

---

**DISEÑO DE UN MÉTODO PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD DE UNA  
CICLO-RUTA**

---

**Propuesta de trabajo de grado para optar por el título de  
Magister en Ingeniería Industrial**

**Autor:**

**Ing. Diego Fernando Flórez Torres**

**Directora**

**Ing. Lindsay Álvarez Pomar, PhD.**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**BOGOTÁ, COLOMBIA**

**agosto de 2019**

**Dedicatoria**

Dedico este trabajo especialmente a mi Mamá, mi Papá, mis hermanos y José Luis quienes  
fueron el motor principal para lograrlo.

*Diego Fernando Flórez Torres*

## **Contenido**

---

LISTA DE TABLAS .....	5
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	6
PALABRAS CLAVE .....	7
1. RESUMEN.....	8
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	9
2.1 ANTECEDENTES.....	9
2.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	12
2.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2.3.1 COHERENCIA CON TEMÁTICAS DE LA MAESTRÍA .....	24
3. OBJETIVOS.....	25
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
4. MÉTODOS Y METODOLOGÍA .....	26
5. CAPACIDADES.....	29
5.1 CAPACIDAD DE VÍAS .....	29
5.2 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN .....	33
5.2.1 Medición de la capacidad de producción .....	34
5.2.2 Planificación de la Capacidad .....	36
5.3 CAPACIDAD DE CICLO-RUTAS .....	37
5.3.1 Elementos de las ciclo-rutas.....	38
5.3.1.1 Velocidad.....	38
5.3.1.2 Ancho del carril .....	39
5.3.1.3 Dimensiones de las bicicletas.....	42
5.4 RELACIONES ENTRE CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN Y CICLO-RUTAS.....	43

6.	REPRESENTACIÓN DE CICLO-RUTAS.....	46
6.1	VARIABLES, PARÁMETROS Y COMPORTAMIENTOS.....	46
6.2	ELEMENTOS APLICABLES A BOGOTÁ .....	48
6.3	MODELO DE SIMULACIÓN BASADO EN AGENTES.....	54
6.3.1	Diseño del modelo.....	54
6.3.2	Validación del modelo .....	72
6.3.2.1	Medidas de desempeño .....	72
6.3.2.2	Número de réplicas.....	73
6.3.2.3	Validación.....	74
7.	ANÁLISIS DE CAPACIDAD .....	75
7.1	CÁLCULO DE CAPACIDAD.....	75
7.1.1	Cálculo de capacidad instalada.....	75
7.1.2	Cálculo de capacidad utilizada .....	77
7.2	INFLUENCIA DE LOS COMPORTAMIENTOS EN LA CAPACIDAD .....	78
7.2.1	Aumento en el comportamiento intrépido .....	78
7.2.2	Aumento en el comportamiento prudente .....	80
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	83
9.	FUTURAS INVESTIGACIONES.....	84
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	86

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1. Comparativo encuestas SDM 2011 – 2015 por modo .....	16
Tabla 2. Perfiles de los grupos de usuarios y modalidades de desplazamientos.....	24
Tabla 3. Valores de Capacidad Base.....	30
Tabla 4. Factor de Ajuste de Capacidad por Incidentes de Tráfico .....	31
Tabla 5. Síntesis de dimensiones de la banda de circulación.....	41
Tabla 6. Tamaños por Tipo de Vehículo Ciclista .....	42
Tabla 7. Dimensiones básicas de vehículos encontrados en Colombia .....	43
Tabla 8. Tipos de capacidad de ciclo-rutas y su medición.....	45
Tabla 9. Tipos de comportamientos observados .....	53
Tabla 10. Principales diferencias entre ABS y DES .....	56
Tabla 11. Componentes de la Metodología ODD.....	58
Tabla 12. Descripción componentes metodología ODD.....	59
Tabla 13. Comportamiento ciclistas.....	62
Tabla 14. Resultados réplicas iniciales .....	73
Tabla 15. Cálculo de número de réplicas .....	73
Tabla 16. Resultados réplicas.....	74
Tabla 17. Resultado intervalo de confianza modelo base .....	74
Tabla 18. Prueba T escenario intrépido .....	79
Tabla 19. Prueba T escenario prudente.....	80

## LISTA DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1. Pirámide de prelación de modos de transporte .....	15
Ilustración 2. Ciclistas Muertos .....	18
Ilustración 3. Ciclistas Lesionados.....	18
Ilustración 4. Criterios para la elección de la tipología de la vía ciclista.....	23
Ilustración 5. Porcentaje de viajes realizados en bicicleta y km de infraestructura ciclista.....	37
Ilustración 6. Resistencia al andar en bicicleta .....	39
Ilustración 7. Sección Libre .....	40
Ilustración 8. Dimensiones básicas del ciclista.....	41
Ilustración 9. Cantidad de bicicletas en un segmento de ciclo-ruta .....	43
Ilustración 10. Localidad de Kennedy – Barrio el Tintal.....	49
Ilustración 11. Ciclo-ruta del Tintal (Avenida Cali).....	50
Ilustración 12. Bicicleta Tradicional.....	51
Ilustración 13. Bicitaxis .....	51
Ilustración 14. Aplicación EON.....	52
Ilustración 15. Demarcación ingreso al segmento de ciclo-ruta .....	52
Ilustración 16. Etapas construcción y validación del modelo .....	60
Ilustración 17. Descripción Agentes .....	61
Ilustración 18. Entorno de simulación .....	64
Ilustración 19. Tortugas modelo de simulación .....	65
Ilustración 20. Ambiente de simulación completo.....	66
Ilustración 21. Diagrama de flujo creación del ambiente de simulación .....	66
Ilustración 22. Diagrama de flujo creación agentes ciclistas .....	67
Ilustración 23. Comportamientos emergentes de adelanto .....	68
Ilustración 24. Adaptación de los agentes.....	69
Ilustración 25. Análisis de entrada variable de arribos .....	71
Ilustración 26. Segmento de ruta seleccionado .....	76
Ilustración 27. Medición de capacidad por método vehicular .....	77
Ilustración 28. Aumento en invasión de zona peatonal.....	79
Ilustración 29. Cola en el ciclo de semáforo en rojo.....	80
Ilustración 30. Aumento en el comportamiento prudente .....	81

## **PALABRAS CLAVE**

---

Las palabras claves utilizadas para el desarrollo de este documento y principalmente el estado del arte fueron:

Capacity, Bike Lane, Cycle Tracks, Bikeway, Bicycle, Bicycle Path y Bicycle Pathway

## **1. RESUMEN**

---

El creciente interés por la calidad de vida que ofrecen las ciudades ha provocado cambios en la toma de decisiones sobre infraestructura vial. Por ejemplo, en Bogotá, el 80% de los accidentes que involucran bicicletas ocurren en malla vial sin ciclo-ruta (Fundación Despacio, 2014), de manera que en los planes de desarrollo de los últimos años se ha venido incluyendo la construcción de las mismas. Sin embargo, el inventario de infraestructura que se tiene exclusivamente para bicicletas se mide en kilómetros, es decir, se conoce la extensión de la ciclo-ruta, pero no se sabe cuál es la cantidad de bicicletas que, simultáneamente, pueden hacer uso de ella. Se han encontrado aproximaciones de cálculo de capacidad de vías vehiculares, que no son aplicados a este tema. Esta propuesta busca el diseño de un método para estimar la capacidad de una ciclo-ruta, reconociendo que el comportamiento de los bici-usuarios puede afectar la cantidad máxima de vehículos no motorizados que puede albergar. Para el análisis, se planea el uso de simulación basada en agentes y de los conceptos de cálculo de capacidad de plantas de producción y de vías vehiculares, para obtener un método cuantitativo de estimación de la capacidad de una ciclo-ruta.



## **2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

---

### **2.1 ANTECEDENTES**

Inicialmente se hace necesario entender cómo se ha definido la capacidad en la literatura, en primera instancia encontramos la definición realizada por (Cerquera, 2007) dentro de la ingeniería de tránsito:

Es el flujo máximo horario al que se puede razonablemente esperar que las personas o vehículos atraviesen un punto o sección uniforme de un carril o calzada durante un periodo de tiempo dado, bajo condiciones prevalecientes de la vía, del control y del tránsito.

También podemos encontrar la definición realizada por el Highway Capacity Manual (HCM), en el cual se especifica la capacidad como la cantidad máxima de vehículos y/o peatones que pueden trasladarse en determinado espacio físico y periodo de tiempo (Transportation Research Board, 2000).

Una vez entendido el significado de la capacidad en el contexto vial se hace necesario abordar analizar los métodos existentes para su cálculo, tal vez el más conocido y utilizado es el que se expone en el HCM (Transportation Research Board, 2000), del cual se hablará más extensamente en el capítulo 5. Aunque algunos países han desarrollado métodos de cálculo de la capacidad con técnicas diferentes, se pueden encontrar modificaciones con base en la experiencia para su adaptación a las condiciones locales, las cuales se pueden agrupar en las de la vía, las de tránsito y las de control. Las condiciones de vía incluyen las características geométricas de la carretera, tales como tipo de vía y su estado, número de carriles, bermas, velocidades de proyecto, los

alineamientos horizontales y verticales. Las condiciones de tránsito se refieren a las características del tránsito que circula por la vía, como la composición, el volumen, la distribución vehicular y los movimientos direccionales que ejecutan los vehículos. Y por último, las condiciones de control, hacen referencia a los dispositivos empleados en la regulación y control del tránsito, tales como son las señales de “Pare” y “Ceda El Paso”, semáforos, restricciones de uso de carriles, movimientos permitidos y otras medidas similares (Transportation Research Board, 2000).

Continuando en el contexto de cálculo de capacidad vial, se ha presentado un creciente desarrollo en la investigación cuantitativa del análisis de la capacidad visto desde diferentes enfoques, realizando algunas aproximaciones para el análisis de detalles importantes del comportamiento macro de los vehículos como los giros a derecha e izquierda y sus diferentes combinaciones, incluyendo en estos los factores de peatones y ciclistas, teniendo presente los conflictos potenciales entre estos y los vehículos motorizados (Yuchuan, Shanchuan, Zhang, & Yu, 2015). De la misma forma, Shuo presenta un modelo para cuantificar la capacidad macro de una red de vías urbanas teniendo en cuenta principalmente la densidad de la red vial (Shou, 1999). Sin embargo, aún está por explorar la influencia del comportamiento de los vehículos a nivel micro, que claramente influye en la capacidad real de las vías.

En cuanto al análisis de capacidad de carga de las ciclo-rutas existen muy pocos estudios tanto a nivel macro como micro, autores como (Wang, WEI, Zhu, & Pei, 2011) realizan un estudio para cuantificar la capacidad de una ciclo-ruta en una intersección con señalización utilizando un enfoque de dispersión de fluidos, e identifican la relación entre volumen de bicicletas por hora con la unidad de ancho de la ciclo-ruta.

Ahora bien, el factor humano ha sido analizado por autores como (Miyajima, y otros, 2007), donde modelan algunos comportamientos de conducción y el impacto que estos tienen en el manejo de las distancias entre vehículos. También se han realizado aproximaciones relacionadas con los comportamientos de conducción asociados con las señales de tránsito y las influencias de estos comportamientos con la generación de colas en las intersecciones (Wang & Chen, 2016). Otras investigaciones realizan análisis sobre los conflictos que se pueden generar basados en los comportamientos de los peatones, usuarios de bicicletas y los conductores de vehículos motorizados, de allí se encuentran estudios como los realizados por Hatfield & Prabhakaran en el cual se analiza el comportamiento en los carriles compartidos entre ciclistas y peatones, y se encuentran comportamientos de agresión como también se tienen en cuenta los elementos distractores que generan choques o casi accidentes (Hatfield & Prabhakaran, 2016). Por su parte, (Almodfer, Xiong, Fang, Kong, & Zheng, 2016) demuestran que en las intersecciones sin señalización donde se presenta conflicto entre conductores de vehículos motorizados y peatones, los tiempos de espera y longitud de cola están fuertemente relacionados a los comportamientos generados por dichos conflictos. De la misma forma (Li, Xiong, Li, Liu, & Zhang, 2015) analizan el comportamiento de peatones y bici-usuarios en una intersección no señalizada obteniendo como resultado la fuerte relación existente entre la velocidad, el flujo y el nivel de servicio con la interacción entre peatones y bici-usuarios. Finalmente, (Jia, Peng, Guo, & Chen, 2008) analizan la relación existente entre la velocidad de los vehículos motorizados dependiendo la interferencia de los usuarios de bicicletas en las vías de uso compartido.

Por otra parte, (Botma, 1995), hace una primera aproximación de las interacciones que pueden existir entre los ciclistas con el análisis del *Level of Services* (LoS), aquí plantea como la frecuencia de los eventos de paso o encuentro con otro usuario pueden disminuir el LoS y la calidad de la

operación. Continuando con lo planteado por Botma, (Hummer, y otros, 2006), realizan un análisis sobre las maniobras de sobrepaso y observaron que éstas se generan principalmente por las variaciones de velocidad de los ciclistas, de allí plantean un método para estimar cómo con ciertas diferencias de velocidad se presentan un número de comportamientos de sobrepaso y su probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, este método se desarrolló sólo para los carriles bidireccionales, segregados y con poco tráfico de bicicletas.

Aunque en la literatura consultada se encuentran métodos para el cálculo de la capacidad y también se han realizado aproximaciones sobre el impacto que tiene el comportamiento de los usuarios en la movilidad, es importante contar con estudios empíricos que propongan métodos para el análisis de la capacidad de una ciclo-ruta que tenga en cuenta el comportamiento de los usuarios.

## **2.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El uso de la bicicleta en los centros urbanos surge como una importante alternativa para la realización de viajes cortos o complementarios con el transporte público (Cámara de Comercio de Bogotá, 2009). Así mismo, este medio de transporte es amigable con el medio ambiente ya que su uso no requiere emisiones por lo cual no genera impactos ambientales y también es económico para los usuarios dado que no requiere de grandes inversiones para su adquisición y mantenimiento (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015). Es por esto que uno de los principales objetivos del Plan Maestro de Movilidad de Bogotá (PMMB), es priorizar los subsistemas de movilidad más sostenibles, por lo cual hace un énfasis en el transporte público y no motorizado (peatonal o en bicicleta) (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2006). Que a su vez también es apoyado por leyes tales como la ley 1083 de 2006, que en sus artículos 1º y 2º reglamenta la implementación de Planes de Ordenamiento Territorial (POT), que den prelación a la movilidad de los usuarios de modos

alternativos de transporte tales como peatonal, bicicleta y medios no contaminantes. El decreto 319 de 2006 que busca “Priorizar los subsistemas de transporte más sostenibles, como el transporte público o el transporte no motorizado (peatonal o bicicleta)” (Decreto N° 319, 2006). La Resolución 242 del 2014 la cual impulsa el desarrollo de acciones o estrategias para que se incremente el uso de transportes limpios o bicicletas (Resolución N° 242, 2014). Y, por último, la Ley 1753 de 2015, que por primera vez incluyó la bicicleta de forma explícita dentro del plan de gobierno, en dicha ley se hace mención sobre el incentivo al uso de la bicicleta desde varias perspectivas tales como financieras, multimodal y de promoción. Adicional establece que el Ministerio de Transporte debe diseñar una metodología para que en los futuros proyectos se incluyan ciclo-rutas o ciclo-bandas en las distintas zonas donde haya un alto flujo de ciclistas (Ley N° 1753, 2015).

En concordancia con el PMMB y la normatividad descrita anteriormente, se encuentra el informe de cómo mejorar la movilidad de los bogotanos 2016-2020, donde se plantean retos a corto, mediano y largo plazo (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015):

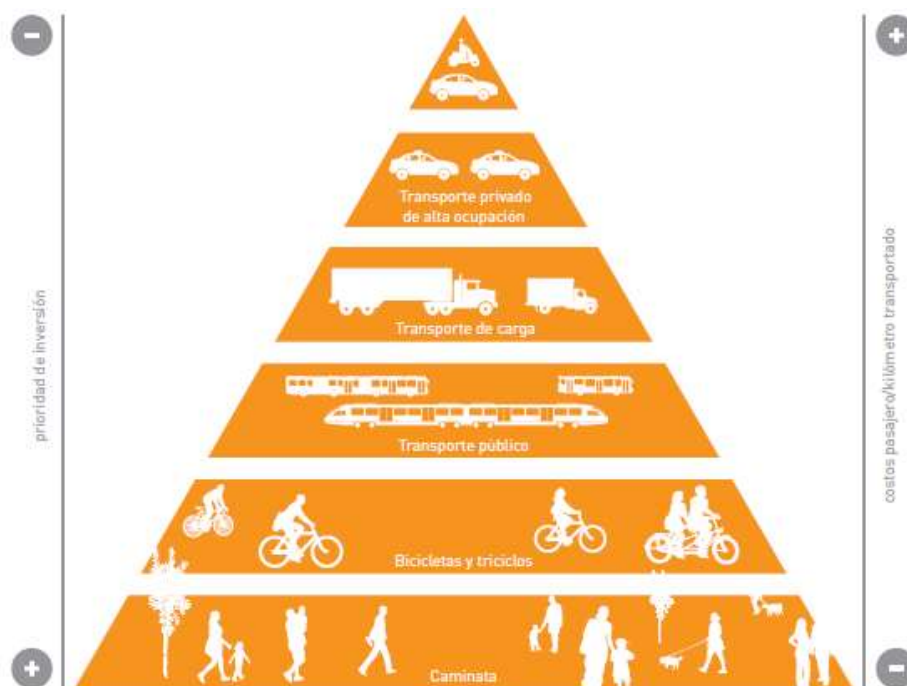
- Estructurar un plan de acción que promueva el uso de la bicicleta que dé respuesta al crecimiento en el uso de ésta y que tenga en cuenta los factores particulares de esta alternativa de transporte sin dejar de lado los obstáculos a los que se enfrentan las personas que deciden utilizar este medio de transporte.
- Tener una red vial que sea incluyente tanto con peatones como con usuarios de bicicletas donde estos se sientan seguros ya sea por la infraestructura, el mantenimiento de las vías, la señalización, la seguridad y el comportamiento de los demás usuarios de las vías. Para finalmente aumentar en una 50% la red existente.

- A mediano plazo incrementar la red actual de ciclo-rutas y bicisarriles siempre teniendo presente condiciones tales como la calidad, seguridad, conectividad, coherencia y comodidad que den respuesta a las necesidades de los usuarios y logren la integración con los demás sistemas de transporte.

Este informe también plantea como correquisito para lograr una adecuada implementación de cualquier acción de movilidad sostenible que debe existir una integración entre los distintos entes gubernamentales, el sector privado, la academia y los ciudadanos en general (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015). Por ende, estudios como el propuesto esperan tener un impacto en el desarrollo de acciones de movilidad sostenible.

Para lograr incentivar el uso de medios de transporte más sostenibles se requiere la transformación de cómo se planean las ciudades, cambiar la prioridad que se ha dado hasta el momento en la infraestructura vial para vehículos motorizados y dejando de lado soluciones viales para otros tipos de transporte sostenibles y más adecuados a las necesidades de las personas, buscando jerarquizar los viajes no motorizados sobre los demás medios de transporte y la adecuada intermodalidad para aquellas personas que necesitan realizar viajes más largos, como se propone en la pirámide de prelación de medios de transporte (Ver Ilustración 1) (Fundación Despacio, 2014).

Ilustración 1. Pirámide de prelación de modos de transporte



Fuente: Infratrans, 2013. Elaborado: Fundación Despacio

Entendiendo la necesidad de priorizar medios de transporte no motorizados dentro de la planeación de la infraestructura vial de las ciudades cobra importancia el análisis sobre estos medios de transporte, La National Association of City Transportation Officials (NACTO), presenta una guía para el diseño de los distintos tipos de ciclo-rutas que se utilizan a nivel mundial las cuales se resumen en el Anexo 1. Y, a nivel nacional el Ministerio de Transporte en su Manual de Señalización Vial, realizar un ejercicio similar al desarrollado por la NACTO (Ministerio de Transporte, 2015). Sin embargo, en ninguno de los dos casos se tienen en cuenta factores como el comportamiento de los usuarios.

