



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN Y
POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO

Simulación Matemática del Crecimiento Poblacional y su Impacto en la
Movilidad Urbana en el centro de Riobamba, Ecuador para los próximos
5 años.

Trabajo de Titulación para optar al título de Magister en Matemática
Aplicada con mención en Matemática Computacional

AUTOR:
Muñoz León, Bryan Paul

TUTOR:
PhD., Sánchez Gordón, Sandra Patricia

Riobamba, Ecuador. 2025



DECLARACIÓN Y CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORÍA

De mi consideración:

Yo, Bryan Paul Muñoz León, con número único de identificación 060591278-1, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: "Simulación matemática del crecimiento poblacional y su impacto en la movilidad urbana en el centro de Riobamba, Ecuador para los próximos 5 años". Previo a la obtención del grado de Magíster en Matemática Aplicada con mención en Matemática Computacional.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, junio de 2025

Atentamente,

Mat. Bryan Paul Muñoz León

CI: 060591278-1



ACTA DE CULMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

En la ciudad de Riobamba, a los 14 días del mes de septiembre del año 2025, los miembros del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo, reunidos con el propósito de analizar y evaluar el Trabajo de Titulación bajo la modalidad Proyecto de titulación con componente investigación aplicada y/o desarrollo, CERTIFICAMOS lo siguiente:

Que, una vez revisado el trabajo titulado: "Simulación matemática del crecimiento poblacional y su impacto en la movilidad urbana en el centro de Riobamba, Ecuador para los próximos 5 años" perteneciente a la línea de investigación: Ingeniería Informática presentado por el maestrante Muñoz León Bryan Paul, portador de la cédula de ciudadanía No. 0605912781, estudiante del programa de Maestría en Matemática Aplicada con Mención en Matemática Computacional se ha verificado que dicho trabajo cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo cuanto podemos certificar, en honor a la verdad y para los fines pertinentes.

Atentamente,

Dra. Sandra Sánchez

TUTORA

PhD. Marlon Basantes

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

1

PhD. Manuel Meneses

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

2



Quito, 12 de septiembre del 2025

CERTIFICADO

De mi consideración:

Yo Sandra Patricia Sánchez Gordón, certifico que Bryan Paúl Muñoz León con cédula de identidad No. 060591278-1 estudiante del programa de Maestría en Matemática Aplicada con Mención en Matemática Computacional , cohorte cuarta presentó su trabajo de titulación bajo la modalidad de Proyecto de titulación con componente de investigación aplicada y/o desarrollo denominado: “Simulación Matemática del Crecimiento Poblacional y su impacto en la Impacto en la Movilidad Urbana en el Centro de Riobamba, Ecuador para los próximos cinco años”, el mismo que fue sometido al sistema de verificación de similitud de contenido COMPILATIO MAGISTER+ identificando el porcentaje de similitud 1% en el texto y el porcentaje de similitud 2% en inteligencia artificial.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,

Sandra Patricia Sánchez Gordón
CI: 1709873747

Adj. Resultado del análisis de similitud (Compilatio Magister+)

Dedicatoria

Hay metas que no se alcanzan en soledad. Esta tesis es el resultado de muchas manos invisibles que me sostuvieron, de voces que me alentaron y de corazones que caminaron conmigo aun en silencio. Es un logro que, aunque personal, pertenece también a quienes han sido el verdadero sustento de mi vida.

A mis padres, Fausto y Fanny, por ser el faro constante en medio de cada tormenta. Su amor, su sacrificio y su ejemplo han trazado el sendero por el que hoy avanzo con la frente en alto. Todo lo que soy les pertenece también.

A mis hermanos, Stalin, Sebastián y Mateo, por estar ahí en cada paso, con su apoyo firme, su compañía sencilla y su cariño auténtico. Su presencia ha sido una fuerza serena, pero imprescindible, que me impulsó cuando más lo necesité.

A aquella persona especial que fue parte fundamental en este trayecto. Tu presencia oportuna, tu compañía discreta y tu confianza silenciosa hicieron posible que esta meta se concretara. Tu impacto permanece, aunque las palabras no lo nombren.

Y a mis fieles mascotas, compañeras leales de largas noches y días inciertos. Su amor sin palabras, su quieta ternura y su compañía constante han sido un consuelo que no necesita explicación. A quien partió antes, mi recuerdo eterno.

Gracias a todos por ser parte de esta historia. Sin ustedes, este sueño no habría sido posible.

Bryan

Agradecimiento

El camino hacia la culminación de esta tesis ha estado lleno de desafíos, aprendizajes y momentos que me han marcado profundamente. Nada de esto habría sido posible sin las personas que, con amor, paciencia y compromiso, caminaron a mi lado.

