril ancho, pues como se vio, si existen diferencias entre utilizar uno u otro.

Finalmente, como señala Twaddle et al. (2014), un aspecto muy importante al desarrollar modelos de microsimulación y, en consecuencia, buscar mejoras en la representación del comportamiento de los conductores es entender no solo el cómo se comportan, sino también el porqué.

## REFERENCIAS

- Akçelik, R., & Besley, M. (2001). Microsimulation and analytical methods for modelling urban traffic. *Conference on Advance Modeling Techniques and Quality of Service in Highway Capacity Analysis*. California, USA.
- Archer, J., & Kosonen, I. (2000). *The potential of micro-simulation modelling in relation to traffic safety assessment*. Hamburg, Germany.
- Botma, H., & Papendrecht, H. (1991). Traffic Operation of Bicycle Traffic.
- Buchanan, C., & Carrignon, D. (2009). Assessment of the impact of cyclists on heterogeneous traffic. *TEC Magazine*.
- Carrignon, D., & Buchanan, C. (2009). Assessment of the impact of cyclists on heterogeneous traffic. *TEC Magazine*, 323-325.
- Castiglione, J., Freedman, J., & Bradley, M. (2003). Systematic Investigation of Variability due to Random Simulation Error in an Activity-Based Microsimulation Forecasting Model. *Transportation Research*.
- Chakroborty, P., & Kikuchi, S. (1999). Evaluation of the General Motors based car following models and a proposed fuzzy inference model. *Transportation Research Part C 7*, 209-235.
- Ciuffo, B., Punzo, V., & Montanino, M. (2012). Thirty Years of Gipps' Car-Following Model. *Transportation Research Record*, 89-99.
- COWI. (2012). *Micro Simulation of Cyclist in Peak Hour*. Copenhagen, Dinamarca.
- Downling, R., Holland, J., & Huang, A. (2002). *Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. California, EEUU.
- Faghri, A., & Egyházióvá, E. (1999). Development of a Computer Simulation Model of Mixed Motor Vehicle and Bicycle Traffic on an Urban Road Network.
- Falkenberg, G., Blase, A., Bonfranchi, T., Cosse, L., Draeger, W., Vortisch, P., . . . Zimmermann, A. (2003). Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft V103*.
- Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). Microscopic traffic flow simulator VISSIM. En *Fundamentals of traffic simulation*. New York.
- Ferrara, T. C. (1976). Establishing warrants for control of a bicycle crossing through simulation (abridgment).
- FHWA. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Virginia, EEUU.

- Forbes, T. (1963). Human factor considerations in traffic flow theory. *Highway Research Record 15*, 60-66.
- Forbes, T., Zagorski, H., Holshouser, E., & Deterline, W. (1958). Measurement of driver reactions to tunnel conditions. *Highway Research Board Proceedings 37*, 60-66.
- Gao, Y. (2008). *Calibration and Comparison of the VISSIM and INTEGRATION Microscopic Traffic Simulation Models*. Virginia, EEUU.
- Ge, Q., & Menendez, M. (2012). Sensitivity Analysis for Calibrating VISSIM in Modeling the Zurich Network. *12th Swiss Transport Research Conference*. Monte Verita, Ascona.
- Gibb, A., St-Jacques, J.-C., Nourry, G., & Johnson, T. (2002). 7th ICCRTS. *A Comparison of Deterministic vs Stochastic Simulation Models for Assessing Adaptive Information Management Techniques over Disadvantaged Tactical Communication Networks*.
- Gipps, P. G. (1981). *A behavioural car-following model for computer simulation*. Melbourne, Australia.
- Higgs, B., Abbas, M., & Medina, A. (2011). Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data. *3rd International Conference on Road Safety and Simulation*.
- Hollander, Y., & Liu, R. (2008). The Principals of Calibrating Traffic Microsimulation Models. *En Transportation*. Springer.
- Janson, J., & Tapani, A. (2004). *Comparison of Car-following models*. Linköping, Sweden.
- Jiang, h., Wen, t., Jiang, p., & Han, h. (2013). Research on cyclist microscopic behavior models at signalized intersection. *16th Road Safety on Four Continents Conference*. Beijing.
- Lehmann , E. (1998). *En Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks, Revised*.
- Liang, X., Mao, B., & Xu, Q. (2012). Psychological-Physical Force Model for Bicycle Dynamics. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*.
- Mallikarjuna, C., & Ramachandra Rao, K. (2010). Cellular automata model for heterogeneous traffic. *Journal of Advanced Transportation*.
- Mathew, T. (2014). *Transportation Systems Engineering*. Powai, India.
- Mathew, T., & Krishna, K. (2007). *Introduction to Transportation Engineering*. Powai, India.
- Mereu, A. (2005). *Analyzing the behavior of cyclist at intersections to improve behavior variability within micro-simulation traffic models*. Ontario, Canadá.
- Nagel, K., & Schrecken, M. (1992). A cellular automation model for freeway traffic. *J. Phys. I France*.
- Pipes, L. (1953). An operation dynamics of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics 24 (3)*, 274-381.

- Pipes, L. (1967). Car-following models and the fundamental diagram of road traffic. *Transportation Research B* 1, 21-29.
- PTV Group. (2014). *PTV Vissim 7 User Manual*. Karlsruhe, Germany: PTV AG.
- Pursula, M. (1999). Simulation of traffic systems - an overview. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 3.
- Roads and Maritime Services - NSW Government. (2013). *Traffic Modelling Guidelines*.
- Sampieri Hernández, R., Collado Fernández, C., & Lucio Baptista, P. (2003). *Metodología de la Investigación*. México, D. F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Sykes, P. (2010). Traffic Simulation with Paramics. En J. Barcelo, *Fundamentals of Traffic Simulation*. Barcelona.
- Twaddle, H., Schendzielorz, T., & Fakler, O. (2014). *Bicycles in urban areas: Review of existing methods for modeling behavior*. Washington DC, EEUU.
- Vasic, J., & Ruskin, H. (2011). Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2720–2729.
- Vitoriano, B. (2012). *Modelos y Métodos de Simulación Estocástica. Aplicación en la Valoración de opciones financieras*.
- Willson, R. E. (2001). An analysis of Gipps' car-following model of highway traffic. *IMA Journal of Applied Mathematics* (2001) 66, 509-537.
- Yao, D., Zhang, Y., Li, L., Su, Y., Cheng, S., & Xu, W. (2009). Behavior modeling and simulation for conflicts in vehicles-bicycles mixed flow. *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*.