Ahora bien, es importante también analizar cómo ha sido el comportamiento del uso de la bicicleta en el caso de Bogotá. Este medio de transporte ha tenido un crecimiento importante en los últimos

años, por lo cual entre el 2.011 y 2.015, se puede observar un crecimiento en el uso de la bicicleta del 30% (Cámara de Comercio de Bogotá, 2016), tal como se muestra en la Tabla 1:

*Tabla 1. Comparativo encuestas SDM 2011 – 2015 por modo*

Modo	Número de viajes mayor a 15 minutos - 2011	%	Número de viajes mayor a 15 minutos - 2015	%	VARIACION	%
A pie	3.186.483	27,5%	2.623.036	20,6%	(563.447)	-18%
Bicicleta	441.135	3,8%	575.356	4,5%	134.221	30%
Taxi	594.747	5,1%	695.480	5,5%	100.733	17%
Transporte público colectivo	3.242.899	28,0%	3.405.451	26,7%	162.552	5%
Vehículo privado	1.677.884	14,5%	1.686.924	13,2%	9.040	1%
TransMilenio	1.379.549	11,9%	2.062.125	16,2%	682.576	49%
Alimentador	96.873	0,8%	221.646	1,7%	124.773	129%
Moto	343.505	3,0%	699.227	5,5%	355.722	104%
Escolar	427.475	3,7%	548.474	4,3%	120.999	28%
Intermunicipal	30.730	0,3%	60.833	0,5%	30.103	98%
Informal	98.992	0,9%	84.331	0,7%	(14.661)	-15%
Otros	67.478	0,6%	92.943	0,7%	25.465	38%
<b>Total</b>	<b>11.587.750</b>	<b>100,0%</b>	<b>12.755.826</b>	<b>100,0%</b>	<b>1.168.076</b>	<b>10%</b>

**Fuente:** Secretaria Distrital de Movilidad SDM encuestas 2011 y 2015. **Elaborado:** Observatorio de movilidad

En concordancia con el crecimiento en el uso de la bicicleta como medio de transporte alternativo, para el mes de diciembre del año 2.016 la ciudad de Bogotá cuenta con una infraestructura para bicicletas de 385 km de ciclo-rutas construidas y 91.03 km de bicirrailes adecuados (Cámara de Comercio de Bogotá, 2017). Adicionalmente, dentro del plan de desarrollo, en su artículo 149, se definen las metas de infraestructura y allí se tiene como objetivo la construcción de 120 km nuevos de ciclo-ruta, que serán priorizados de acuerdo con las necesidades de las distintas localidades, garantizando la seguridad, calidad y conectividad para la integración con los demás sistemas de transporte público (Cámara de Comercio de Bogotá, 2016). Sin embargo, aunque se cuenta con una cantidad significativa de kilómetros de ciclo-rutas, se desconoce cuál es la cantidad de usuarios que pueden hacer uso de éstas en un periodo de tiempo determinado como las horas pico.



Aunque la ciudad de Bogotá ha tenido un crecimiento en su infraestructura ciclística también se ha presentado un incremento en el nivel de ciclistas heridos en un 286% mientras que los ciclistas muertos se incrementaron en un 80% entre el año 2009 al 2016, siendo este último, el año con mayor reporte de ciclistas muertos y heridos desde que se cuenta con información sobre el tema. Con respecto a su año inmediatamente anterior, el porcentaje de personas muertas en accidentes en bicicleta aumentó en un 1%, pasando de 60 a 72 ciclistas muertos (ver Ilustración 2), en cuanto a ciclistas lesionados también se tuvo un incremento del 1% pasando de 715 a 730 (ver Ilustración 3) (Cámara de Comercio de Bogotá, 2017). Uno de los factores por los cuales se generan estos accidentes es porque los ciclistas no hacen uso de las ciclo-rutas, sin embargo, no se conoce a ciencia cierta por qué no las utilizan, puede existir una relación entre la capacidad y el no uso de las ciclo-rutas. Entonces, si logramos medir la capacidad se podría identificar si los usuarios en ciertos segmentos y horarios no hacen uso de la ciclo-ruta por esta causa. De la misma forma, para la planeación de nuevas ciclo-rutas no solo se tendría en cuenta su longitud sino la capacidad necesaria para albergar la cantidad de usuarios proyectados de acuerdo con el incremento en el número de biciusuarios que se viene presentando en la ciudad. Así mismo, tener un desarrollo cada vez más centrado en este modo de transporte que genera unos impactos positivos en temas tanto sociales como medio ambientales.

Ilustración 2. Ciclistas Muertos



Fuente: Datos registrados en el Observatorio de Movilidad 2016. Elaborado: Observatorio de Movilidad

Ilustración 3. Ciclistas Lesionados



Fuente: Datos registrados en el Observatorio de Movilidad 2016. Elaborado: Observatorio de Movilidad

Las cifras de accidentalidad muestran un incremento en los problemas de seguridad vial, por lo cual los Desarrollos Orientados por el Transporte (DOTs) plantean que “la conectividad y cobertura de la actual red de ciclo-rutas no son suficientes para ofrecer a los usuarios de la bicicleta

un recorrido seguro y coherente desde el origen hasta el destino de su viaje” (Fundación Despacio, 2014). Por otra parte, gran parte de los problemas de movilidad de Bogotá son generados por las interacciones que tienen las personas entre sí y con la infraestructura. Es por esto que se hace relevante propender por la consolidación de comportamientos basados en la convivencia, la cooperación y la legalidad, generando así una movilidad eficiente. Para lograr este objetivo, es necesario que los ciudadanos tomen conciencia sobre los impactos que generan en temas de congestión vehicular hasta accidentes mortales (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015). Este trabajo busca aportar a la medición de cómo los comportamientos de los ciudadanos también tienen un impacto significativo en la capacidad de las ciclo-rutas y de alguna forma contribuir a la concientización de estos.

### **2.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los tiempos promedio de desplazamiento en las ciudades se han convertido en un indicador clave, ya que influyen la productividad de las mismas. Según el observatorio de movilidad de Bogotá, los tiempos promedio de viaje en la ciudad haciendo uso de Transmilenio están en 76 minutos, que representa un aumento considerable con respecto a los años 2013 y 2014, cuando se registraron 52 minutos (Cámara de Comercio de Bogotá, 2016). Para la mejora en estos tiempos de desplazamiento surge como una importante alternativa el uso de la bicicleta, principalmente para la realización de viajes cortos o complementarios con el transporte público (Cámara de Comercio de Bogotá, 2009). Sin embargo, en la actualidad no se conoce ciertamente cuál es la capacidad de la infraestructura existente en la ciudad y si ésta es la necesaria para garantizar que el objetivo del PMMB se cumpla y que el crecimiento esperado en los próximos años sea sostenible. Tampoco se

cuenta con información sobre cuál es el impacto que se genera en el tráfico de una ciclo-ruta dependiendo del tipo de usuario y vehículo no motorizado en el cual se transporta.

En la actualidad, no se cuenta con un método para el cálculo de la capacidad de ciclo-rutas, así que es importante analizar cómo se mide la capacidad en una vía de vehículos motorizados. (Shoraka & Puan, 2010) definen que la capacidad de una vía está determinada por una serie de variables que dependen de las características físicas de la sección, de las del tráfico y las regulaciones de la circulación. Así mismo, la ingeniería de tráfico ha desarrollado métodos basados fundamentalmente en datos empíricos, que permiten su cálculo teniendo en cuenta las características del entorno y la circulación. Aún no se dispone de modelos teóricos generales que puedan aplicarse en la práctica (Liu, 2014).

Al no medir la capacidad adecuadamente se pierde la posibilidad de prever el grado de saturación que pueden tener las vías y según Fernández y Valenzuela esto genera una degradación de la calidad de vida urbana, y se comienzan a generar impactos como los siguientes (Fernandez & Valenzuela, 2004):

- Congestión: Aumento del tiempo de viaje, formación de colas y detenciones involuntarias.
- Riesgo: Aumento del número y gravedad de accidentes de tránsito.
- Segregación: Aumento en la distancia y tiempo de cruce de cauces vehiculares.

Estos impactos pueden generarse en cualquier tipo de vía es por esto que las ciclo-rutas son susceptibles de presentar este tipo de impactos con el tendiente crecimiento en el uso de la bicicleta por parte de la población mundial, y más aún si en el cálculo de esta capacidad no se consideran todos los factores, parámetros y variables que pueden incidir en esta medición.

Evaluar con precisión la influencia que cada una de las variables del entorno y de la circulación ejerce sobre la capacidad es una tarea pendiente, pues muchas de ellas no únicamente son cambiantes en el tiempo, sino que tampoco afectan por igual el comportamiento de los actores. En consecuencia, el cálculo teórico de capacidad de carga o capacidad de las vías no coincide con la realidad de utilización de las mismas.

En concordancia con lo anterior, el Manual de Diseño de Tráfico en Bicicletas cuenta con un capítulo denominado “Los y las ciclistas como un parámetro de diseño”, donde considera tanto las habilidades físicas como mentales de los usuarios de la ciclo-ruta. Revisando las consideraciones sobre el factor mental, el ciclista tiene un gran esfuerzo dirigiendo la bicicleta, manteniendo el equilibrio y siguiendo su carril, de allí que la capacidad de los ciclistas es puesta a prueba al interactuar con el tráfico, y es aquí donde el factor de comodidad influye en el usuario e incentiva la utilización de las ciclo-rutas dado que la toma de decisiones en situaciones de tráfico complejo demanda el procesamiento de grandes volúmenes de información en pocos segundos. Es en estas situaciones cuando dichos usuarios pueden cometer un error al intentar responderse: ¿Quién tiene la preferencia?, ¿Qué reglas competen?, ¿Me habrán visto?, ¿A qué velocidad van los otros usuarios?, ¿Alcanzaré a pasar?, ¿Que hará la otra persona?, Dado lo anterior (CROW & Groot, 2007) concluye:

Limitar el riesgo de errar y aumentar la ‘voluntad de perdonar’ si algún error ocurre, mejora considerablemente la seguridad de tránsito, además de hacer el uso de la bicicleta una actividad más cómoda para el usuario. En gran medida, el objetivo de categorizar las vías se basa en estos principios.

Para la valoración sobre el factor antes descrito CROW en su capítulo de evaluación sugiere un “Balance de la Bicicleta” en el cual se dan unos criterios de evaluación para ciclo-rutas los cuales tienen en cuenta factores como la comodidad, el cual es directamente proporcional al incremento en el uso de la bicicleta y dentro de la comodidad establece medidas como la frecuencia de detención (número de paradas por kilómetro), su duración y la razón en las secciones e intersecciones donde se debe parar, el pedaleo lento (el tiempo en que la velocidad baja a menos de 10km/h), las molestias ocasionadas por el tráfico (pedalear en fila debido a vehículos motorizados, peatones u otro ciclista), Las infra-molestias (andar en fila debido a infraestructuras estrechas, postes o señales), Sin derecho de paso (número de veces sin derecho de paso por kilómetro). Es aquí donde cobra importancia poder incluir la mayor cantidad de las variables anteriormente descritas dentro del cálculo de capacidad de una ciclo-ruta y de esta forma poder identificar el impacto que cada una de ellas tendría.

Entrando específicamente al caso colombiano, según la Guía de ciclo-infraestructura para Ciudades Colombianas, los factores a tener en cuenta para el diseño de ciclo-rutas son los observados en la siguiente ilustración:

*Ilustración 4. Criterios para la elección de la tipología de la vía ciclista*



**Fuente:** Guía de ciclo-infraestructura para Ciudades Colombianas

Es claro que el factor usuario debe tenerse en cuenta al momento de tomar una decisión sobre qué tipo de diseño se va a utilizar, se incluyen algunos factores demográficos, pero es importante también poder incluir factores comportamentales. En ese mismo documento ya se hace una aproximación en cuanto al factor comportamental ya que define cinco grandes grupos de usuarios según su motivación: Usuario cotidiano, usuario recreativo o de paseo, cicloturista, ciclista deportivo de carretera/ruta y ciclista deportivo de montaña teniendo en cuenta que cada uno de ellos tiene características distintas de longitud de viaje y su velocidad principalmente. En la siguiente tabla, se muestran algunos usuarios y las diferencias que puede haber entre estos (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016):

*Tabla 2. Perfiles de los grupos de usuarios y modalidades de desplazamientos*

TIPO DE CICLISTA	MOTIVO PRINCIPAL DE VIAJE	LONGITUD DEL RECORRIDO TÍPICO	MODALIDAD DEL VIAJE	VELOCIDAD MEDIA DE VIAJE
Urbano cotidiano	Trabajo, escuela, compras, relaciones personales, etc.	3-8 km en cada viaje de ida o de vuelta	Viajes en solitario	15-20 km/h
Urbano cotidiano de carga	Bicicleta de carga como vehículo de trabajo	3-8 km	Viaje con carga como propósito principal de viaje	10 km/h
Recreativo de paseo	Ejercicio saludable	5-12 km	Viajes en parejas o pequeños grupos	10-15 km/h
Recreativo de días festivos	Acceso y disfrute de la naturaleza y al medio rural	20-40 km	Viajes familiares o en pequeños grupos	10-15 km/h
Cicloturista	Turismo de "mochilero", disfrute de la naturaleza y el patrimonio cultural.	40-80 km	Viajes en solitario, parejas o pequeños grupos	15 - 25 km/h
Deportivo de carretera /ruta	Ejercicio intenso al aire libre	50-120 km	Viajes en solitario, pequeños grupos o pelotones	30 - 35 km/h
Deportivo de montaña	Ejercicio intenso en la naturaleza	30-50 km	Viajes sobre todo en pequeños grupos	Muy variable en función de las pendientes

**Fuente:** Guía de ciclo-infraestructura para Ciudades Colombianas. **Elaborado:** Ministerio de Transporte de Colombia

Se debe tener en cuenta que dentro de estos grupos también hay diferencias en la capacidad de respuesta ante algunas situaciones complejas de tránsito las cuales se hace necesario incluir como factor de diseño.

Teniendo presente todos los aspectos anteriormente expuestos surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo estimar la capacidad de carga de las ciclo-rutas incluyendo elementos claves del sistema como el comportamiento de los usuarios?

## 2.4 COHERENCIA CON TEMÁTICAS DE LA MAESTRÍA

La simulación es una de las técnicas más utilizadas en la investigación de operaciones debido a que es una herramienta muy poderosa, flexible e intuitiva, ya que utiliza la computadora para imitar un proceso o un sistema completo (Hillier & Lieberman, 2010). Teniendo en cuenta lo expuesto



anteriormente la propuesta de investigación está enfocada en el énfasis de Optimización y Logística, dado que se aborda la utilización de simulación basada en agentes para la validación del método propuesto.

## **3. OBJETIVOS**

---

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un método para estimar la cantidad de vehículos no motorizados que pueden hacer uso simultáneamente de una ciclo-ruta, teniendo en cuenta su comportamiento.

### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar los enfoques existentes para el cálculo de capacidad de vías y de producción y su posible aplicación en el cálculo de capacidad de ciclo-rutas.
- Definir las variables y los parámetros que influyen sobre la capacidad de ciclo-rutas y representar las relaciones de influencia a través de un modelo de simulación basado en agentes con información empírica recolectada en un tramo de ciclo-ruta de la localidad de Kennedy en Bogotá-Colombia.
- Analizar sobre el modelo la influencia del comportamiento de las personas que se desplazan en vehículos no motorizados sobre el uso de la capacidad de una ciclo-ruta.
- Identificar relaciones cuantitativas basadas en las influencias identificadas y en el cálculo de capacidad de vías y de producción, y evaluar las diferencias de las estimaciones de capacidad con los resultados del modelo de simulación y con la evidencia empírica.

## **4. MÉTODOS Y METODOLOGÍA**

---

Se realizará una investigación de tipo cuantitativa de carácter descriptivo (Hernández, Fernández, & Baptista, 2006). A continuación, se presentan las actividades que se planean desarrollar, asociadas a cada objetivo específico:

Objetivo:

- Analizar los enfoques existentes para el cálculo de capacidad de vías y de producción y su posible aplicación en el cálculo de capacidad de ciclo-rutas.

Actividades para el logro del objetivo:

- Hacer un inventario de los enfoques más relevantes que se encuentran en la literatura sobre cálculo de capacidad de vías.
- Hacer un inventario de los enfoques más relevantes que se encuentran en la literatura sobre cálculo de capacidad de producción.
- Establecer las principales características de las ciclo-rutas.
- Identificar los principales elementos de los enfoques analizados y relacionarlos con las principales características de las ciclo-rutas.

Objetivo:

- Definir las variables y los parámetros que influyen sobre la capacidad de ciclo-rutas y representar las relaciones de influencia a través de un modelo de simulación basado en agentes con información empírica recolectada en un tramo de ciclo-ruta de la localidad de Kennedy en Bogotá-Colombia.

Actividades para el logro del objetivo:

- Hacer un análisis de influencia de variables y parámetros encontrados en la literatura, sobre capacidad de vías.
- Analizar representaciones previas de desplazamiento en bicicletas a través de sistemas basados en agentes.
- Realizar un análisis empírico de un tramo de ciclo-ruta en la localidad de Kennedy en Bogotá, haciendo uso de vídeos, para inferir comportamientos de los biciusuarios para relacionarlos con las variables y parámetros identificados.
- Construir un modelo de simulación basado en agentes que permita representar las principales variables y parámetros influyentes.

Objetivo:

- Analizar sobre el modelo la influencia del comportamiento de las personas que se desplazan en vehículos no motorizados, sobre el uso de la capacidad de una ciclo-ruta.

Actividades para el logro del objetivo:

- Realizar análisis de escenarios sobre el modelo de simulación basado en agentes, que permitan inferir sobre la influencia de los hábitos en la ocupación de la ciclo-ruta.

- Analizar sobre el modelo la sensibilidad al tamaño de los anchos de los carriles de la ciclo-ruta.

Objetivo:

- Identificar relaciones cuantitativas basadas en las influencias identificadas y en el cálculo de capacidad de vías y de capacidad de producción, y evaluar las diferencias de las estimaciones de capacidad con los resultados del modelo de simulación y con la evidencia empírica.

Actividades para el logro del objetivo:

- Calcular la capacidad de una ciclo-ruta con base en los principios de capacidad de producción.
- Calcular la capacidad de una ciclo-ruta con base en los principios de capacidad de vías vehiculares motorizadas.
- Comparar los cálculos obtenidos con los resultados de los escenarios relacionados del modelo de simulación basado en agentes.
- Relacionar los cálculos para obtener una medida cuantitativa acorde con ellos y con los resultados del modelo de simulación.
- Calcular las diferencias entre la medición cuantitativa propuesta y lo obtenido en el modelo de simulación y los datos empíricos del tramo de ciclo-ruta de la localidad de Kennedy.
- Ajustar la medida cuantitativa, teniendo en cuenta las diferencias y concluir sobre su posible utilización en la práctica.

## 5. CAPACIDADES

---

Según la Real Academia Española de la Lengua (RAE), la capacidad es una cualidad de capaz, y a su vez define capaz como “que tiene ámbito o espacio suficiente para recibir o contener en sí otra cosa” (Real Academia Española, 2014). Desde el punto de vista de los negocios la capacidad se define como la cantidad de producción que un sistema puede lograr en un periodo de tiempo específico, de la misma forma, para las organizaciones dedicadas al sector de servicios representaría la cantidad de clientes en un periodo de tiempo determinado (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2005).

### 5.1 CAPACIDAD DE VÍAS

Para (Cerquera, 2007): “La capacidad se refiere a una tasa de flujo vehicular o personas durante un período de tiempo”, esta capacidad se analiza en una sección uniforme o punto específico, por lo cual si las características de estos cambian de la misma forma cambiará la capacidad. También es importante considerar que la capacidad se calcula con base en condiciones promedio, razón por la cual es una medida de esperanza razonable y, por otra parte, dicha capacidad cuenta con unas condiciones prevalecientes de la vía, del control y del tránsito.

Según el manual de capacidad de carreteras (*Highway Capacity Manual*, HCM), La capacidad es la velocidad máxima y sostenible de flujo de vehículos o personas por hora en la cual se espera que puedan atravesar un punto o sección uniforme de un carril o camino en un periodo de tiempo definido bajo las condiciones predominantes de calzada y el tráfico (Transportation Research Board, 2010). En el HCM también se hacen unas definiciones sobre 3 niveles específicos de capacidad:

La capacidad básica que es el número máximo de vehículos los cuales podrían atravesar un punto o sección uniforme de carril en una hora, bajo las condiciones de calzada y tránsito lo más cercanas posibles a las ideales. Para la capacidad posible cambian las condiciones como las prevalecientes de calzada y tránsito; y finalmente la capacidad práctica también mantiene las condiciones prevalecientes de calzada y tránsito, y se pretende que la densidad no sea tan alta que cause demoras, peligro o restricciones de la libertad del conductor para maniobrar (Transportation Research Board, 2000)

Ahora bien, El método de cálculo de la capacidad propuesto por el HCM es el más conocido y utilizado, básicamente para calcular la capacidad en las condiciones reales se toman los valores ideales suministrados por el HCM (Ver Tabla 3), y se multiplican por los factores de corrección, los cuales son de una unidad menor y generan una disminución en la capacidad, el resultado de este cálculo es en vehículos por hora

*Tabla 3. Valores de Capacidad Base*

<b>TIPO DE VÍA</b>	<b>Velocidad a Flujo Libre (FFS) en mi/h</b>	<b>CAPACIDAD BASE</b>
Autopistas	70 – 75	2,400 pc/h/ln
	65	2,350 pc/h/ln
	60	2,300 pc/h/ln
	55	2,250 pc/h/ln
Carretera de Varios Carriles	60	2,200 pc/h/ln
	55	2,100 pc/h/ln
	50	2,000 pc/h/ln
	45	1,900 pc/h/ln
Carreteras de Dos Vías, Dos Direcciones		1,700 pc/h/ln (en una dirección)
Intersecciones Señalizadas		2,400 pc/hg/ln

**Fuente: Highway Capacity Manual 2010, Elaborado por: El Autor**

Donde, Pc = Vehículos particulares, h = hora y ln = Línea (carril)

En términos generales los factores de corrección son multiplicativos y son usados para la determinación tanto de valores de capacidad como de flujo de demanda o tasa de flujo de servicio.