A mis padres, Fausto y Fanny, por ser la base firme sobre la que he construido cada uno de mis pasos. Su esfuerzo silencioso, su fe inquebrantable y su amor incondicional han sido el verdadero motor de mi vida. Gracias por enseñarme, con el ejemplo, que todo sueño se alcanza con trabajo y humildad.

A mis hermanos, Stalin, Sebastián y Mateo, por su compañía constante, su aliento sincero y su apoyo discreto pero esencial. Su presencia ha significado más de lo que las palabras pueden expresar.

A la doctora Sandra Patricia Sánchez Gordón, PhD, mi tutora, por su guía rigurosa y su apoyo académico constante. Su orientación experta y su compromiso con la excelencia fueron claves en la realización de este trabajo. Gracias por creer en mi proyecto y por impulsarme a dar siempre lo mejor.

Índice General

Declaratoria y Cesión de Derechos de Autoría	ii
Acta de Culminación de Trabajo de Titulación.....	iii
Certificado de contenido de similitud	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras	xi
Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Capítulo 1 Generalidades.....	5
1.1 Planteamiento del Problema	5
1.2 Justificación de la Investigación.....	6
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	7
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica	8
2.1 Antecedentes Investigativos	8
2.2 Fundamentación Legal	17
2.3 Fundamentación Teórica	20
2.3.1 Definición y Evolución Histórica de la Matemática Aplicada.....	20
2.3.2 Crecimiento Poblacional en Contextos Urbanos.....	20
2.3.3 Crecimiento Poblacional y Movilidad Urbana.....	20
2.3.4 Movilidad Urbana y Congestión Vehicular	21

2.3.5	Crecimiento del Parque Automotor.....	21
2.3.6	Modelo de Crecimiento Poblacional	22
2.3.7	Densidad vehicular	23
2.3.8	Velocidad Media y Tiempos de Viaje.....	23
2.3.9	Autómatas Celulares	24
Capítulo 3 Diseño Metodológico.....		29
3.1	Enfoque de la Investigación	29
3.2	Diseño de la Investigación.....	29
3.3	Tipo de Investigación	30
3.4	Nivel de Investigación.....	30
3.5	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	30
3.6	Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de Datos	31
3.7	Población y Muestra	31
3.7.1	Población.....	32
3.7.2	Tamaño de la Muestra	32
3.7.3	Simulación.....	32
3.7.4	Datos y Variables de Entrada para la Proyección Poblacional	35
3.7.5	Datos y Variables de Entrada para la Proyección del Parque Automotriz.....	36
3.7.6	Datos y Variables de Entrada para la Simulación del Tráfico	36
Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados		54
4.1	Análisis Descriptivo de los Resultados	54
4.1.1	Resultados de la Proyección Poblacional.....	54
4.1.2	Resultados de la Proyección del Parque Automotriz	56
4.1.3	Resultados de la Simulación Vehicular en la calle Olmedo y Cristóbal Colón actualidad.....	57

4.1.4 Resultados de la Simulación Vehicular en la calle Olmedo y Cristóbal Colón próximos cinco años	93
4.2 Discusión de los Resultados	129
Capítulo 5 Marco Propositivo	134
5.1 Planificación de la Actividad Preventiva.....	134
Conclusiones.....	138
Recomendaciones.....	139
Referencias Bibliográficas	140

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Conteo de vehículos en la Calle Olmedo durante la semana de observación (lunes a viernes, en distintos horarios pico, intervalos de 15 min de 7:00 a 8:00).</i>	38
Tabla 2 <i>Conteo de vehículos en la Calle Olmedo durante la semana de observación (lunes a viernes, en distintos horarios pico, intervalos de 15 min de 12:30 a 13:30).</i>	39
Tabla 3 <i>Conteo de vehículos en la Calle Olmedo durante la semana de observación (lunes a viernes, en distintos horarios pico, intervalos de 15 min de 16:30 a 17:30).</i>	40
Tabla 4 <i>Conteo de vehículos en la Calle Cristóbal Colón durante la semana de observación (lunes a viernes, en distintos horarios pico, intervalos de 15 min de 7:00 a 8:00).</i>	41
Tabla 5 <i>Conteo de vehículos en la Calle Cristóbal Colón durante la semana de observación (lunes a viernes, en distintos horarios pico, intervalos de 15 min de 12:30 a 13:30).</i>	42
Tabla 6 <i>Conteo de vehículos en la Calle Cristóbal Colón durante la semana de observación (lunes a viernes, en distintos horarios pico, intervalos de 15 min de 16:30 a 17:30).</i>	43
Tabla 7 <i>Evolución esperada de la población de Riobamba desde 2022 hasta 2030</i>	55
Tabla 8 <i>Proyección del parque automotor para los próximos cinco años.</i>	56