Así pues, la fórmula en términos generales para aplicar la metodología definida por el HCM 2010 es:

$$v_p = v_b \prod f_i$$

Donde,

$v_p$  : Tasa de flujo (Demanda, Servicio o Capacidad) bajo condiciones prevalentes (Veh/h o veh/h/ln)

$v_b$  : Tasa de flujo (Demanda, Servicio o Capacidad) bajo condiciones base (pc/h o pc/h/ln)

$f_i$  : Factor de corrección para la condición prevalente i

A continuación, se muestra un ejemplo de uno de los factores de corrección establecido por el HCM 2010:

*Tabla 4. Factor de Ajuste de Capacidad por Incidentes de Tráfico*

Número de Carriles (Una dirección)	Proporción de Capacidad Conservado por Tipo de Incidente				
	Berma Inhabilitada	Accidente en la Berma	Un Carril Bloqueado	Dos Carriles Bloqueados	Tres Carriles Bloqueados
2	0.95	0.81	0.35	0.00	N/A
3	0.99	0.83	0.49	0.17	0.00
4	0.99	0.85	0.58	0.25	0.13
5	0.99	0.87	0.65	0.40	0.20
6	0.99	0.89	0.71	0.50	0.26
7	0.99	0.91	0.75	0.57	0.36
8	0.99	0.93	0.78	0.63	0.41

**Fuente: Highway Capacity Manual 2010, Elaborado: Transportation Research Board**

Adicional al método definido en el HCM, existe también el método británico el cual es definido por el *Department for Transport* (DfT), en este método se hace la clasificación de las vías en 11 tipos diferentes (Nombela, 2009):

- Carreteras de ámbito rural con 1, 2 o 3 carriles; (*Road Classes 1-3*)
- Autopistas de doble calzada con 2, 3 o más carriles; (*Road Classes 4-6*)
- Carreteras urbanas en grandes ciudades, con velocidad máxima de circulación de 48 km/h; (*Road Classes 7-8*)
- Carreteras urbanas en pequeñas ciudades, con velocidad máxima de circulación de 48 km/h o 64 km/h; (*Road Class 9*)
- Carreteras de zonas suburbanas, generalmente con una velocidad máxima de circulación de 64 km/h; (*Road Classes 10-11*)

Para los cálculos de capacidad de estas clases de vías se determinan las siguientes variables:

- CWID: Ancho de la parte útil de la calzada (son los metros entre las líneas continuas laterales que demarcan el inicio de la vía para vehículos)
- SWID: Ancho de las bermas (Incluye el ancho en ambos sentidos)
- VWID: Ancho de las cunetas laterales (Incluye el ancho en ambos sentidos)
- BEND: Curvatura (Medida en grados de ángulo/km, para los cambios de dirección)
- HILLS: Variación de la pendiente (subidas + bajadas, m/km)
- JUNC: Intersecciones con otras carreteras (nº cruces/km)
- VISI: Visibilidad media (en metros)
- PHV: Porcentaje de vehículos pesados



Al igual que en el método descrito por HCM para el cálculo de la capacidad, el DfT define una capacidad básica de vehículos para cada uno de los diferentes tipos de carretera descritos anteriormente.

Por ejemplo, para el caso de las autopistas de dos calzadas definidas dentro del grupo de *Road Classes 4-6*, la siguiente es la fórmula de cálculo descrita por DfT:

$$Q_c = \frac{2330}{1 + 0.015 * PHV}$$

De esta forma se entiende que para el cálculo de capacidad vehicular los métodos habitualmente utilizados tienen una base de vehículos en un estado ideal y dependiendo de las variables definidas que pueden afectar dicha capacidad, la cantidad posible de vehículos que pueden circular por los distintos tipos de vías va disminuyendo.

## **5.2 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN**

Según (Sipper & Bulfin, 1998): “La capacidad se puede medir en términos de las unidades de producto por unidad de tiempo que puede producir una instalación”, y son las operaciones cuello de botella las que determinan esta capacidad, dado que son las que limitan el flujo. Por otro lado, (Heizer & Render, 2007) abordan la capacidad no sólo como unidades de producto sino unidades que pueden caber, recibirse o almacenarse en una instalación en un periodo determinado de tiempo. De la misma forma para (Chapman, 2006), la capacidad es una tasa de producción que se mide como la salida del proceso por unidad de tiempo.

### 5.2.1 Medición de la capacidad de producción

Comenzaremos este apartado con la tasa de utilización de la capacidad que según (Heizer & Render, 2007), es básicamente el porcentaje que se usa de la capacidad de diseño. Para (Chapman, 2006), son las horas máximas que puede estar en operación un centro de trabajo, y para (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2005), se debe incluir en el cálculo de la utilización el Nivel Óptimo de Operación el cual es utilizado para solventar el problema que se tiene sobre el tiempo que se puede mantener el ritmo alcanzable de producción.

Para este trabajo en particular se utilizará el cálculo de la tasa de utilización de la capacidad propuesto por (Kalenatic, 2001):

$$CU = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Qr_{ij} * tr_{ij}) \quad (h/año)$$

Donde:

$Qr_{ij}$  : Cantidad real fabricada del producto del tipo “j” que se procesa en el puesto de trabajo “i” (unidades/año).

$tr_{ij}$  : Horas de trabajo promedio realmente utilizadas por unidad de producto del tipo “j”, procesadas en el puesto de trabajo del tipo “i” (h/unidad).

Para analizar el grado de utilización de la capacidad es necesario también monitorear, analizar, influir e intervenir previamente todos aquellos factores que generan en alguna medida la disminución en la utilización de la capacidad, para con ellos eliminar o disminuir el efecto negativo que estos generan (Kalenatic, 2001).

Otras medidas importantes de capacidad son la instalada y disponible. Para poder conocer los valores de estas capacidad encontramos en (Kalenatic, 2001):

Capacidad Instalada:

$$CI = \sum_{i=1}^m n_i * DC * HD - \sum_{i=1}^m n_i * g_i \quad [h/\text{período}]$$

Donde:

$n_i$  : Cantidad de puestos de trabajo del tipo "i"

$m$  : Puestos de trabajo agrupados por tipo;  $i = 1, 2, \dots, m$

$g_i$  : Pérdidas estándar por mantenimiento preventivo y correctivo de los puestos de trabajo del "i" (h/medio de trabajo).

$G_1$  : Pérdidas estándar totales por mantenimiento preventivo de todos los puestos de trabajo activos en el sistema. A su vez, para el cálculo de estas pérdidas, es válida la expresión:

$$G_1 = \sum_{i=1}^n n_i * g_i \quad (h/\text{año})$$

$DC$  : Días corrientes (es decir; días por año = 365)

$HD$  : Horas día (24 horas)

Capacidad Disponible:

$$CD = \sum_{i=1}^m (n_i * DH * HT * NT) - (G_1 + G_2 + G_3 + G_4) \quad (h/\text{año})$$

Donde:

$DH$  : Días hábiles en el año que labora el puesto de trabajo del tipo "i" (días/año)

$HT$  : Número de horas por turno que labora el puesto de trabajo del tipo "i" (h/turno)

$NT$  : Número de turnos de trabajo que labora el puesto de trabajo del tipo "i", según las condiciones de producción.

$G_2$  : Pérdidas estándar totales por la no asistencia de los trabajadores debido a vacaciones, incapacidades, permisos y otras ausencias justificadas y no justificadas (h/año).

$G_3$  : Pérdidas estándar totales por factores externos organizacionales en el proceso de producción

$G_4$  : Pérdidas estándar totales por factores externos naturales, técnicos y económicos que se conducen a paradas y esperas en los puestos de trabajo y que no dependen de los productores, sino de causas de fuerza mayor (un ejemplo es una falla de energía eléctrica).

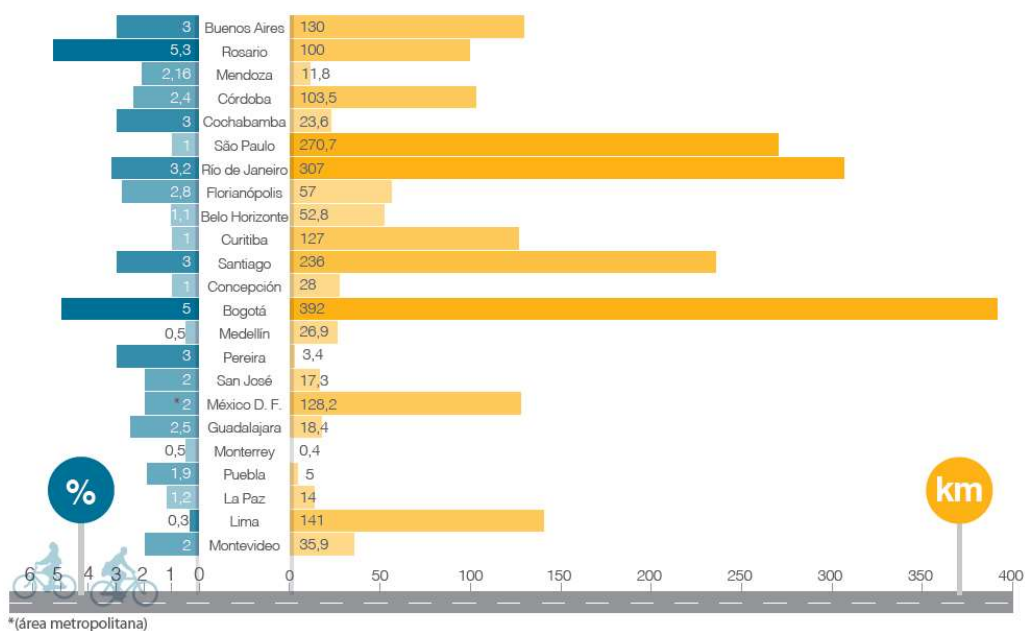
### **5.2.2 Planificación de la Capacidad**

Para las distintas operaciones que puede tener una organización es importante la planificación de la capacidad, para ello existen varios métodos partiendo de lo más general a lo específico, dentro de estos encontramos la planificación de la capacidad utilizando factores globales, las listas de capacidad y los perfiles de recursos (Chapman, 2006). Una vez aplicado cualquiera de los métodos de planeación de la capacidad descritos anteriormente se debe identificar si la capacidad disponible no es inferior a la capacidad necesaria, en el caso en el cual la capacidad necesaria es mayor a la disponible se hace necesario la aplicación de estrategias para el incremento de la capacidad, tales como cambiar los niveles de inventario, contratación y despido de personal, utilización de horas extras, subcontratación y uso de empleados a medio tiempo. Las anteriores son las estrategias más comúnmente utilizadas (Chapman, 2006).

### 5.3 CAPACIDAD DE CICLO-RUTAS

A nivel mundial la medición de la infraestructura de las ciclo-rutas es realizada en kilómetros (km), específicamente Bogotá cuenta con aproximadamente 392 km, siendo la red más grande de ciclo-rutas de América Latina (Ver Ilustración 5) (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).

*Ilustración 5. Porcentaje de viajes realizados en bicicleta y km de infraestructura ciclista.*



**Fuente:** Investigación BID. **Elaborado por:** (Rios, Taddia, Pardo, & Lleras, 2015)

Sin embargo, estas mediciones no tienen en cuenta la cantidad de usuarios que pueden hacer uso de las ciclo-rutas en un periodo de tiempo determinado de acuerdo al tipo de ciclista. Teniendo en cuenta que se quiere proponer un método para el cálculo de la capacidad de ciclo-rutas basado en los métodos de cálculo de capacidad tanto de vías como de producción, se hace necesario identificar los principales elementos que componen las ciclo-rutas y cuáles serían las relaciones con los métodos anteriormente mencionados.

### **5.3.1 Elementos de las ciclo-rutas**

Para la identificación de los distintos elementos que componen una ciclo-ruta, se toma como una de las fuentes de información la Guía para el desarrollo de políticas ciclo-inclusivas, de la Cámara de Comercio de Bogotá, el cual tiene como objetivo la promoción y el desarrollo de políticas públicas ciclo-inclusivas. La guía se basa en las experiencias internacionales principalmente en ciudades europeas ya que allí hay una alta prioridad en la movilidad en bicicleta (Cámara de Comercio de Bogotá, 2010). Así mismo, otra fuente de consulta es la Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas realizada por el Ministerio de Transporte el cual hace una recopilación de las principales guías a nivel mundial y las adapta para su aplicación a nivel nacional.

#### **5.3.1.1 Velocidad**

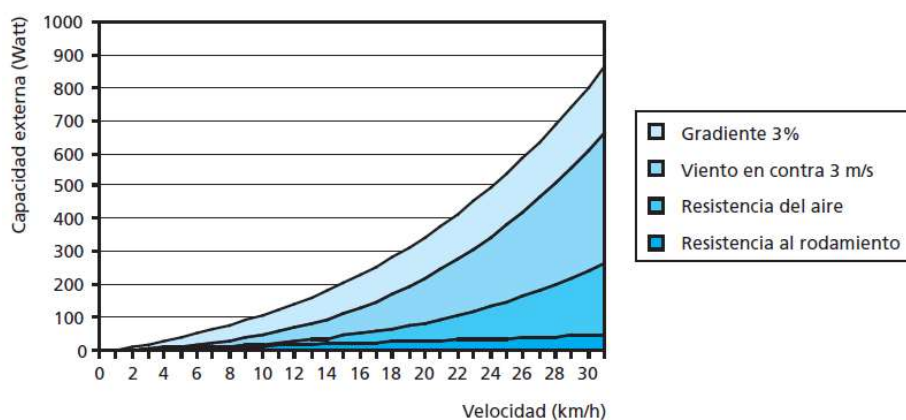
La velocidad es una variable muy importante mencionada por los distintos autores y la cual depende directamente de la energía generada por el poder muscular de los individuos para el movimiento de las bicicletas, es importante tener claro que esta energía es limitada, así que cualquier resistencia adicional requiere de un mayor desgaste muscular del individuo o de lo contrario la bicicleta tendrá una desaceleración por consiguiente una disminución en la velocidad. Adicionalmente, Los ciclistas deben afrontar dos fuerzas: la resistencia al rodamiento y la resistencia aerodinámica, donde la primera es básicamente la fricción que hay entre los neumáticos y la superficie sobre la que transita y la segunda es generada por el perfil aerodinámico de la bicicleta utilizada y la velocidad del viento (CROW, 2011). A continuación se describen otras causas de la pérdida de energía según (CROW, 2011):

- Pérdidas por fricción en los rodamientos y la cadena, para un ciclista que tiene su bicicleta en buen estado, esta causa no representa más del 1 a 1,5 % del total de la resistencia.

- Pérdidas por vibración en el marco, el sillín y los neumáticos
- Frenado y aceleración
- La gravedad, al subir una pendiente

En la Ilustración 6, se puede observar el comportamiento de la velocidad con respecto a algunos de los principales factores de resistencia:

Ilustración 6. Resistencia al andar en bicicleta



Fuente: Manual de Diseño para el Tráfico de Bicicletas. Elaborado por: (CROW, 2011)

Existe un factor adicional que puede generar pérdidas de velocidad y es el tipo y cantidad de usuarios que transitan por una ciclo-ruta, dado que estos también tienen un impacto directo con la velocidad (AASHTO Executive Committee, 1999).

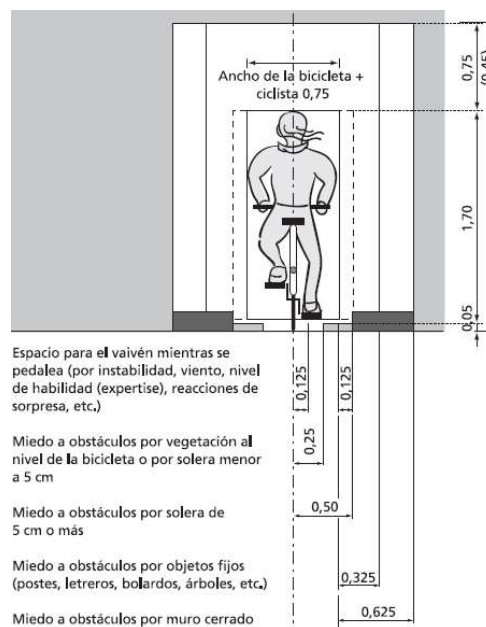
### 5.3.1.2 Ancho del carril

Las vías destinadas para los ciclistas deben propender por el tránsito seguro y cómodo de estos, sin dejar de lado las acciones de adelanto, parada y encuentro, etc. (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016). La organización CROW en su manual de diseño para el tráfico de bicicletas incluye el balanceo como un parámetro a tener en cuenta dentro del diseño de las vías ciclísticas.

Para mantener el equilibrio los ciclistas realizan movimientos laterales inclusive cuando van a una mayor velocidad, a esto se le denomina balanceo. Existen factores que influyen directamente en el balanceo, por un lado se encuentran los factores que depende netamente del ciclista y son los determinados por la edad, la experiencia y la capacidad física; por otro lado están los factores que no dependen del ciclista, tales como, las irregularidades de la superficie por donde transita y los vientos cruzados, (CROW, 2011). Se debe tener presente este factor en el ancho de carril de una ciclo-ruta, en condiciones normales a una velocidad estable CROW sugiere contar con 20 cm, destinados para el balanceo, sin embargo, para las personas que por condiciones físicas es más difícil mantener el equilibrio como los adultos mayores o los niños, para este tipo de usuario y en las zonas donde se detienen y vuelven a arrancar los ciclistas el ancho sugerido es de 80 cm.

La suma del ancho requerido por la bicicleta más los factores de maniobrabilidad y los miedos a los obstáculos es denominado Sección Libre (Ver Ilustración 7).

*Ilustración 7. Sección Libre*

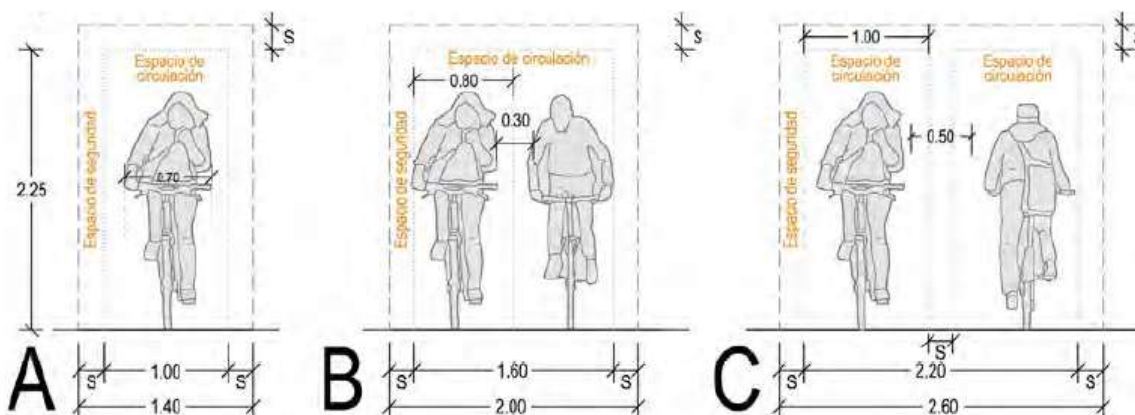


**Fuente: Manual de Diseño para el Tráfico de Bicicletas. Elaborado por (CROW, 2011)**



Para el caso nacional dentro de la guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas, se encuentran definiciones sobre las dimensiones a tener en cuenta incluyendo los factores de balanceo, características del usuario y del entorno o del contexto (Ver ilustración 8).

*Ilustración 8. Dimensiones básicas del ciclista*



**Fuente:** Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas. **Elaborado por:** (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016)

Finalmente, en la Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas se hace un resumen sobre el ancho de carril propuesto de acuerdo al sentido de circulación y teniendo en cuenta el comportamiento de adelantar (Ver Tabla 5).

*Tabla 5. Síntesis de dimensiones de la banda de circulación*


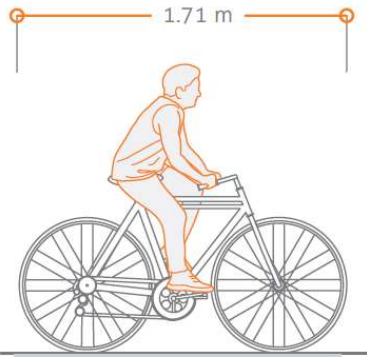
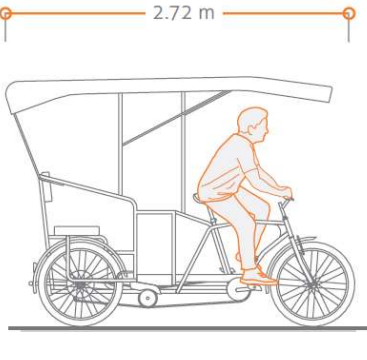
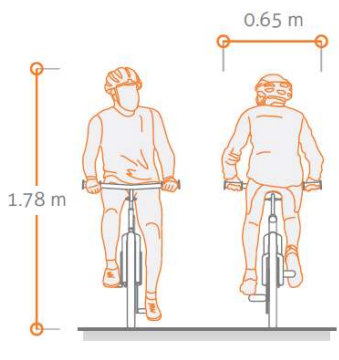
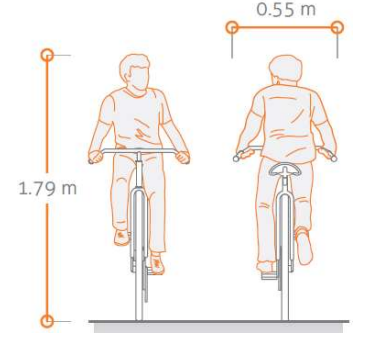
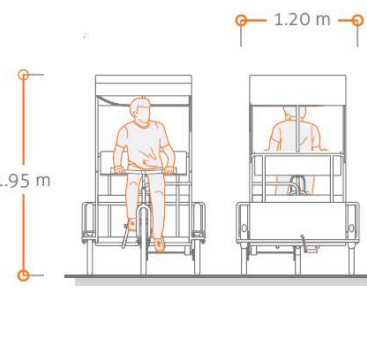
		1 SENTIDO DE CIRCULACIÓN (m)	1 SENTIDO MÁS ADELANTAMIENTO (m)	2 SENTIDOS DE CIRCULACIÓN (m)
Sin circulación de triciclos	Mínima	1,40	1,60	2,20
	Recomendable	1,60	2,00	2,60
Con circulación de triciclos	Mínima	1,50	2,10	2,70
	Recomendable	1,70	2,30	3,20

**Fuente:** Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas. **Elaborado por:** (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016)

### 5.3.1.3 Dimensiones de las bicicletas

La dimensión de los vehículos no motorizados es un elemento importante a tener en cuenta en el diseño de una ciclo-ruta. Es por esto, que en el capítulo IV del Manual integral de movilidad ciclista para ciudades mexicanas, se abordan las temáticas sobre infraestructura y se hace una definición más específica sobre los distintos Tipos de Vehículos Ciclistas (Ver Tabla 6).

Tabla 6. Tamaños por Tipo de Vehículo Ciclista

BICICLETA DE MONTAÑA	BICICLETA DE TURISMO	CICLOTAXI
 <p style="text-align: center;">1.62 m</p>	 <p style="text-align: center;">1.71 m</p>	 <p style="text-align: center;">2.72 m</p>
 <p style="text-align: center;">1.78 m</p> <p style="text-align: center;">0.65 m</p>	 <p style="text-align: center;">1.79 m</p> <p style="text-align: center;">0.55 m</p>	 <p style="text-align: center;">1.95 m</p> <p style="text-align: center;">1.20 m</p>

Fuente: Plan Maestro de Ciclovías de Lima y Callao. Elaborado por: El Autor

Específicamente para el caso colombiano, en la Guía de ciclo-infraestructura para Ciudades Colombianas se realiza una definición de las dimensiones básicas y tipos de vehículos ciclistas encontrados en Colombia (Ver Tabla 7).

*Tabla 7. Dimensiones básicas de vehículos encontrados en Colombia*

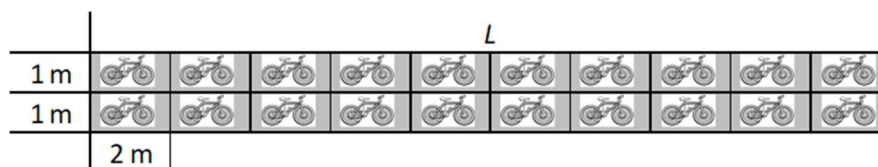
VEHÍCULOS	ALTURA	LONGITUD	ANCHO
Bicicleta urbana	1,80 m	1,90 m	0,70 m
Bicicleta de carga	1,80 m	2,10 m	1,00 m
Triciclo	1,80 m	2,10 m	1,20 m
Triciclo de transporte de viajeros	1,95m	2,70 m	1,30 m

**Fuente:** Guía de ciclo-infraestructura para Ciudades Colombianas. **Elaborado por:** (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016)

#### 5.4 RELACIONES ENTRE CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN Y CICLO-RUTAS

Para comenzar con las relaciones que se pueden encontrar entre la capacidad de producción y la capacidad de una ciclo-ruta es importante entender que habitualmente en un centro de trabajo se hace el procesamiento de un producto a la vez, por el contrario, en un segmento de ciclo-ruta son varios los usuarios que pueden hacer uso de esta por vez. En la Ilustración 9, se muestra como un segmento de ciclo-ruta de longitud  $L$ , se divide en celdas de área de  $2\text{m} \times 1\text{m}$ , esta área ha sido trabajada por autores como (Zhang, Wang, & Li, 2006) y (Li, Wang, Liu, Bigham, & Ragland, 2013), para identificar la cantidad de usuarios que pueden hacer uso de este segmento a la vez:

*Ilustración 9. Cantidad de bicicletas en un segmento de ciclo-ruta*



**Elaborado por:** El Autor

A continuación, se analiza la relación existente entre la capacidad instalada o de diseño de producción con los elementos de una ciclo-ruta, para calcular esta capacidad se tiene en cuenta la cantidad de puestos de trabajo con que cuenta el sistema de producción, los días corrientes del año,

las horas disponibles por día y las pérdida de tiempo por mantenimiento preventivo o correctivo (Kalenatic, 2001). En producción tanto los días del año como las horas disponibles por día son parámetros constantes, es decir, que no presentan una variación y por lo tanto son de carácter limitado, asociando este tipo de parámetro con los elementos de una ciclo-ruta se puede identificar que la infraestructura de los carriles tanto de largo como de ancho presentan este mismo comportamiento, por lo tanto para el cálculo de la capacidad instalada de una ciclo-ruta se deben incluir la extensión de cada tramo de ciclo-ruta y su ancho para calcular la capacidad total del sistema. Sin embargo, el ancho de la ciclo-ruta debe tener un análisis distinto ya que dependiendo del tipo de usuario y las características del segmento analizado puede existir una variación en la cantidad de personas que puede hacer uso de este segmento.

Siguiendo con este análisis se abordará la capacidad utilizada y su relación con los elementos de una ciclo-ruta. En producción, para calcular esta capacidad se tienen en cuenta los tipos de productos procesados en cada uno de los distintos centros de trabajo en un tiempo específico, de esta forma cada producto puede ser tomado como el tipo de usuario que utiliza la ciclo-ruta y que se diferencia de los otros de acuerdo con características específicas, tales como, género, rango de edad y comportamiento al manejar; entre otros.

De acuerdo con estos análisis, se realiza la siguiente propuesta sobre la medición de la capacidad para ciclo-rutas:

Tabla 8. Tipos de capacidad de ciclo-rutas y su medición

TIPO DE CAPACIDAD	CICLO-RUTAS	FÓRMULA
<b>Instalada o de Diseño (CI)</b>	<p>Para la capacidad de diseño se deben incluir las variables:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad promedio por tipo de usuario proyectado para el uso del segmento de ciclo-ruta.</li> <li>• Longitud del vehículo no motorizado de acuerdo al tipo de usuario proyectado.</li> <li>• Longitud del segmento de ciclo-ruta.</li> <li>• Periodo de tiempo a evaluar</li> <li>• Pérdidas de tiempo por paradas programadas (Ejemplo: semáforos)</li> </ul> <p>El cálculo de la capacidad se realiza por cada carril que puede contener el segmento de ciclo-ruta, para los casos en los cuales no es identificable la cantidad de carriles se debe calcular de acuerdo al ancho de la ciclo-ruta y el ancho recomendado por sentido de circulación</p>	$CI = \frac{P_t - Ts_i - \frac{Lc_j}{V_i}}{\frac{Lu_i}{V_i}} + 1$ <p>Donde:  <i>P<sub>t</sub></i>: Cantidad de tiempo “t” a evaluar.  <i>Lc<sub>j</sub></i>: Longitud del segmento de ciclo-ruta “j” a evaluar.  <i>Lu<sub>i</sub></i>: Longitud del tipo de vehículo no motorizado “i”  <i>V<sub>i</sub></i>: Velocidad promedio de tipo de usuario “i”  <i>Ts<sub>i</sub></i>: Tiempo total programado de paradas por obstáculos en el segmento “i”</p>
<b>Capacidad Utilizada (CU)</b>	<p>Dado que la capacidad en una ciclo-ruta se mide en número de ciclistas que hacen uso de ésta. Se debe tener el valor real del tipo de usuario que hace uso del segmento de ciclo-ruta en un periodo determinado de tiempo</p>	$CU = \sum_{i=1}^m Q_i$ <p>Donde:  <i>Q<sub>i</sub></i>: Cantidad de usuario del tipo “i” que hacen uso del segmento de ciclo-ruta en un periodo de tiempo determinado.</p>
<b>Capacidad Disponible (CD)</b>	<p>Para el cálculo de la capacidad disponible se deben incluir los eventos que pueden afectar la velocidad de los usuarios del segmento de ciclo-ruta que se va a analizar, por lo tanto se necesita un factor de corrección que disminuya la capacidad de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia del evento, como por ejemplo en las ciclo-rutas compartidas con peatones se debería tener un factor de corrección que relacione la probabilidad de que un peatón se atravesara en el carril de ciclo-ruta y el ciclista deba frenar.</p>	$CD = CI * F_i$ <p>Donde:  <i>CI</i>: Capacidad instalada del segmento de ciclo-ruta a analizar.  <i>F<sub>i</sub></i>: Factor de corrección por la posible ocurrencia de un evento “i” que genere la disminución de velocidad.</p>

Elaborado por: El Autor

## **6. REPRESENTACIÓN DE CICLO-RUTAS**

---

En este capítulo se abordará cómo se han representado y simulado las ciclo-rutas en los trabajos anteriormente realizados, para poder determinar cuáles son las principales variables, parámetros y comportamientos que hasta el momento se han simulado con un énfasis en la simulación basada en agentes. De la misma forma identificar cuáles variables, parámetros y comportamiento encontrados en la literatura son aplicables al caso específico de Bogotá y con base en esta información definir y construir el modelo basado en agentes.

### **6.1 VARIABLES, PARÁMETROS Y COMPORTAMIENTOS**

La simulación basada en agentes (ABS, por sus siglas en inglés), se ha trabajado en el transporte modelando sistemas y las interacciones que se presentan entre los vehículos tanto a nivel macro como microscópico, con un reciente foco en la representación de los sistemas a escala con elementos temporales y espaciales del mundo real, evaluando las respuestas de comportamiento con la infraestructura existente (Thompson, Savino, & Stevenson, 2015). A nivel macroscópico contamos con ejemplos como los realizados por Thompson, Savino & Stevenson, donde se busca simular el comportamiento de los usuarios de las ciclo-rutas asignando una función de utilidad que incrementaba cuando la vía es amigable y decreciendo cuando no lo es, generando un efecto de bola de nieve. Dentro de los variables y parámetros usados en esta simulación podemos encontrar la velocidad mínima y máxima, densidad y se incluyó un factor de exploración para el cambio de ruta en las intersecciones. (Thompson, Savino, & Stevenson, 2015),

A nivel microscópico, se han realizado investigaciones que buscan lograr una alta comprensión de los comportamientos de los ciclistas, esto es principalmente motivado por los resultados obtenidos con este tipo de estudios en vehículos motorizados. En algunas investigaciones como las realizadas por (Ma & Luo, 2016), se ha explorado el comportamiento del ciclista a nivel individual sin interacción con los demás, teniendo en cuenta variables como aceleración, desaceleración y velocidad, y también se incluyen en el análisis factores físicos y sociales que resultan siendo significativos. Por último, el estudio cuenta con una aproximación al comportamiento específico del ciclista incluyendo la probabilidad de decisión de adelantar o no.

En el trabajo realizado por (Ren, Jiang, Chen, Huang, & Lu, 2016), se tienen en cuenta las velocidades de las bicicletas convencionales y las eléctricas, obteniendo como resultado una velocidad promedio de 4.10 m/s para las bicicletas eléctricas y 3,08 m/s para las bicicletas convencionales, con una desviación estándar de 1,25 m/s y 0,83 m/s, respectivamente. También definen una aceleración de 2 m / s<sup>2</sup> para las bicicletas eléctricas y 1 m / s<sup>2</sup> para las convencionales. En cuanto a los parámetros utilizados en el modelo se representa el carril y su ancho el cual es estándar de un metro y también el área de la bicicleta. A nivel de comportamiento se tiene en cuenta el ciclista que se mantiene dentro del carril y el que se sale en la caja de intersección para adelantar, así como el movimiento tanto frontal como lateral.

Los autores (Jin, Qu, Xu, Ma, & Wang, 2015), identifican la necesidad de la representación realista del movimiento e interacciones de los ciclistas dado el aumento en el tráfico de bicicletas. Dentro de los parámetros encontrados en este estudio se define el largo de la bicicleta en 2 m. y se identifica que es una medida que se ha utilizado ampliamente en los modelos de simulación de bicicletas. Se realiza una definición de velocidad promedio entre 14-16 km/h, por lo cual trabajaron velocidades de 4 m/s y 6 m/s. Por lo cual definieron un tick de simulación como 1 segundo por

metro. Al igual que los autores anteriores se tienen en cuenta las variables de velocidad, tamaño de bicicleta, ancho de carril y el comportamiento de sobrepaso para las bicicletas eléctricas. El mismo uso de variables y parámetros es identificado en el trabajo realizado por (Zhang, Ren, & Yang, 2013).

Uno de los estudios más recientes enfocados en el comportamiento de los ciclistas es el realizado por (Osowski & Waterson, 2017), donde se busca realizar la aplicación del Modelo de Fuerza Social que se utiliza en peatones y que se ha validado para las principales herramientas de simulación como VisWalk o Legion, que son base para la planeación y evaluación de esquemas peatonales, el autor propone hacer el uso de este mismo modelo adaptado a ciclo-usuarios. En este trabajo se tienen en cuenta el área de la bicicleta, velocidad promedio y la desviación estándar, así como también el tiempo de arribo de las bicicletas.

## **6.2 ELEMENTOS APLICABLES A BOGOTÁ**

Una vez identificados tanto los parámetros, como las variables y los comportamientos que se han tenido en cuenta en la literatura a nivel mundial para los estudios realizados a cerca del comportamiento de los usuarios de las ciclo-rutas, es importante revisar cuales de estos son aplicables al caso de Bogotá. Para poder cumplir este objetivo como primera medida se realizó un trabajo de campo el cual permitiera a través de la observación realizar la identificación de cuáles variables, parámetros y comportamientos son aplicables.

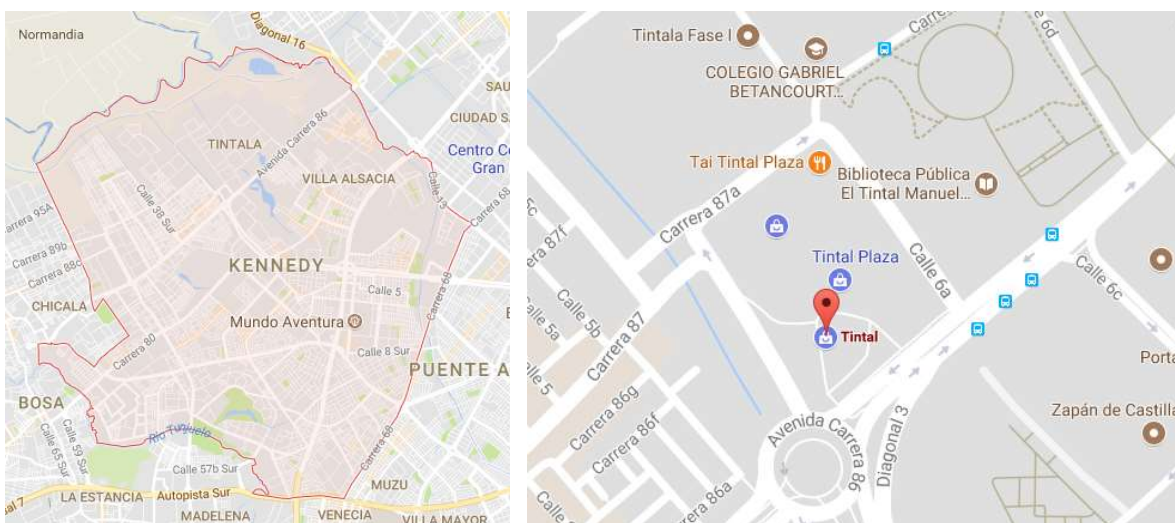
Para la selección del segmento de ciclo-ruta en el cual se haría el trabajo de campo, se tuvo en cuenta que de los 392 km de ciclo-ruta que se tienen en la ciudad la más representativa es la que comparte andén con un 62% (Fundación Despacio, 2014). Adicionalmente, se analizó que contará con un volumen representativo de viajes en hora pico, para esto se tomó como base el informe de



diseño e implementación de estrategias para el uso de la bicicleta en Bogotá y apoyo la conformación de redes, en donde se especifica que la ciclo-ruta del Tintal es la segunda con un mayor volumen de viajes por día en hora pico de 6 am hasta las 7 am. (Fundación Despacio, 2014).

La ciclo-ruta del Tintal se encuentra ubicada en la Localidad de Kennedy (Ver Ilustración 10, parte izquierda), más específicamente sobre la Avenida ciudad de Cali comenzando en la glorieta que colinda con la Avenida de las Américas, como se puede observar en la parte derecha de la Ilustración 10.

*Ilustración 10. Localidad de Kennedy – Barrio el Tintal*



**Fuente: Google Maps**

El tramo de ciclo-ruta seleccionado está ubicando específicamente sobre la biblioteca el Tintal, dado que en este punto se encuentra una intersección importante con la Calle 6ª (Ver Ilustración 11), en la cual en hora pico se pueden observar varios comportamientos que se deben tener en cuenta para el cálculo de capacidad de una ciclo-ruta.

*Ilustración 11. Ciclo-ruta del Tintal (Avenida Cali)*



**Fuente: Google Maps**

Una vez seleccionado el segmento de ciclo-ruta donde se aplicaría el estudio de campo, se determina el tamaño de la muestra debido a que el éxito de una simulación radica en la realización de un adecuado muestreo del fenómeno a simular, es decir, obtener los datos que representen el comportamiento estadístico de lo que se está estudiando (Hillier & Lieberman, 2010). En Bogotá se realizan 575.356 viajes por día en bicicleta (Cámara de Comercio de Bogotá, 2016), dado que la población a analizar es finita, con una aceptación de error del 2% y una confianza del 95%, se obtiene un tamaño de muestra de 2.391 viajes. De acuerdo con este tamaño de muestra y el Reporte Anual de Movilidad, se estima que son necesarios dos días de grabación en el horario de 6 am hasta las 7 am.

Durante dos días se realizaron las grabaciones para posteriormente poder identificar las variables encontradas en la literatura que son aplicables al caso de Bogotá y de las cuales de acuerdo a los alcances del trabajo de campo se pueden tener datos para posteriormente realizar la construcción del modelo de simulación basado en agentes.

Una vez realizados los vídeos en los días seleccionados se procedió a la identificación de las variables, parámetros y comportamientos existentes en Bogotá:

- Velocidad: Tanto en la literatura consultada como en el caso de Bogotá esta es una variable base asociada directamente al movimiento de los agentes.
- Tipo de vehículo: Dentro del trabajo de campo realizado se observaron dos tipos principales de vehículos que transitan por la ciclo-ruta, los cuales son la bicicleta tradicional (Ver ilustración 12) y el Bicitaxi (Ver ilustración 13).

*Ilustración 12. Bicicleta Tradicional*



**Fuente: El Autor**

*Ilustración 13. Bicitaxis*



**Fuente: El Autor**

- Cantidad usuarios y arribos: Para la identificación de esta variable en el caso de Bogotá, adicionalmente a la grabación de los videos se realizó una toma de tiempos de arribo con la aplicación EON (Ver Ilustración 14). Esta variable en el estudio de campo se obtuvo demarcando un punto de ingreso al segmento de ciclo-ruta (Ver Ilustración 15), el cual se mantuvo a la misma distancia durante los dos días de grabación.

Ilustración 14. Aplicación EON



Fuente: Google Play Store

Ilustración 15. Demarcación ingreso al segmento de ciclo-ruta



Fuente: El Autor



- **Comportamientos:** En el caso de Bogotá y de acuerdo al trabajo de campo realizado se pudieron identificar tres principales comportamientos los cuales se muestran en la Tabla 9. Algunos de estos comportamientos se reflejan en la literatura existente, y otros no se han abordado hasta el momento en estudios de carácter microscópicos.

*Tabla 9. Tipos de comportamientos observados*

<b>Sobrepaso con invasión de carril</b>	<b>Circulación en dos carriles</b>	<b>Sobrepaso con invasión de andén</b>
		

**Fuente: El Autor**

- **Ancho de Carril:** En el caso de Bogotá y particularmente en el segmento de ciclo-ruta seleccionado se identifica un ancho de carril de 1.25 m. para un total del ancho de la ciclo-ruta de 2.5 m.
- **Intersección:** En el anterior apartado se identificó que se han realizado estudios que incluyen las intersecciones en las ciclo-rutas, en el caso del Tintal existe un cruce semaforizado que se debe tener en cuenta dado el impacto que este puede generar en la capacidad de una ciclo-ruta.

Hasta acá se han abordado las variables, comportamientos y parámetros observados tanto en la literatura como en el estudio de campo realizado, y es desde este punto que se parte para el diseño y construcción del modelo de simulación basado en agentes.

### **6.3 MODELO DE SIMULACIÓN BASADO EN AGENTES**

Como se pretende en esta investigación proponer un método para la medición de la capacidad de una ciclo-ruta, involucrando aspectos de amplio uso y conocimiento en el campo de la ingeniería industrial y específicamente en la gestión de producción, se hace necesaria la verificación empírica del posible uso de lo aquí propuesto.