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Intersección de las calles Olmedo y Cristóbal Colón (Riobamba, Ecuador)</i>	33
Figura 2 <i>Vista aérea de las calles Olmedo y Cristóbal Colón (Riobamba, Ecuador)</i>	34
Figura 3 <i>Calle Olmedo (Riobamba, Ecuador)</i>	34
Figura 4 <i>Calle Cristóbal Colón (Riobamba, Ecuador)</i>	35
Figura 5 <i>Simulación del código en Python</i>	52
Figura 6 <i>Proyección de Crecimiento Poblacional</i>	55
Figura 7 <i>Proyección del Parque Automotriz</i>	57
Figura 8 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 7:00 a 7:15 en las calles Olmedo y Colón</i>	58
Figura 9 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:00 a 7:15</i>	59
Figura 10 <i>Vehículos que completaron el cruce de 7:00 a 7:15 en las calles Olmedo y Colón</i>	60
Figura 11 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 7:15 a 7:30 en las calles Olmedo y Colón</i>	61
Figura 12 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:15 a 7:30</i>	62
Figura 13 <i>Vehículos que completaron el cruce de 7:15 a 7:30 en las calles Olmedo y Colón</i>	63
Figura 14 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 7:30 a 7:45 en las calles Olmedo y Colón</i>	64
Figura 15 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:30 a 7:45</i>	65

Figura 16 <i>Vehículos que completaron el cruce de 7:30 a 7:45 en las calles Olmedo y Colón</i>	66
Figura 17 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 7:45 a 8:00 en las calles Olmedo y Colón</i>	67
Figura 18 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:45 a 8:00</i>	68
Figura 19 <i>Vehículos que completaron el cruce de 7:45 a 8:00 en las calles Olmedo y Colón</i>	69
Figura 20 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 12:30 a 12:45 en las calles Olmedo y Colón</i>	70
Figura 21 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 12:30 a 12:45</i>	71
Figura 22 <i>Vehículos que completaron el cruce de 12:30 a 12:45 en las calles Olmedo y Colón</i>	72
Figura 23 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 12:45 a 13:00 en las calles Olmedo y Colón</i>	73
Figura 24 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 12:45 a 13:00</i>	74
Figura 25 <i>Vehículos que completaron el cruce de 12:45 a 13:00 en las calles Olmedo y Colón</i>	75
Figura 26 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 13:00 a 13:15 en las calles Olmedo y Colón</i>	76
Figura 27 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 13:00 a 13:15</i>	77

Figura 28 <i>Vehículos que completaron el cruce de 13:00 a 13:15 en las calles Olmedo y Colón</i>	78
Figura 29 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 13:15 a 13:30 en las calles Olmedo y Colón</i>	79
Figura 30 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 13:15 a 13:30</i>	80
Figura 31 <i>Vehículos que completaron el cruce de 13:15 a 13:30 en las calles Olmedo y Colón</i>	81
Figura 32 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 16:30 a 16:45 en las calles Olmedo y Colón</i>	82
Figura 33 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 16:30 a 16:45</i>	83
Figura 34 <i>Vehículos que completaron el cruce de 16:30 a 16:45 en las calles Olmedo y Colón</i>	84
Figura 35 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 16:45 a 17:00 en las calles Olmedo y Colón</i>	85
Figura 36 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 16:45 a 17:00</i>	86
Figura 37 <i>Vehículos que completaron el cruce de 16:45 a 17:00 en las calles Olmedo y Colón</i>	87
Figura 38 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 17:00 a 17:15 en las calles Olmedo y Colón</i>	88
Figura 39 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 17:00 a 17:15</i>	89

Figura 40 <i>Vehículos que completaron el cruce de 17:00 a 17:15 en las calles Olmedo y Colón</i>	90
Figura 41 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón</i>	91
Figura 42 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 17:15 a 17:30</i>	92
Figura 43 <i>Vehículos que completaron el cruce de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón</i>	93
Figura 44 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 7:00 a 7:15 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	94
Figura 45 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:00 a 7:15, simulación 5 años</i>	95
Figura 46 <i>Vehículos que completaron el cruce de 7:00 a 7:15 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	96
Figura 47 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 7:15 a 7:30 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	97
Figura 48 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:15 a 7:30, simulación 5 años</i>	98
Figura 49 <i>Vehículos que completaron el cruce de 7:15 a 7:30 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	99
Figura 50 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 7:30 a 7:45 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años</i>	100