Se reconoce que los fenómenos de comportamiento de los individuos y sus interacciones pueden afectar el cálculo de la capacidad y que la principal diferencia con los sistemas productivos radica en el comportamiento autónomo de las personas que transitan por la ciclo-ruta, en contraste con los productos que se procesan, los cuales son inanimados y carecen de raciocinio. Sin embargo, a pesar de estas características, los productos pueden tomar “decisiones” y tener interacción con otros componentes dinámicos o no de los sistemas. Dichos comportamientos definen los procesos y/o las operaciones que se dan en el sistema en el que están inmersos, pero no son adaptativos según la evolución del mismo. Por ejemplo, un producto puede tener una ruta probabilística, pero comúnmente no tienen preferencias o creencias asociadas o que se vean afectadas por los comportamientos o creencias de los demás componentes del sistema.

Así las cosas, para la representación y el análisis de los sistemas productivos, cuando se requiere tener cierto detalle y hacer la menor cantidad posible de supuestos sobre el sistema, usualmente se hace uso de simulación discreta (DES- *Discrete Event Simulation*), ya que los cambios de estado

del sistema se dan de manera discreta, aunque determinados de forma aleatoria. Estos cambios son claramente identificables desde el inicio de la simulación y se pueden representar a través de modelos matemáticos, pero lo que se desconoce es en qué momento exacto del tiempo se van a dar.

En el caso de esta investigación, dado que los biciusuarios son autónomos y pueden tomar decisiones dependientes tanto del estado del sistema, como de las decisiones, deseos y creencias propias y de los demás, la representación de los comportamientos a través de modelos matemáticos se hace más compleja, debido a la cantidad de variables que puede tomar en cuenta cada agente para tomar sus decisiones.

Si bien es cierto que la complejidad depende de los intereses del modelador, se debe tener en cuenta que los cambios de estado del sistema se pueden dar continuamente, es decir, que la observación que se requiere no necesariamente va a ser interesante en instantes discretos, sino que lo será en instantes “continuos”, es decir, con deltas de tiempo muy cortos, que permitan observar las emergencias que se dan en el sistema y no solo medidas promedio en el periodo de tiempo observado. Cuando se tiene este tipo de interés, lo más conveniente es usar técnicas de simulación basada en agentes (*ABS- Agent based simulation*).

Los modelos tradicionales se basan en el principio de causalidad de la mecánica clásica o física de Newton, de acuerdo con el cual es posible deducir la evolución del sistema teniendo en cuenta las condiciones iniciales de éste, lo que los convierte en modelos con un enfoque reduccionista y determinista (Susatama, Cepeda Ruiz, & Durango Arévalo, 2017). Las principales diferencias entre los modelos ABS y los modelos DES, son las siguientes (Siebers P. , Macal, Garnett, Buxton, & Pidd, 2010):

Tabla 10. Principales diferencias entre ABS y DES

SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES	SIMULACIÓN DISCRETA
Es principalmente utilizada para abordar temas de complejidad, la emergencia y la no linealidad de los fenómenos sociales, intentando explicarlos desde la acción de los individuos	Es principalmente utilizada para la representación de procesos, operaciones o flujos
Se basa en los individuos (enfoque de modelado ascendente); el foco está en modelar las entidades y las interacciones entre ellas	Orientado a procesos (enfoque de modelado de arriba hacia abajo); el foco está en modelar el sistema en detalle, no las entidades
Enfoque de modelado de abajo hacia arriba	Enfoque de modelado de arriba hacia abajo
Control descentralizado	Control centralizado
Las entidades son de carácter activo, es decir, las entidades mismas pueden tomar la iniciativa de hacer algo; la inteligencia está representada dentro de cada entidad individual	Entidades pasivas, es decir, las entidades se comportan de acuerdo al flujo del sistema; la inteligencia (por ejemplo, la toma de decisiones) se modela como parte del sistema
No hay concepto de colas	Las colas son un elemento clave
No existe el concepto de flujo; el comportamiento macro es modelado y éste surge de las micro decisiones de los agentes	Existe el concepto de flujo de entidades a través de un sistema; el comportamiento macro es modelado
Las distribuciones de entrada a menudo se basan en teorías o datos subjetivos.	Las distribuciones de entrada a menudo se basan en datos recopilados / medidos

**Fuente:** (Siebers P. , Macal, Garnett, Buxton, & Pidd, 2010). **Elaborado:** El Autor.

Estas diferencias llaman la atención sobre un aspecto fundamental en ABS, que son las características de los agentes a analizar. “Las características clave de agentes, ampliamente entendidas en diferentes literaturas, indican que son entidades de software altamente autónomas, proactivas, situadas y dirigidas. Otras características como la movilidad son opcionales y crean un subtipo especial de agentes” (Luck, Ashri, & d'Inverno, 2004). Por otro lado, los modelos ABS son principalmente utilizados para abordar temas de complejidad, la emergencia y la no linealidad de los fenómenos sociales, intentando explicarlos desde la acción de los individuos (Agentes



sociales heterogéneos) y su interacción tanto con ellos mismos como con el entorno, los agentes son capaces de mostrar un comportamiento proactivo (Las acciones dependen de las motivaciones generadas desde su estado interno).

Otra característica es la toma de decisiones de manera simple basados en la información local y no global, siendo parte de un sistema descentralizado y auto organizado, en el cual cada tipo o raza de agente cumple con unas reglas de comportamiento individual (García-Valdecasas Medina, 2011). Un agente también es capaz de adaptarse, aprender y realizar cambios en su respuesta de la interacción con los demás agentes y su entorno (Macal & North, 2005). En otras palabras, ABS permite modelar los sistemas de interés del mundo real de formas que no eran posibles o que no se adaptaban fácilmente utilizando técnicas de modelado tradicionales, como DES o dinámica de sistemas (SD) (Siebers P. , Macal, Garnett, Buxton, & Pidd, 2010).

Los modelos ABS cobran importancia cuando el objetivo es modelar los comportamientos de los individuos en una población diversa, en el caso de las ciclo-rutas se espera en investigaciones futuras incluir más comportamientos y tipos de agentes que ayuden a entender de una mejor forma el impacto de esta diversidad en la capacidad de una ciclo-ruta. Por otra parte, también son útiles cuando los agentes individuales requieren tener aspectos espaciales o geoespaciales de sus comportamientos (por ejemplo, los agentes se mueven sobre un paisaje) (Siebers P. , Macal, Garnett, Buxton, & Pidd, 2010), para ampliación del modelo ABS que se espera realizar en futuras investigaciones esta característica cobra importancia al analizar todo un sistema de ciclo-rutas de una ciudad.

Finalmente, otro aspecto fundamental de los ABS, es la posibilidad de la experimentación con estos, dado que permiten aislar virtualmente fenómenos sociales, explicando a un nivel macro

comportamientos de carácter social que son generados por interacciones a un nivel micro (García-Valdecasas Medina, 2011). Así mismo, existen distintos tipos de modelos ABS, particularmente para esta investigación se escogió el empírico, el cual busca la reproducción con un alto grado de exactitud de algunas características principales del fenómeno social objeto de estudio, buscando realizar predicciones sobre dicho fenómeno o también predecir los cambios generados al modificar parámetros o variables (Gilbert, 2008). En este tipo de modelo se busca validar que los datos de salida sean altamente representativos del fenómeno a estudiar, con lo cual es posible realizar predicciones plausibles (Susatama, Cepeda Ruiz, & Durango Arévalo, 2017).

### 6.3.1 Diseño del modelo

Para el diseño del modelo de simulación basado en agentes se tomó como base la metodología definida por (Grimm, et al., 2006), denominada *Overview, Design concepts, and Details* (ODD), esta metodología se basa en siete componentes principales los cuales a su vez, se pueden agrupar en tres conjuntos, (Ver Tabla 11).

Tabla 11. Componentes de la Metodología ODD

<b>Visión General</b>	Propósito
	Variables de estado y nivel
	Resumen del proceso y programación
<b>Conceptos de diseño</b>	Conceptos de diseño
<b>Detalles</b>	Inicialización
	Entradas
	Submodelos

Fuente: A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. Elaborado por: (Grimm, et al., 2006)

En la Tabla 12, se describe cuál es el objetivo de cada uno de estos componentes en la construcción del modelo basado en agentes.

Tabla 12. Descripción componentes metodología ODD

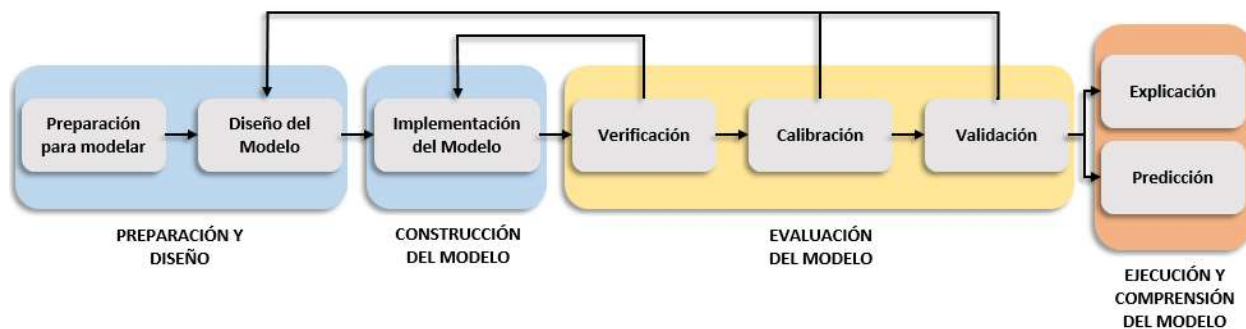
COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Propósito	Es aquí donde se informa por qué se necesita construir el modelo y de una manera general qué se va a hacer con éste.
Variables de estado y nivel	<p>Se identifica cual es la estructura del sistema que se representará en el modelo, describiendo las entidades que lo componen a un nivel micro, así como distintos niveles jerárquicos que puedan existir. Aquí también se define el espacio y tiempo donde funciona el sistema.</p> <p>Las variables de estado hacen referencia a los atributos que tiene cada agente y el entorno con el cual también interactúa.</p>
Resumen del proceso y programación	<p>En este componente se describen los distintos procesos que hacen parte del modelo, así como su respectivo orden.</p> <p>Se realiza una breve descripción sobre la programación principalmente apoyada en diagramas de flujo.</p>
Conceptos de diseño	<p>Existen conceptos claves de diseño que se esperan observar en cualquier modelo de simulación basada en agentes, que son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Emergencia</u>: Qué fenómenos emergen de la interacción individual de los agentes con ellos mismos o con el entorno, y cuáles se imponen.</li> <li>• <u>Adaptación</u>: Son aquellos rasgos que tienen los individuos que les permiten directa o indirectamente mejorar su condición física potencial, con los cambios en ellos o el entorno.</li> <li>• <u>Condición de mejora</u>: Los agentes buscan mejorar una condición u otro tipo de objetivo.</li> <li>• <u>Predicción</u>: Cómo predicen los agentes las condiciones futuras de acuerdo a las decisiones que estos toman.</li> <li>• <u>Percepción</u>: Qué variables de estado interno y de entorno perciben o conocen los agentes y que deben considerar al momento de tomar una decisión.</li> <li>• <u>Interacción</u>: Cuáles son las interacciones que tienen los agentes ya sea con ellos mismos, otros agentes o el entorno.</li> <li>• <u>Estocasticidad</u>: Se define si alguna parte del modelo es estocástica y el porqué.</li> <li>• <u>Colectividad</u>: Se debe revisar si los agentes conforman algún tipo de colectividad</li> <li>• <u>Observación</u>: En este apartado se describe cómo se recolecta la información en el modelo para su comprobación, comprensión y análisis.</li> </ul>
Inicialización	En la inicialización se define cómo se crean los agentes y el entorno al inicio de la simulación, así como también cuáles son los valores iniciales que asumen las variables de interés definidas en el modelo. Es aquí, donde también se especifica si el inicio entre simulaciones es el mismo o tuvo alguna variación entre éstas. Por

	último, se describe si los valores iniciales son basados en datos o se escogieron arbitrariamente.
Entradas	Dado que las condiciones sobre las cuales se diseñan los modelos pueden cambiar a través del tiempo, se hace necesario conocer cuáles son los datos de entrada, cómo se obtuvieron y cómo se pueden generar. Lo anterior con el fin de garantizar la replicabilidad del modelo.
Submodelos	En este apartado se busca realizar una explicación detallada de las ecuaciones y reglas definidas para el modelo de una manera textual.

**Fuente:** A standard protocol for describing individual-based and agent-based models, (Grimm, et al., 2006). . **Elaborado por:** El Autor

Una vez definida la metodología a seguir se plantearon las siguientes etapas para la construcción y validación del modelo:

*Ilustración 16. Etapas construcción y validación del modelo*



**Elaborado por:** El Autor

### 7.3.1.1. Propósito

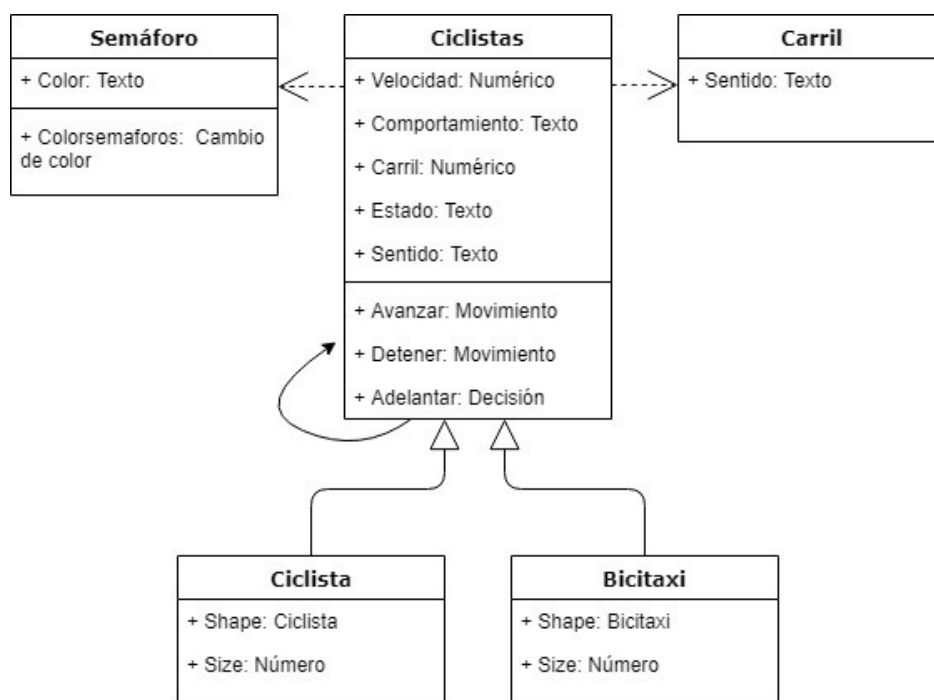
El propósito principal de este modelo es poder realizar las mediciones de capacidad propuestas, en el cual se reflejen los principales comportamientos observados en el tramo de la ciclo-ruta objeto de estudio. Adicionalmente, con el modelo se realizarán experimentaciones sobre los posibles

cambios en los comportamientos de los individuos y los impactos que estos pueden tener en la capacidad de la ciclo-ruta.

### 7.3.1.2. Variables de estado y nivel

En esta apartado se define inicialmente cuáles tipos de agentes harán parte del modelo, así como sus clases, atributos y procesos. Para ello, se utiliza el *Unified Modeling Language* (UML) y la herramienta en línea draw.io, (Ver Ilustración 17).

*Ilustración 17. Descripción Agentes*



**Fuente y Elaboración: El Autor.**

Para el modelo se definen tres tipos de agentes de los cuales a continuación se hará una explicación de los atributos y procesos definidos para cada uno de ellos:

**Ciclistas:** Es el principal agente del modelo y presenta interacción con él mismo y con el medio para la toma de decisiones, en la ilustración 24, adicionalmente se muestran las dos clases definidas

para este agente las cuales tienen los mismos procesos con una variación en sus atributos de forma (*Shape*) y tamaño (*Size*).

- Velocidad: Estos agentes cuentan con una velocidad 3.08 m/s y una desviación estándar 0.83 m/s, basado en el estudio realizado por Ren, Jiang, Chen, Huang, & Lu, (2016),
- Comportamiento: Para la definición del comportamiento se tomaron como base las grabaciones realizadas en los dos días de trabajo de campo y se realizó el conteo de las personas que presentaban un comportamiento intrépido, tal como, sobrepaso con invasión de carril, circulación en dos carriles y sobrepaso con invasión de anden; versus las personas que permanecen dentro del carril presentando un comportamiento prudente, obteniendo como resultado los datos registrados en la Tabla 13.

*Tabla 13. Comportamiento ciclistas*

COMPORTAMIENTO	Q	%
PRUDENTE	1936	64,0%
INTRÉPIDO	1089	36,0%
<b>TOTALES</b>	<b>3025</b>	<b>100%</b>

Fuente: El Autor

- Carril: El carril es asignado de acuerdo con el sentido en el cual va el ciclista, este atributo permite la interacción del ciclista con el carril de ciclo-ruta en el cual nace, dado que sin importar el comportamiento presentado por los ciclistas todos tienden a conservar el lado derecho para su circulación en la ciclo-ruta. Aquellas personas que presentan alguno de los comportamientos intrépidos anteriormente descritos también tienden a volver al carril sobre el que deberían transitar.
- Estado: En este atributo se define en cuál estado se encuentra el agente de acuerdo con el momento de simulación en que se encuentra, es decir, si está en movimiento o detenido.

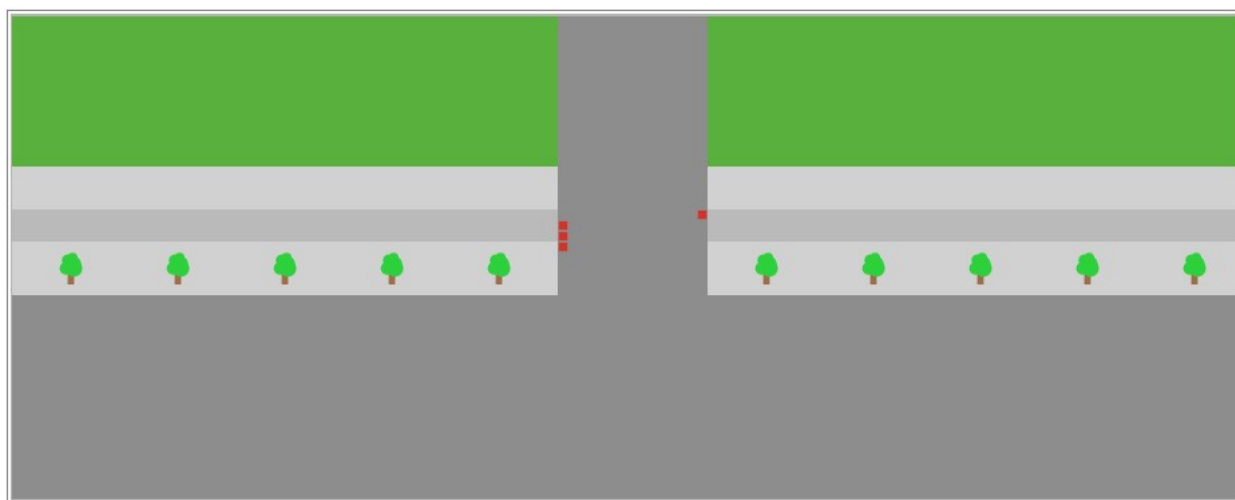
- **Sentido:** El sentido es una variable binaria definida de acuerdo al lugar del espacio donde nace el agente, y el cual define el sentido de circulación ya sea norte-sur o sur-norte.
- **Avanzar:** Este proceso permite el avance en cada tick de simulación del agente de acuerdo a la velocidad y lugar en el que nace en el entorno de simulación.
- **Detener:** Los agentes sin importar el tipo de comportamiento que presentan deben detenerse en la intersección, como también en el momento que interactúan con otros agentes que tienen una distinta velocidad toman la decisión entre frenar o adelantar con alguno de los comportamientos anteriormente descritos.
- **Adelantar:** Es en este proceso donde los agentes toman la decisión principal entre adelantar o no de acuerdo con su interacción con los demás agentes, esta decisión está ligada también con su necesidad de permanecer en el carril de origen conservando de la misma forma el sentido con el cual nacen en el entorno de simulación.

**Semáforo:** Este agente tiene como fin principal la interacción de los ciclistas con el entorno ya que regula el tiempo durante el cual los ciclistas están detenidos en la intersección y posteriormente el tiempo durante el cual pueden pasar en la intersección. De acuerdo con las mediciones realizadas durante los días de trabajo de campo se determinó que el tiempo del semáforo en rojo es 168 segundos, mientras que en verde su duración es de 23 segundos.

**Carril:** Este agente representa la interacción con el entorno que existe entre el carril y el usuario de la ciclo-ruta, en el trabajo de campo realizado se observó cómo los ciclistas siempre tienden a permanecer en su respectivo carril así realicen adelantos con invasión de carril o anden. De acuerdo con este comportamiento, cada patch que compone un carril adquiere un atributo de sentido con el cual el agente ciclista tiene una interacción.

Adicionalmente a la descripción de los agentes, es preciso ilustrar el espacio y tiempo en el cual se ejecuta el modelo de simulación. Para la construcción del ambiente se tuvieron en cuenta las longitudes de los segmentos de ciclo-ruta, así como el ancho de la vía por la cual deben atravesar los ciclistas y los espacios destinados para el tránsito de peatones, teniendo como resultado el entorno que se muestra en la Ilustración 18.

*Ilustración 18. Entorno de simulación*



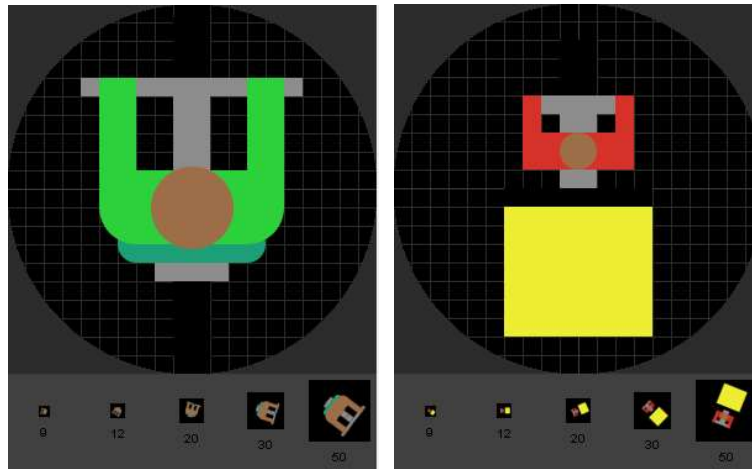
**Elaborado por: El Autor**

Por último, la longitud de la corrida para este modelo está definida por el tiempo de hora pico analizado en el trabajo de campo realizado, es importante aclarar que es necesario primero tener una estabilidad del sistema lo cual ocurre inmediatamente después del primer ciclo del semáforo en rojo, desde este punto se realizan las distintas mediciones teniendo en cuenta el tiempo definido de 3.600 segundos.

Una vez definido y realizado el entorno, se procede con la elaboración de las tortugas (*Shape*) empleadas en la simulación, dado que las características físicas de los ciclistas en cuanto al largo de su vehículo no motorizado fue definido en 2 m, basados en las medidas encontradas en la literatura (Li, Wang, Liu, Bigham, & Ragland, 2013), (Ver Ilustración 19).



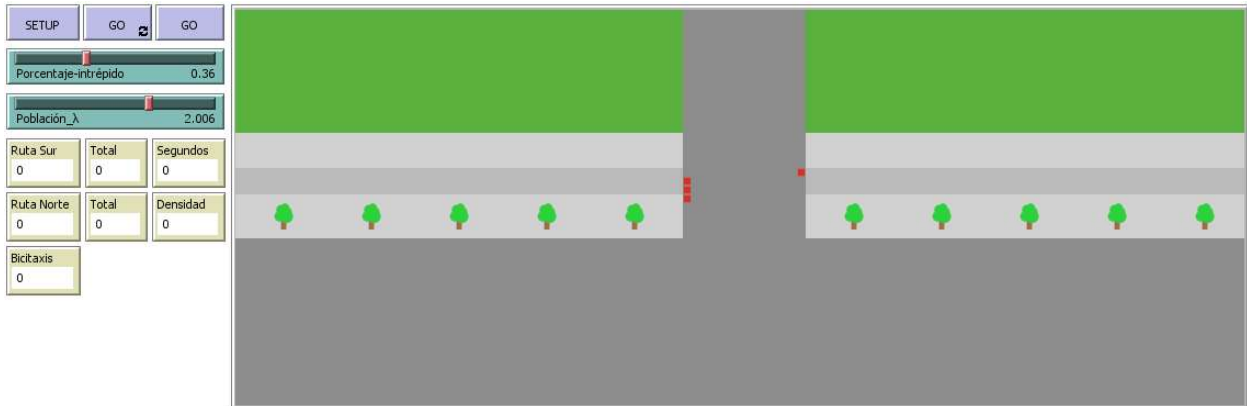
Ilustración 19. Tortugas modelo de simulación



Elaborado por: El Autor

Finalmente, en el entorno de simulación se incluyen los controles del modelo, así como los sliders que serán parte de los escenarios propuestos para el análisis sobre la influencia del comportamiento de los agentes en el cálculo de la capacidad de una ciclo-ruta. También se incluyen los monitores en los cuales se harán las mediciones tanto para la validación del modelo, como el cálculo de la capacidad en cada una de las corridas que se realizan, (Ver Ilustración 20).

*Ilustración 20. Ambiente de simulación completo*

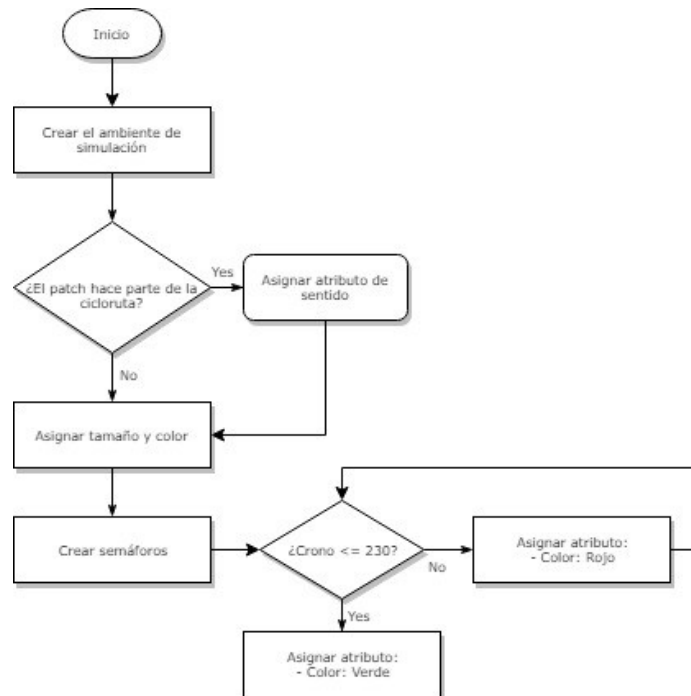


**Elaborado por: El Autor**

### 7.3.1.3. Resumen del proceso de programación

Para comenzar el proceso se realiza la creación del ambiente de simulación y posteriormente se crean los agentes asociados a los patches que son semáforos y carril, como se muestra en el diagrama de flujo de la Ilustración 21.

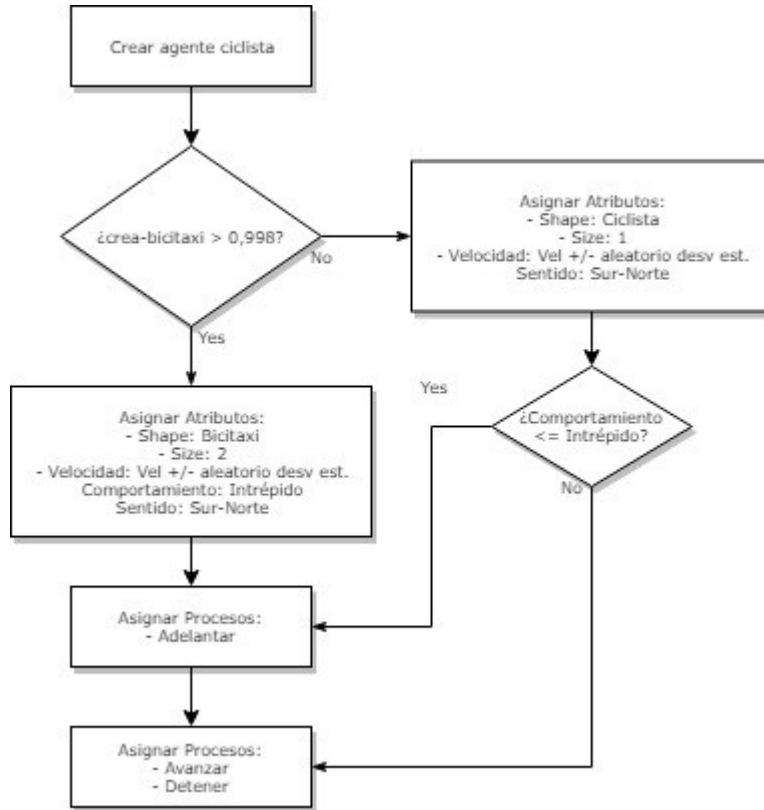
*Ilustración 21. Diagrama de flujo creación del ambiente de simulación*



**Elaborado por: El Autor**

Siguiendo con el proceso de programación a continuación se crean los agentes ciclistas y se realiza la asignación de sus respectivos atributos y procesos como se observa en la Ilustración 22.

*Ilustración 22. Diagrama de flujo creación agentes ciclistas*



**Elaborado por: El Autor**

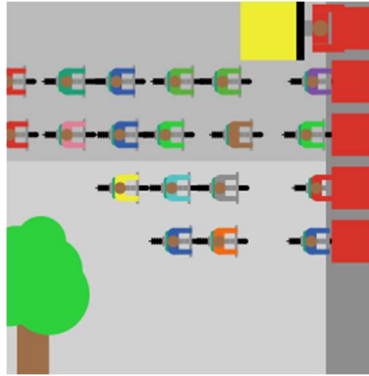
Adicional a la descripción general del proceso de programación del modelo, en el Anexo 3, se encuentra el código usado en NetLogo.

#### 7.3.1.4. Conceptos de diseño

A continuación, se describen los conceptos de diseño que fueron incluidos dentro del modelo:

- **Emergencia:** El principal fenómeno emergente que se presenta en el modelo es el adelanto de los agentes el cual lo hacen generando una doble fila en el mismo carril, con invasión de carril contrario o invasión de la zona de tránsito peatonal (Ver Ilustración 23).

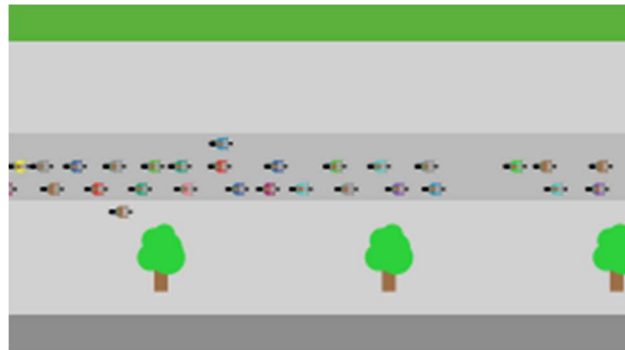
Ilustración 23. Comportamientos emergentes de adelanto



Elaborado por: El Autor

- Adaptación: Particularmente en el modelo la adaptación de los agentes se presenta con la necesidad de mantener su velocidad generando comportamientos emergentes de adelanto de acuerdo con la interacción que tienen con ellos mismos o con el entorno. De la misma forma, se observa que los agentes tienden a mantener su carril (lo cual también se observó en el trabajo de campo), por lo cual intentan constantemente volver al carril de ciclo-ruta por el cual deben circular de acuerdo con el sentido asignado tanto al carril como al agente una vez realizan los adelantos, (Ver Ilustración 24).

Ilustración 24. Adaptación de los agentes



Elaborado por: El Autor

- Condición de mejora: La condición de mejora principal para una persona que transita en una ciclo-ruta se traduce en generar el mayor desplazamiento con el menor consumo de energía posible, esta condición la obtiene el agente en el modelo con la no pérdida de velocidad.
- Predicción: El agente tiene tres alternativas de decisión en el momento en el que interactúa con otro agente que transita por el mismo tramo y sentido de carril a una velocidad inferior a la que posee éste. Tiene la posibilidad de frenar disminuyendo e igualando la velocidad del agente que se encuentra delante de él, puede realizar un adelanto invadiendo el carril del sentido contrario de la ciclo-ruta o adelantar invadiendo la zona de tránsito peatonal.
- Percepción: El ciclista cuenta principalmente con la asignación de las variables de comportamiento, carril y sentido; con las cuales tiene una interacción tanto con su misma clase de agente como con el entorno. Con relación a su comportamiento, el agente percibe si es principalmente prudente o intrépido para la toma de decisiones cuando existe interacción con un agente que circula a una menor velocidad, para esta misma toma de decisión el agente cuenta con las variables de sentido y carril con las cuales interactúa con el entorno, más específicamente los patches que hacen parte del carril de ciclo-ruta por el cual debería circular habitualmente.

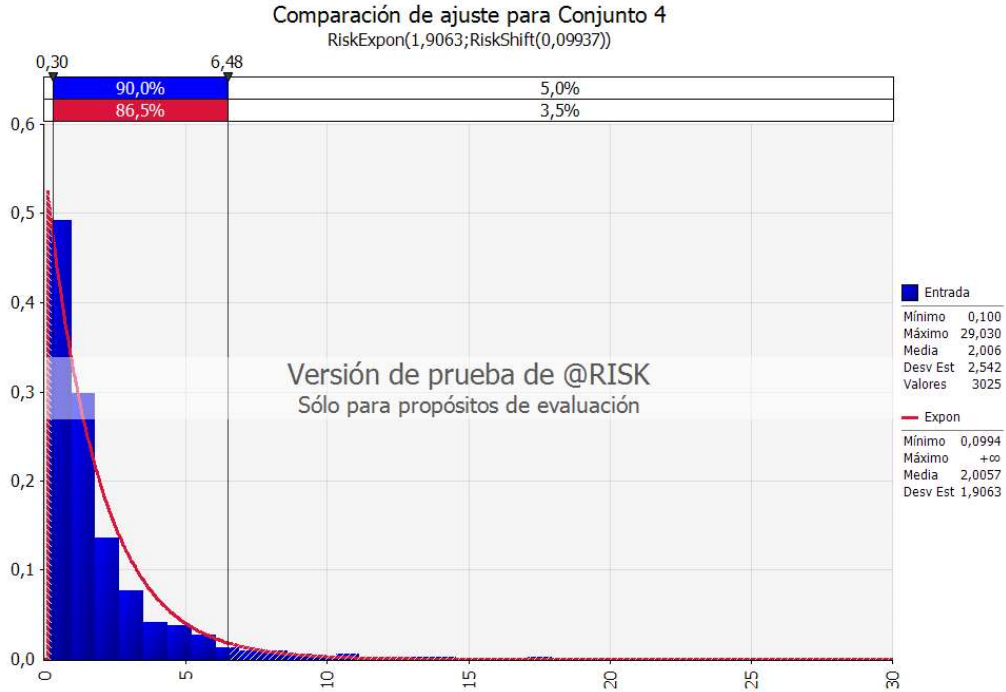
- Interacción: Las principales interacciones que tienen los agentes ciclistas es con ellos mismos al momento de encontrarse en el carril de ciclo-ruta por el cual circulan, como también la interacción que tienen con el entorno que es tanto el carril de ciclo-ruta como el semáforo que se encuentra en la intersección.
- Estocasticidad: Dentro del modelo se incluye la distribución de probabilidad con la cual arriban los agentes al segmento de ciclo-ruta objeto de estudio, la cual se explica a detalle en la sección de datos de entrada.
- Colectividad: Para este modelo en particular no se observa la generación de alguna colectividad.
- Observación: En este modelo se recolecta principalmente información de dos variables de interés las cuales son la densidad de población en el segmento del semáforo en rojo, cuyo objetivo es la validación estadística del modelo. Como también se recolecta información sobre la cantidad de ciclistas que circulan por el segmento de ciclo-ruta objeto de estudio lo cual nos da la medición de capacidad de acuerdo con la medición propuesta.

#### *7.3.1.5. Inicialización*

Para la inicialización del modelo se comienza con la definición de los agentes, las variables únicas de estos y las variables globales, las cuales se pueden observar en el Anexo 3.

Ahora bien, para la creación de los agentes se tuvo en cuenta la variable de tiempos de arribo que como se indicó anteriormente se realizó con la ayuda de la aplicación EON para la toma de tiempos y los datos recogidos fueron analizados obteniendo como resultado la información mostrada en la Ilustración 25. Para la realización de este análisis de entrada se utilizó el software en versión de prueba RISK:

Ilustración 25. Análisis de entrada variable de arribos



**Fuente: Datos de arribo aplicación EON. Elaborado por: El Autor**

De acuerdo con la anterior información, para los tiempos de arribo se define para los ciclistas una distribución exponencial de  $\lambda = 2,006$ . Las pruebas para la validación de esta variable se encuentran en el Anexo 2.

### 7.3.1.6. Entradas

Los datos de entrada de este modelo se obtuvieron con el trabajo de campo explicado anteriormente y a través del documento se especifican cuáles son los valores con los cuales se trabaja el modelo, así como su obtención o base teórica.

### **6.3.2 Validación del modelo**

Los análisis de salida son necesarios para la verificación y validación de cualquier modelo de simulación. Mediante la verificación se busca determinar qué aspectos importantes del modelo, tales como, longitud de la corrida y número de réplicas; sean representativos de acuerdo al nivel de confianza determinado con anterioridad. Por otra parte, la validación consiste en la evaluación de los resultados obtenidos por el modelo contra los datos históricos, adicionalmente también se avalúan los escenarios propuestos garantizando la diferencia que debe existir entre estos y el modelo base.

#### **6.3.2.1 Medidas de desempeño**

La correcta elección de las medidas de desempeño es un aspecto muy importante en la simulación, dado que de estas medidas dependerá la evaluación del sistema, es por lo anterior y teniendo en cuenta las limitantes del software utilizado que se hace necesario medir la cantidad de usuarios por carril en el segmento de ciclo-ruta a analizar en el espacio de tiempo del semáforo en rojo. La elección de esta medida de desempeño se basa en que para la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM), la longitud de cola en el ciclo de semáforo en rojo es uno de los mayores indicadores de movilidad, ya que en ciclo-rutas de acuerdo al trabajo de campo realizado no es fácilmente identificable un tamaño de cola, se define el número de personas que se encuentra en espera en el segmento de ciclo-ruta a analizar en el espacio de tiempo que el semáforo se encuentra en rojo.

Las variables definidas para el modelo y el comportamiento de los agentes tienen un impacto directo en esta medida de desempeño, razón por la cual es una medida claramente representativa del sistema, y de acuerdo con los resultados obtenidos en los escenarios se obtendrá información que sirva como base importante para la toma de decisiones.



### 6.3.2.2 Número de réplicas

Para la definición del número de réplicas necesarias se realiza una premuestra de 10 réplicas y se registran los valores medios de la cantidad de personas en espera en el ciclo de semáforo en rojo, como se muestran en la Tabla 15. Para la realización del cálculo se toma la relación encontrada en (García, García, & Cárdenas, 2006):

$$N = \left[ \frac{S}{\epsilon} \left( t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \right) \right]^2$$

Donde,

$S$  : Desviación estándar de la premuestra

$\epsilon$  : Nivel de precisión

$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$  : Valor crítico en la tabla T de student con  $\frac{\alpha}{2}$  y  $n-1$  grados de libertad.

*Tabla 14. Resultados réplicas iniciales*

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Q promedio de usuario por ciclo</b>	67,36	63,77	66,18	67,04	66,00	64,5	64,27	65,95	69,27	63,23

Fuente: El Autor

De acuerdo con los resultados obtenidos en las primeras 10 réplicas, se definen los valores registrados en la Tabla 14, obteniendo como resultado un total de 15 réplicas

*Tabla 15. Cálculo de número de réplicas*

Variables	Valores
N	10
$\epsilon$	0,01
T	2,26
S	1,8546
<b>N</b>	<b>14,4057</b>

Fuente: El Autor

### 6.3.2.3 Validación

Después de realizar las 15 réplicas, se realiza la validación de si el modelo de simulación efectivamente representa el sistema objeto de estudio, para esta validación se toma como base las observaciones realizadas en los videos frente a los resultados obtenidos entre las réplicas realizadas de la medida de desempeño definida. Para realizar dicha validación se hace uso del intervalo de confianza, por lo tanto, si el valor promedio de usuarios que se registraron en los vídeos del trabajo de campo está dentro de dicho intervalo se acepta la hipótesis nula de que el modelo representa al sistema. En las Tabla 16., se muestran los resultados obtenidos de las 15 réplicas.

*Tabla 16. Resultados réplicas*

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Q promedio de usuario por ciclo</b>	67,4	63,8	66,2	67,0	66,0	64,5	64,3	66,0	69,3	63,2	66,7	63,6	67,4	69,0	62,6

**Fuente: El Autor**

De acuerdo con los resultados obtenidos se procede a realizar el cálculo del intervalo de confianza, como se observa en la Tabla 17.

*Tabla 17. Resultado intervalo de confianza modelo base*

<b>Intervalo de Confianza</b>	
Media	65,78181818
Desv. Est.	2,062712191
T	1,645
L. Inferior	65,57757386
L. Superior	65,98606251

**Fuente: El Autor**

Dado que el valor promedio obtenido de las observaciones realizadas en el trabajo de campo es de 65,68; no se rechaza la hipótesis nula por la cual el modelo y el sistema representan el mismo comportamiento y población.

Para la validación de un modelo basado en agente también es importante que se presenten los compartimientos emergentes que se observan en el sistema real (García-Valdecasas Medina, 2011), de acuerdo con lo observado en los conceptos de diseño del modelo se garantiza que el modelo si representa el sistema.

## **7. ANÁLISIS DE CAPACIDAD**

---

### **7.1 CÁLCULO DE CAPACIDAD**

En este capítulo se realizan las mediciones de capacidad propuestas teniendo como base el modelo de simulación basado en agentes.

#### **7.1.1 Cálculo de capacidad instalada**

Una vez realizado el modelo de simulación basado en agentes se procede a realizar la validación de la propuesta sobre el cálculo de capacidad, se realiza el cálculo de la capacidad instalada, para esta primera parte se realiza la selección del segmento de ciclo-ruta que se observa en la Ilustración 26.

Ilustración 26. Segmento de ruta seleccionado



Fuente: NetLogo. Elaborado por: El Autor

Para el cálculo de la capacidad instalada de este segmento de ciclo-ruta se toma la fórmula propuesta, lo primero que se debe definir es el periodo de tiempo a evaluar, dado que el estudio de campo fue realizado en la hora pico comprendida entre las 6 am y las 7 am, el periodo de tiempo en segundos equivaldrá a 3.600. Ahora bien, el tiempo de paradas programadas para este segmento de ciclo-ruta hace referencia al tiempo total que dura este semáforo en rojo impidiendo el desplazamiento de los ciclistas el cual para este caso es la multiplicación del tiempo que dura el semáforo en rojo por la cantidad de veces que este permanece en ese estado en una hora. De acuerdo con lo anterior se procede a realizar el cálculo:

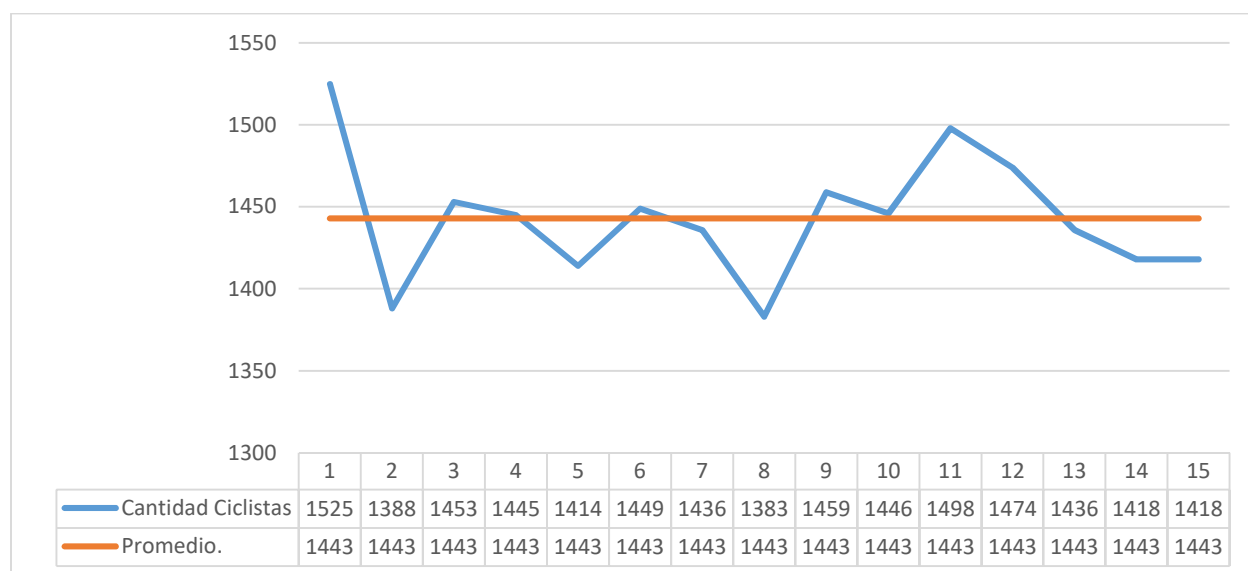
$$CI = \frac{3600 - 3024 \frac{50}{3.08}}{\frac{2}{3.08}} + 1 = 863$$

Para el segmento de ciclo-ruta analizado la capacidad instalada es de 863 ciclistas/hora, analizando los resultados obtenidos contra el estudio de campo realizado se observa que la capacidad instalada en este segmento de ciclo-ruta no es suficiente para la cumplir con la cantidad de usuarios que habitualmente se desplaza por esta ruta.

### 7.1.2 Cálculo de capacidad utilizada

De acuerdo con los métodos de cálculo de capacidad vehicular estudiados se realiza una primera aproximación al cálculo de la capacidad utilizada de una ciclo-ruta de esta misma forma, para ello se utilizó un monitor que cuenta la cantidad de ciclistas que circulan por el segmento de ciclo-ruta definido para la medición de la capacidad en un periodo de tiempo de 3600 segundos. Después de realizar 15 réplicas sobre el modelo se obtuvieron los siguientes resultados:

*Ilustración 27. Medición de capacidad por método vehicular*



**Elaborado por: el Autor**

En promedio durante un espacio de tiempo de 3600 segundos por este segmento de ciclo-ruta circulan 1443 ciclistas. Es importante aclarar que estos ciclistas dependiendo su tipo de comportamiento invaden el carril contrario y zonas peatonales para poder avanzar y no perder su velocidad.

## **7.2 INFLUENCIA DE LOS COMPORTAMIENTOS EN LA CAPACIDAD**

En este capítulo se busca analizar sobre el modelo base planteado la influencia del comportamiento de las personas que se desplazan en vehículos no motorizados sobre el uso de la capacidad de una ciclo-ruta, para ello, se establecen dos escenarios de prueba basados en los dos comportamientos identificados durante la realización del trabajo de campo.

### **7.2.1 Aumento en el comportamiento intrépido**

Para este escenario se pretende medir el impacto que tiene el comportamiento intrépido de los ciclistas en la capacidad de una ciclo-ruta, para esto se plantea el incremento en la proporción de la cantidad de agentes que presentan un comportamiento intrépido en el modelo base de simulación. De acuerdo con lo observado en el trabajo de campo el comportamiento intrépido se presenta en un total del 36% de la población observada, para la realización de este escenario se plantea contar con 99% de la población intrépida, el 1% restante es el agente definido como Bicitaxi, el cual presenta un comportamiento intrépido para el total de su población con la particularidad de que actualmente son vehículos motorizados que están circulando por la ciclo-ruta.

Al igual que en modelo base se toma la medida de desempeño definida para realizar la comparación de los escenarios con el base, para esto se utiliza el Test T para datos pareados, el criterio de decisión se relaciona directamente con los intervalos, cuando entre dichos intervalos está contenido el valor 0, se afirma que son escenarios iguales de acuerdo con la medida de desempeño utilizada, así mismo, si el intervalo no contiene el valor 0, se afirma que los escenarios son diferentes. A continuación, se presentan los resultados obtenidos entre el modelo base y el escenario propuesto con un mayor comportamiento intrépido por parte de los usuarios de la ciclo-ruta:

*Tabla 18. Prueba T escenario intrépido*

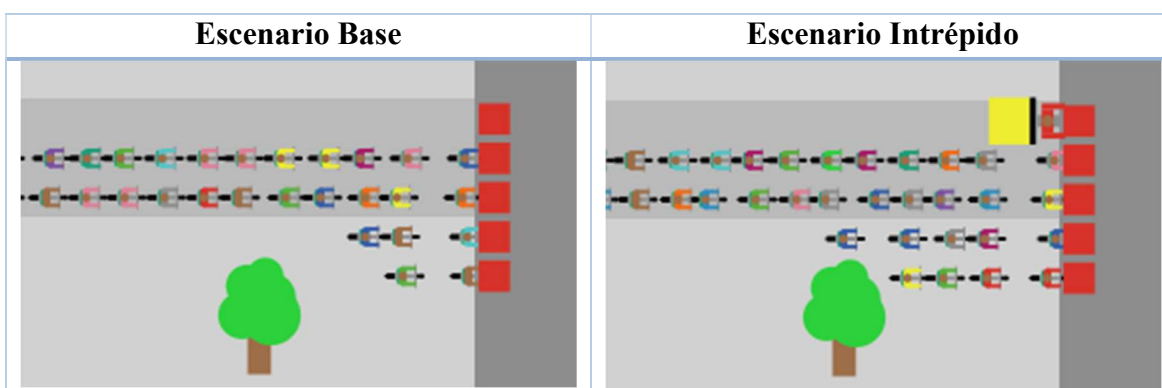
<b>Intervalo de Confianza</b>	
Media	-0,160606061
Desv. Est.	2,937456406
T	1,645
L. Inferior	-0,451465251
L. Superior	0,13025313

Fuente: El Autor

Según los resultados obtenidos los modelos de acuerdo a la medida de desempeño planteada son iguales. La razón de la similitud en los modelos radica en que, aunque hay un incremento en la invasión de la zona peatonal y el carril de sentido contrario, la cantidad de usuarios en espera durante el ciclo de semáforo rojo no tiene una variación.

Sin embargo, durante la realización de las réplicas para el escenario propuesto se observó que el comportamiento emergente de la invasión de la zona peatonal presentó un incremento entre el 30% y 40%, sobre lo observado en el modelo base, (Ver Ilustración 28).

*Ilustración 28. Aumento en invasión de zona peatonal*



Fuente: NetLogo. Elaborado por: El Autor

### 7.2.2 Aumento en el comportamiento prudente

Para la realización de este escenario se plantea el aumento de la cantidad de usuario de la ciclo-ruta con un comportamiento prudente, es decir aquellos que no buscan sobrepasar de los usuarios que están delante de ellos y que tampoco hacen invasión de zona de peatones ni del carril del sentido contrario de circulación.

En el trabajo de campo realizado se observó que el comportamiento prudente se presentó en un 64% de la población objeto de estudio, para este escenario se plantea que todos los usuarios de la ciclo-ruta, tanto ciclistas como bicitaxis presentan el mismo comportamiento prudente. En Ilustración 29, se observa la generación de cola en el ciclo de semáforo en rojo.

*Ilustración 29. Cola en el ciclo de semáforo en rojo*



Fuente: NetLogo. Elaborado por: El Autor

Tal como se planteó en el escenario anterior, se realiza la prueba T para datos pareados bajo los mismos criterios de decisión, obteniendo los resultados de la Tabla 19.

*Tabla 19. Prueba T escenario prudente*

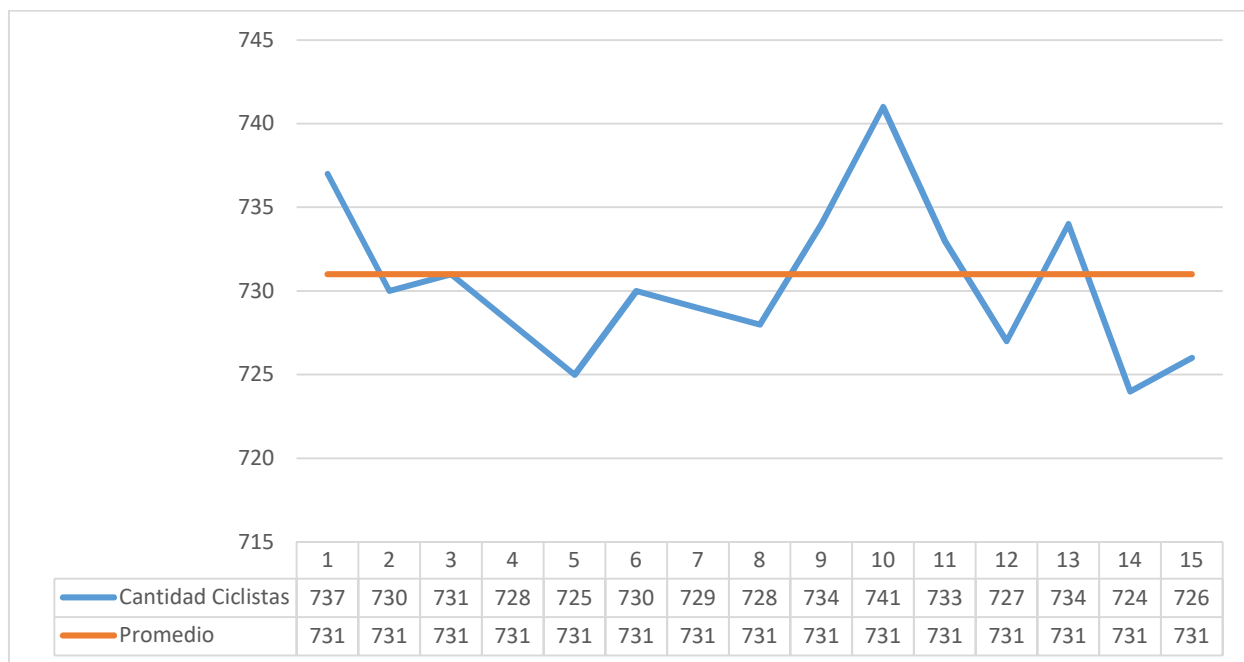
Intervalo de Confianza	
Media	-32,1969697
Desv. Est.	3,256664526
T	1,645
L. Inferior	-32,51943603
L. Superior	-31,87450336

Elaborado por: El Autor



Dado que el rango obtenido entre el límite inferior y el límite superior no contienen el valor 0, se puede afirmar que el modelo base y el escenario propuesto son sistemas diferentes. Una vez validada la diferencia entre los escenarios se procede con la ejecución de las 15 réplicas obteniendo los resultados que se observan en la Ilustración 30.

*Ilustración 30. Aumento en el comportamiento prudente*



**Elaborado por: El Autor**

Ahora bien, en este escenario se observa más claramente cómo la capacidad instalada del segmento de ciclo-ruta analizado no es acorde con el volumen de usuarios que circulan en ella en hora pico. La principal diferencia observada en la medida de desempeño establecida es el incremento gradual en la cantidad de personas en espera en el ciclo del semáforo en rojo, esto se debe principalmente a que al no existir un comportamiento intrépido ya no se está haciendo una ampliación de capacidad con la invasión de la zona peatonal y el carril de circulación en sentido contrario, por lo tanto, la cantidad de personas en cola no alcanzan a cruzar en su totalidad en el ciclo de semáforo en verde.

En este punto es importante analizar los resultados obtenidos con el cálculo de la capacidad instalada la cual es de 863 ciclistas por hora en el segmento de ciclo-ruta objeto de estudio, esta capacidad guarda una estrecha relación con los resultados obtenidos cuando los ciclistas en su totalidad presentan un comportamiento prudente ya que se alcanzó una capacidad en promedio de 731 ciclistas por hora, y la variación existente se debe principalmente a los cambios en velocidad que tienen los ciclistas en el modelo. Por lo anterior, también es claro que la velocidad de los ciclistas es una variable muy importante al momento de realizar los cálculos de capacidad de ciclo-rutas.

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

- De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que los modelos de producción son aplicables para el cálculo de la capacidad de una ciclo-ruta dado que sus variables tienen una relación y equivalencia.
- La auto-organización presente en los sistemas genera comportamientos como los observados en este trabajo y más específicamente con la emergencia presentada por los agentes como la invasión de carril y de zona de tránsito peatonal buscando la ampliación de una capacidad instalada insuficiente.
- El cambio en la medición de las ciclo-rutas a métodos como el propuesto en este trabajo podrían ser un insumo importante para nuevos diseños que satisfagan las necesidades de los usuarios como un carril para adelantar o como se propuso en el apartado de planeación, realizar una ampliación de capacidad por espacios de tiempos determinados como las horas pico.
- Se demuestra que no sólo se deben tener en cuenta los kilómetros construidos de una ciclo-ruta sino también la capacidad de usuarios que pueden hacer uso de ésta en un determinado espacio de tiempo como lo son las horas pico, buscando contribuir con el diseño de políticas públicas adecuadas para incrementar el número de bici usuarios en las ciudades.
- A través del modelo de simulación desarrollado y los escenarios propuestos, se demuestra que el comportamiento de los usuarios tiene un impacto en la capacidad de una ciclo-ruta y que un comportamiento principalmente prudente reflejaría los problemas de capacidad que ya se evidencian en ciertos segmentos de ciclo-ruta de la ciudad de Bogotá en la hora pico de movilización de personas.

- A nivel de desarrollo del estudio es importante contar con herramientas que faciliten el trabajo del investigador para la decodificación de los videos y obtención de la información para poder incluir más variables que puedan tener un impacto directo en el cálculo de la capacidad de una ciclo-ruta.

## 9. FUTURAS INVESTIGACIONES

---

- Es importante realizar más investigaciones de tipo microscópico en la movilidad de los distintos medios de transporte, con un especial foco en el uso de la bicicleta ya que actualmente es un campo poco explorado por la ingeniería donde se requieren grandes esfuerzos de investigación dado el aumento significativo que se presenta a nivel mundial en el uso de este medio de transporte.
- Las investigaciones en materia de movilidad a nivel microscópico están en crecimiento y para contar con investigaciones de alto impacto es necesario la generación de gran cantidad de datos con los cuales los investigadores podamos contrastar de una mejor forma los modelos propuestos, con la implementación de herramientas como los *Instrumented Probe Bicycle* (IPB).
- Es importante poder incluir dentro de los cálculos de la capacidad de ciclo-rutas aquellos factores probabilísticos como por ejemplo la invasión peatonal, la cual podría generar impactos significativos en el cálculo de ésta dado que en Bogotá existe un gran número de ciclo-rutas que comparten espacios con las zonas peatonales.

- Se espera para futuras investigaciones poder realizar una ampliación del modelo basado en agentes para poder ver un sistema de ciclo-rutas más amplio con el cual se pueden incluir mediaciones de capacidad de producción tales como es el WIP.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- AASHTO Executive Committee. (1999). *Guide for the Development of Bicycle Facilities*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (18 de agosto de 2006). Decreto No. 319. *Registro Distrital 3596*. Bogotá.
- Almodfer, R., Xiong, S., Fang, Z., Kong, X., & Zheng, S. (2016). Quantitative analysis of lane-based pedestrian-vehicle conflict at a non-signalized marked crosswalk. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 468-478.
- Axelrod, R. (2005). Advancing the art of simulation in the social sciences. *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management*, 90-100.
- Botma, H. (1995). Method to Determine Level of Service for Bicycle Paths and Pedestrian-Bicycle Paths. *Transportation Research Record (1502)*, 38-44.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2009). *Movilidad en Bicicleta en Bogotá*. Bogotá.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2010). *Manual de políticas amables con la bicicleta*. Bogotá.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *¿Cómo mejorar la movilidad de los bogotanos? 2016-2020*. BOGOTÁ.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2016). *Observatorio de Movilidad 2015*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2017). *Observatorio de Movilidad 2016*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Canavos, G. (1988). *Probabilidad y estadística: aplicaciones y métodos*. MacGraw Hill.
- Cerquera, F. (2007). Capacidad y niveles de servicio de la infraestructura vial. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 2015.
- Chapman, S. (2006). *Planificación y control de la producción*. Pearson Educación.

- Chase, R., Jacobs, F., & Aquilano, N. (2005). *Administración de la producción y operaciones para una ventaja competitiva*. McGraw-Hill.
- CIDATT; Fundación Ciudad Humana de Bogotá & TARYET. (2013). *Manual de Diseño para Infraestructura de Ciclovías*. Lima.
- CROW & Groot. (2007). *Design manual for bicycle traffic*.
- CROW. (2011). *Manual de Diseño para el Tráfico de Bicicletas*. Ede.
- Decreto N° 319. (15 de Agosto de 2006). Bogotá, Colombia: Registro Distrital 3596 de agosto 18 de 2006.
- Fernandez, R., & Valenzuela, E. (2004). Gestión ambiental de tránsito: cómo la ingeniería de transporte puede contribuir a la mejoría del ambiente urbano. *EURE*, 97-107.
- Fundación Despacio. (2014). *Diseño e implementación de estrategias para el uso de la bicicleta en Bogotá y apoyo a la conformación de redes*. Bogotá.
- Fundación Despacio. (2014). *Integración de transporte no motorizado y DOTS*. Bogotá.
- García, E., García, H., & Cárdenas, L. (2006). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. Bogotá: Pearson Education.
- García-Valdecasas Medina, J. I. (2011). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas (REIS)*, 91-109.
- Gilbert, N., & Troitzsch, K. (2005). *Simulation for the social scientist*. UK: McGraw-Hill Education.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginotd, V., Giskec, J., . . . Heinzc, S. K. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 198, 115–126.
- Hatfield, J., & Prabhakaran, P. (2016). An investigation of behaviour and attitudes relevant to the user safety of pedestrian/cyclist shared paths. *Transportation Research Part F (40)*, 35-47.
- Heizer, J., & Render, B. (2007). *Dirección de la producción y de operaciones. Decisiones Estratégicas*. Prentice Hall.

- Hernández, S., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México D.F.: McGraw Hill.
- Hopp, W. J. (2007). *Supply Chain Science*. McGraw-Hill.
- Hummer, J., Roupail, N., Toole, J., Patten, R., Schneider, R., Green, J., . . . Fain, S. (2006). *Evaluation of Safety, Design, and Operation of Shared-Use Paths-Final Report (No. FHWA-HRT-05-137)*. North Carolina.
- Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo. (2011). *Manual integral de movilidad ciclista para ciudades mexicanas - Tomo IV Infraestructura*. México.
- Jia, S., Peng, H., Guo, J., & Chen, H. (2008). Quantitative Analysis of impact of Bicycles on Vehicles in Urban Mixed Traffic. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 58-63.
- Jin, S., Qu, X., Xu, C., Ma, D., & Wang, D. (2015). An improved multi-value cellular automata model for heterogeneous bicycle traffic flow. *Physics Letters A*, 2409-2416.
- Kalenatic, D. (2001). *Modelo integral y dinámico para el análisis, planeación, programación y control de las capacidades productivas en empresas manufactureras*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico, Instituto de Investigaciones Científicas.
- Ley N° 1083. (31 de julio de 2006). Bogotá, Colombia: Diario Oficial 46346 de julio 31 de 2006.
- Ley N° 1753. (09 de junio de 2015). Bogotá, Colombia.
- Ley N° 769. (06 de Agosto de 2002). Bogotá, Colombia.
- Li, B., Xiong, S., Li, X., Liu, M., & Zhang, X. (2015). The Behavior Analysis of Pedestrian-cyclist Interaction at Non-signalized Intersection on Campus: Conflict and Interference. *Procedia Manufacturing*, 3345-3352.
- Li, Z., Wang, W., Liu, P., Bigham, J., & Ragland, D. (2013). Modeling Bicycle Passing Maneuvers on Multilane Separated Bicycle Paths. *Journal of Transportation Engineering*, 139(1), 57-64.



- Liu, J. (2014). Highway Alignment Parameters Design and Capacity Analysis on Two-Lane Highway. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 539, 860-866.
- Luck, M., Ashri, R., & d'Inverno, M. (2004). *Agent-based software development*. Boston: Artech House.
- Ma, X., & Luo, D. (2016). Modeling cyclist acceleration process for bicycle traffic simulation using naturalistic data. *Transportation Research Part F* 40, 130-144.
- Macal, C. M., & North, M. J. (2005). Tutorial on agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 14.
- Ministerio de Transporte. (2015). Manual de Señalización Vial. *Dispositivos uniformes para la regulación de tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). *Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas*. Bogotá D.C.: (C. Pardo & A. Sanz, Eds.).
- Miyajima, C., Nishiwaki, Y., Ozawa, K., Wakita, T., Itou, K., Takeda, K., & Itakura, F. (2007). Drive modeling based on driving behavior and its evaluation in driver identification. *Proceedings of the IEEE*, 427-437.
- NACTO. (2014). *Urban Bikeway Design Guide*. New York: Island Press.
- Nombela, G. (2009). Modelos de capacidad de infraestructuras de transporte. *Documento de trabajo CEDEX. Ministerio de Fomento*.
- Oketch, T. (2000). New Modeling Approach for Mixed-Traffic Streams with Nonmotorized Vehicles. *Transportation Research Record* 1705, 61-69.
- Osowski, C., & Waterson, B. (2017). Establishing the validity of cycle path capacity assumptions in the Highway Capacity Manual. *International Journal of Sustainable Transportation*, 422-432.
- Parkin, J., & Rotheram, J. (2010). Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal. *Transport Policy*, 335-341.
- Pettinga, A., Rouwette, A., Braakman, B., Pardo, C., Kuijper, D., de Jong, H., . . . Godefrooij, T. (2009). *Cycling-inclusive Policy Development: A Handbook*. Utrecht.
- PROJEKTA –INTERDISEÑOS & IDU. (1999). *Plan Maestro de Ciclorrutas*. Bogotá.

- Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la Lengua Española (24.ª Ed)*. Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=7HZdnLt>
- Ren, G., Jiang, H., Chen, J., Huang, Z., & Lu, L. (2016). Heterogeneous cellular automata model for straight-through bicycle traffic at signalized intersection. *Physica A*, 70-83.
- Resolución N° 242. (28 de enero de 2014). Bogotá, Colombia: Secretaría Distrital del Ambiente.
- Rios, R., Taddia, A., Pardo, C., & Lleras, N. (2015). *Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: guía para impulsar el uso de la bicicleta*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Shoraka, M., & Puan, O. C. (2010). Review of evaluating existing capacity of weaving segments. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 683.
- Shou, L. (1999). A Study on the Macro Capacity Model of Urban Road Network and Its Application. *Journal of USST*, 245-255.
- Siebers, P., Macal, C., Garnett, J., Buxton, D., & Pidd, M. (2010). Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! *Journal of Simulation*, 204-210.
- Sipper, D., & Bulfin, R. (1998). *Planeación y control de la producción*. McGraw-Hill Interamericana.
- Susatama, K. D., Cepeda Ruiz, K. A., & Durango Arévalo, L. B. (2017). Modelación y simulación basada en agentes como alternativa para el estudio de las organizaciones empresariales. *Ingeniería solidaria*, 103-119.
- Thompson, J., Savino, G., & Stevenson, M. (2015). Reconsidering the Safety in Numbers Effect for Vulnerable Road Users: An Application of Agent-Based Modeling. *Traffic Injury Prevention*, 147-153.
- Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington D.C.
- Transportation Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, DC.
- Twaddle, H., Schendzielorz, T., & Fakler, O. (2014). Bicycles in urban areas: Review of existing methods for modeling behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2434*, 140-146.

- Wang, Y., & Chen, Y.-Y. (2016). Modeling the effect of microscopic driving behaviors on Kerner's time-delayed traffic breakdown at traffic signal using cellular automata. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 12-24.
- Wang, Y.-G., WEI, G., Zhu, X., & Pei, Y.-L. (2011). Capacity of Bicycle Platoon Flow at Two-Phase Signalized Intersection: a Case Analysis of Xi'an City. *PROMET-Traffic&Transportation*, 177-186.
- Yuchuan, D., Shanchuan, Y., Zhang, X., & Yu, B. (2015). Prohibited-permitted right-turn phasing strategy based on capacity analysis of right-turn movements. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 457-479.
- Zhang, J., Wang, H., & Li, P. (2006). Bicycle flow modeling and simulation based on cellular automaton. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (23.1)*, 125-129.
- Zhang, S., Ren, G., & Yang, R. (2013). Simulation model of speed-density characteristics for mixed bicycle flow-Comparison between cellular automata model and gas dynamics model. *Physica A*, 5110-5118.
- Zhao, D., Wang, W., Li, C., Li, Z., Fu, P., & Hu, X. (2013). Modeling of Passing Events in Mixed Bicycle Traffic with Cellular Automata. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2387*, 26-34.

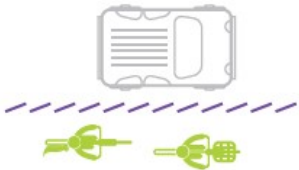

**Anexo 1. Tipos de ciclo-rutas a nivel mundial y en Colombia**

NOMBRE	CARACTERÍSTICAS	IMAGEN
<p><b>Bicicarriles convencionales</b>  <i>(Conventional Bike Lanes)</i></p>	<p>Son carriles que se dividen básicamente por demarcación en el pavimento o señalización. Estos son ubicados adyacentes al carril de vehículos motorizados y mantiene la misma dirección de estos.</p>	
<p><b>Bicicarriles amortiguados</b>  <i>(Buffered Bike Lanes)</i></p>	<p>Los bicicarriles amortiguados son similares a los bicicarriles convencionales con un espacio designado para la separación de estos con los carriles de vehículos motorizados y/o carril de estacionamiento.</p>	
<p><b>Bicicarriles en contra-flujo</b>  <i>(Contra-Flow Bike Lanes)</i></p>	<p>Los bicicarriles en contra-flujo son diseñados para que los ciclistas puedan ir en dirección opuesta al tráfico de los vehículos de motor. Una calle de un sentido se convierte en dos sentidos, un sentido para carros y bicicletas y el otro sentido solo para bicicletas.</p>	

<p><b>Bicicarriles de lado izquierdo</b>  <i>(Left-Side Bike Lanes)</i></p>	<p>Son bicicarriles convencionales que se encuentran al lado izquierdo de las calles que son de una sola dirección o de dos direcciones con separador intermedio. Son principalmente utilizados en vías con alto flujo vehicular o aquellas con alta rotación en los espacios de parqueo, este último evita los accidentes con la apertura de las puertas de los vehículos estacionados.</p>	
<p><b>Ciclo-ruta protegida unidireccional</b>  <i>(One-Way Protected Cycle Tracks)</i></p>	<p>Son ciclo-rutas protegidas que delimitan de forma física las vías de los vehículos motorizados de las ciclo-rutas, también existen ciclo-rutas protegidas unidireccionales elevadas.</p>	
<p><b>Ciclo-ruta elevada</b>  <i>(Raised Cycle Tracks)</i></p>	<p>Son ciclo-rutas que se separan verticalmente de las vías de vehículos de motor, y son normalmente adyacentes a las zonas peatonales o estar a un nivel intermedio entre esta zona y las carreteras. Éstas pueden ser de uno o dos carriles</p>	
<p><b>Ciclo-ruta bidireccional</b>  <i>(Two-Way Cycle Tracks)</i></p>	<p>Tienen configuraciones similares a las ciclo-rutas protegidas unidireccionales que permiten a los ciclistas transitar en ambos sentidos, pueden estar a nivel de las vías de vehículos a motor y estar dividida por una línea de parqueo u otra barrera física.</p>	

Fuente: Urban Bikeway Desing Guide, (NACTO, 2014). Elaborado por: El Autor

Más específicamente el Ministerio de Transporte en su Guía de ciclo-infraestructura para Ciudades Colombianas, realiza unas precisiones sobre los tipos de vías para ciclistas existentes para el caso colombiano, como se muestra en la siguiente ilustración:

Ciclorred		Subtipo	Forma de segregación o adaptación
<b>A</b> Vías ciclistas		Ciclorruta	Física (cambios de altura o instalación de elementos físicos permanentes)
		Ciclobanda	Cambio de pavimento Dispositivos de canalización de tránsito (hitos, balizas o elementos similares) Demarcación
<b>B</b> Vías ciclo-adaptadas		Prelación de bicicleta	Banda ciclopreferente Carril ciclopreferente
		Autorizadas para el tránsito de bicicletas	Carril bus-bici Contraflujo ciclista Calle peatonal
		Calle con tránsito calmado	Uso compartido de calzada

Fuente: Guía de ciclo-infraestructura para Ciudades Colombianas. Elaborado por: (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016)

## Anexo 2. Validación variable tiempo entre arribos

Para la validación de los supuestos de independencia y homogeneidad, se realizaron las siguientes pruebas

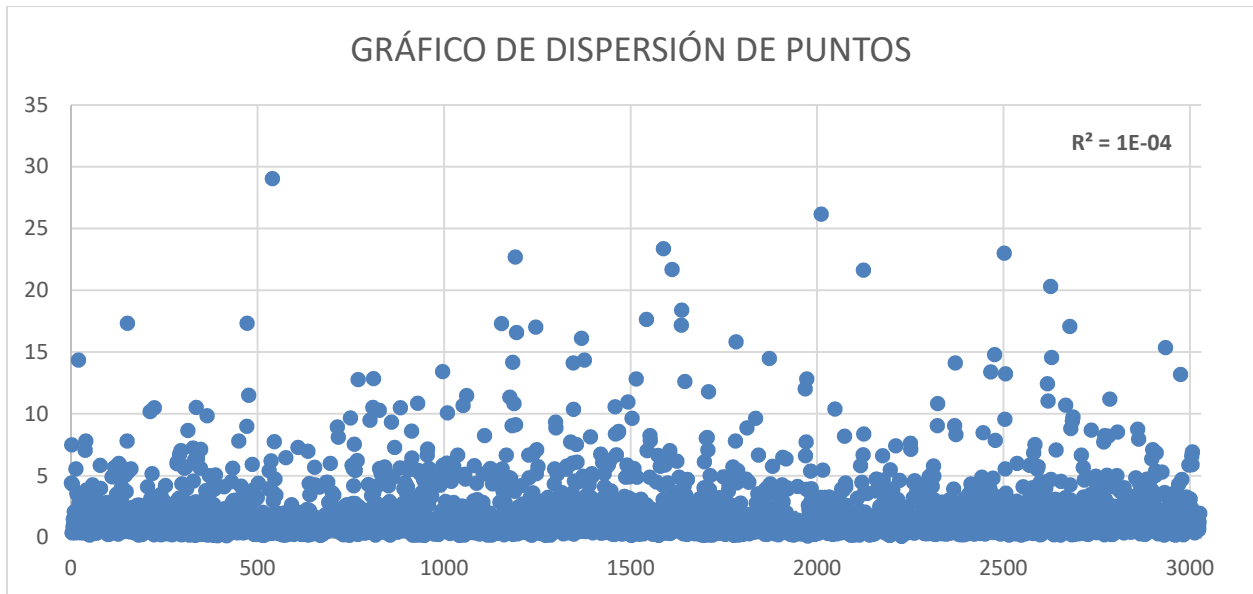
- Independencia

	Arribos
Valor de prueba <sup>a</sup>	1,14
Casos < Valor de prueba	1512
Casos >= Valor de prueba	1513
Casos en total	3025
Número de rachas	1313
Z	-7,292
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Mediana

Donde, Ho: La colección de datos correspondientes a tiempo entre arribos es independiente.

De acuerdo con el resultado de la significancia bilateral asintótica se rechaza la hipótesis nula, por lo cual se genera el gráfico de dispersión de puntos y el respectivo índice de correlación ( $R^2$ )



Ya que el resultado del índice de correlación es inferior a 0,3, no se rechaza la hipótesis nula de independencia de los datos.

- Homogeneidad

Para la validación del supuesto de homogeneidad se realiza la prueba de Kruskal-Wallis, obteniendo los siguientes resultados:

	VAR00001	N	Rango promedio
	1,00	1615	1526,39
Arribos	2,00	1410	1497,66
	Total	3025	

**Estadísticos de  
contraste<sup>a,b</sup>**

	Arribos
Chi-cuadrado	,815
gl	1
Sig. asintót.	,367

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación:

Muestra

De acuerdo con el resultado de la significancia asintótica no se rechaza la hipótesis nula de homogeneidad de la variable tiempo entre arribos.



### **Anexo 3. Código del Modelo de Simulación**

```
breed[ciclistas ciclista]
breed[ciclistas2 ciclista2]
breed[semaforos semaforo]
breed[arboles arbol]
ciclistas-own[vel carril parar a paciencia ibr]
ciclistas2-own[vel carril parar a paciencia]
patches-own [Sentido]
globals[verde rojo crono crea propo cuenta Cuenta-Bicitaxi cuenta2
Densidad_Ciclo]

to setup
  clear-all
  create-arboles 1 [setxy 45 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 35 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 25 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 15 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 05 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 70 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 80 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 90 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 100 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]
  create-arboles 1 [setxy 110 21 set heading 0 set shape "tree" set size 3 ]

  Set crea (-72.03 * (LN(1 - random-float 1)))

  ask patches [
    if(pycor <= 23 and pycor >= 19)[set pcolor gray + 3] ;Creación
escenario
    if(pycor <= 30 and pycor >= 27)[set pcolor gray + 3] ;Creación
escenario
    if(pycor <= 26 and pycor >= 24)[set pcolor gray + 2] ;Creación
escenario
    if(pxcor <= 64 and pxcor >= 51)[set pcolor gray] ;Creación
escenario
    if(pxcor <= 50 and pycor >= 31)[set pcolor green] ;Creación
escenario
    if(pxcor >= 65 and pycor >= 31)[set pcolor green] ;Creación
escenario
    if(pycor <= 18)[set pcolor gray] ;Creación
escenario
  ]

  ask patches [
    if(pycor <= 25 and pycor >= 24)[set Sentido 1] ;Sentido Sur-Norte
    if(pycor <= 26 and pycor > 25)[set Sentido 2] ;Sentido Norte-Sur
  ]

  ask patch 51 26 [sprout-semaforos 1 [set color red set shape "square"]]
;Creación semáforos
  ask patch 51 24 [sprout-semaforos 1 [set color red set shape "square"]]
;Creación semáforos
  ask patch 51 25 [sprout-semaforos 1 [set color red set shape "square"]]
;Creación semáforos
```

```
ask patch 51 23 [sprout-semaforos 1 [set color red set shape "square"]]
;Creación semáforos
ask patch 64 26 [sprout-semaforos 1 [set color red set shape "square"]]
;Creación semáforos
ask patch 51 22 [sprout-semaforos 1 [set color red set shape "square"]]
;Creación semáforos

reset-ticks
end

to Colorsemaforos
  ifelse crono = 1680 [set crono 0][set crono crono + 1]
  ask semaforos [ifelse crono <= 230 [set color green] [set color red]]
end

;;;;;;;;; Creación de ciclistas

to Cciclistas

  let crea-bicitaxi random-float 1000
  let Comportamiento random-float 1
  let crea-en-carril round random-float 3
  if (crea <= ticks) [
    Set crea (Tiempo_arribo * (LN(1 - random-float 1))) + ticks
    ifelse (Comportamiento < Porcentaje-intrépido) [
      if-else not any? turtles-on patch 0 26 and crea-en-carril = 1 [create-
ciclistas 1 [setxy 0 26 set vel 0.308 + random-float 0.103 - random-float
0.083 set heading 90 set size 1 set cuenta cuenta + 1 set carril 3 set shape
"ciclista" set ibr random-float 100]][
      if-else not any? turtles-on patch 0 25 and crea-en-carril = 2 [create-
ciclistas 1 [setxy 0 25 set vel 0.308 + random-float 0.103 - random-float
0.083 set heading 90 set size 1 set cuenta cuenta + 1 set carril 2 set shape
"ciclista" set ibr random-float 100]][
      if not any? turtles-on patch 0 24 and crea-en-carril = 3 [create-
ciclistas 1 [setxy 0 24 set vel 0.308 + random-float 0.103 - random-float
0.083 set heading 90 set size 1 set cuenta cuenta + 1 set carril 1 set shape
"ciclista" set ibr random-float 100]]
    ]][if (Comportamiento >= Porcentaje-intrépido)[
      if-else not any? turtles-on patch 0 26 and crea-en-carril = 1 [create-
ciclistas 1 [setxy 0 26 set vel 0.308 + random-float 0.083 - random-float
0.083 set heading 90 set size 1 set cuenta cuenta + 1 set carril 3 set shape
"ciclista" set ibr random-float 100]][
      if-else not any? turtles-on patch 0 25 and crea-en-carril = 2 [create-
ciclistas 1 [setxy 0 25 set vel 0.308 + random-float 0.083 - random-float
0.083 set heading 90 set size 1 set cuenta cuenta + 1 set carril 2 set shape
"ciclista" set ibr random-float 100]][
      if not any? turtles-on patch 0 24 and crea-en-carril = 3 [create-
ciclistas 1 [setxy 0 24 set vel 0.308 + random-float 0.083 - random-float
0.083 set heading 90 set size 1 set cuenta cuenta + 1 set carril 1 set shape
"ciclista" set ibr random-float 100]]
    ]]]
  ]
  ]
  if crea-bicitaxi >= 998
    [if not any? turtles-on patch 0 24 and crea-en-carril = 2 [create-
ciclistas 1 [setxy 0 24 set vel 0.69 + random-float 0.02 - random-float 0.02
set Cuenta-Bicitaxi + 1 set heading 90 set size 3 set shape "taxi"]]]
```

```
end

to capden
  if crono = 1679 [set Densidad_Ciclo count ciclistas with [pxcor <= 50 and
pycor <= 25]]

end

;;;;;;;;; Movimiento ciclistas
to Aciclistas
  ask ciclistas [ if not can-move? 3 [die]
    ifelse not any? (semaforos-on patch-ahead vel) with [color = red] and not
any? (ciclistas-on patch-ahead 1) [fd vel pasar][fd 0]]
end

to pasar
  ask ciclistas [
    if(any? ciclistas-on patch-ahead 1 and carril = 1 and not any? ciclistas-
at 0 1) [set ycor (ycor + 1) set carril 2]
    if(any? ciclistas-on patch-ahead vel and carril = 2 and not any?
ciclistas-at 0 -1 and not any? ciclistas-at 1 -1) [set ycor (ycor - 1) set
carril 1]
    if(any? ciclistas-on patch-ahead vel and carril = 2 and not any?
ciclistas-at 0 1 and not any? ciclistas-at 1 1) [set ycor (ycor + 1) set
carril 3]
    if(any? ciclistas-on patch-ahead vel and carril = 3 and not any?
ciclistas-at 0 -1) [set ycor (ycor - 1) set carril 2]
    if(any? ciclistas-on patch-ahead vel and carril = 1 and not any?
ciclistas-at 0 -1 and not any? ciclistas-at 1 -1 and ibr > 70) [set ycor
(ycor - 1) set carril 0]
    if(carril = 0 and not any? ciclistas-at 0 1 and not any? ciclistas-at 1
1) [set ycor (ycor + 1) set carril 1]
    if(any? ciclistas-on patch-ahead vel and carril = 0 and not any?
ciclistas-at 0 -1 and not any? ciclistas-at 1 -1 and ibr > 70) [set ycor
(ycor - 1) set carril -1]
    if(carril = -1 and not any? ciclistas-at 0 1 and not any? ciclistas-at 1
1) [set ycor (ycor + 1) set carril 0]
  ]
end

to Cciclistas2
  let ll (-0.35 * (LN(1 - random-float 1)))
  if (ll > 1.8)[
    if not any? turtles-on patch 114 26 [create-ciclistas2 1 [setxy 114 26
set vel 0.2 + random-float 0.2 set heading 270 set shape "ciclista" set
cuenta2 cuenta2 + 1]]]
end

;;;;;;;;; Movimiento ciclistas

to Aciclistas2
  ask ciclistas2 [ if not can-move? 3 [die]
```

```
    ifelse not any? (semaforos-on patch-ahead 1) with [color = red] and not  
any? (ciclistas-on patch-ahead 1) and not any? (ciclistas2-on patch-ahead 1)  
[fd vel][fd 0]]  
end
```

```
to go  
  tick  
  ifelse ticks = 36000 [stop] [  
  Colorsemaforos  
  Cciclistas aciclistas  
  Cciclistas2 aciclistas2  
  capden  
  ]  
end
```