Figura 51 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:30 a 7:45, simulación 5 años</i>	101
Figura 52 <i>Vehículos que completaron el cruce de 7:30 a 7:45 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	102
Figura 53 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 7:45 a 8:00 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años</i>	103
Figura 54 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:45 a 8:00, simulación 5 años</i>	104
Figura 55 <i>Vehículos que completaron el cruce de 7:45 a 8:00 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	105
Figura 56 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 12:30 a 12:45 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años</i>	106
Figura 57 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 12:30 a 12:45, simulación 5 años</i>	107
Figura 58 <i>Vehículos que completaron el cruce de 12:30 a 12:45 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	108
Figura 59 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 12:45 a 13:00 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años</i>	109
Figura 60 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 12:45 a 13:00, simulación 5 años</i>	110
Figura 61 <i>Vehículos que completaron el cruce de 12:45 a 13:00 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	111

Figura 62 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 13:00 a 13:15 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años</i>	112
Figura 63 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 13:00 a 13:15, simulación 5 años</i>	113
Figura 64 <i>Vehículos que completaron el cruce de 13:00 a 13:15 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	114
Figura 65 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 13:15 a 13:30 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años</i>	115
Figura 66 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 13:15 a 13:30, simulación 5 años</i>	116
Figura 67 <i>Vehículos que completaron el cruce de 13:15 a 13:30 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	117
Figura 68 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 16:30 a 16:45 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años</i>	118
Figura 69 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 16:30 a 16:45, simulación 5 años</i>	119
Figura 70 <i>Vehículos que completaron el cruce de 16:30 a 16:45 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años</i>	120
Figura 71 <i>Longitud de la Cola de automóviles de 16:45 a 17:00 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años</i>	121
Figura 72 <i>Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 16:45 a 17:00, simulación 5 años</i>	122

Figura 73 Vehículos que completaron el cruce de 16:45 a 17:00 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años	123
Figura 74 Longitud de la Cola de automóviles de 17:00 a 17:15 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años	124
Figura 75 Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 17:00 a 17:15, simulación 5 años.....	125
Figura 76 Vehículos que completaron el cruce de 17:00 a 17:15 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años	126
Figura 77 Longitud de la Cola de automóviles de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años	127
Figura 78 Longitud de la Cola de automóviles de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años	128
Figura 79 Vehículos que completaron el cruce de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años	129

Resumen

La presente investigación determina el efecto que el crecimiento previsto de población y vehículos tendrá sobre la movilidad en la intersección Olmedo – Cristóbal Colón (Riobamba) en el periodo 2025-2030. Se proyecta un aumento urbano de 188.891 a 248.733 habitantes (+31,7 %) y de 55.671 a 119.276 vehículos particulares (+114,3 %). Con estos valores y conteos de campo en franjas de 15 min se construyó un modelo de autómata celular que replica la geometría y los ciclos semafóricos reales. El escenario 2025 arroja colas máximas de 16 vehículos en Olmedo y 4–9 en Colón, demoras de 40-60 s y velocidades de 12-17 km/h. Al escalar las llegadas con el factor 1,72 (2030) las colas en Colón suben a 14-16 vehículos, los tiempos de espera superan 45 s y la velocidad media baja a 10-13 km/h, aunque se evacúa >93 % del flujo. Se concluye que, sin intervención, la congestión será crítica en 2030. Se proponen ajustes semafóricos por franja horaria, restricción vehicular piloto en horas pico y fomento de la movilidad compartida como medidas de bajo costo y rápida aplicación.

Palabras claves: autómata celular, congestión vial, matemáticas, movilidad urbana, simulación matemática.

ABSTRACT

This study examines the impact of projected population and vehicle growth on mobility at the intersection of Olmedo-Cristobal Colon (Riobamba) during the period 2025-2030. An urban increase is projected from 188,891 to 248,733 inhabitants (+31.7%) and from 55,671 to 119,276 private vehicles (+114.3%). With these values and field counts in place, a cellular automaton model was built to replicate the geometry and actual traffic light cycles. The 2025 scenario yields maximum queues of 16 vehicles at Olmedo and 4-9 at Colón, delays of 40-60 s, and speeds of 12-17 km/h. By scaling arrivals with a factor of 1.72 (2030), queues in Colón rise to 14-16 vehicles, waiting times exceed 45 seconds, and the average speed drops to 10-13 km/h, although more than 93% of the flow is evacuated. The report concludes that, without intervention, congestion will be critical in 2030. We propose adjusting traffic lights by time slot, implementing pilot vehicle restrictions during peak hours, and promoting shared mobility as low-cost and fast implementation measures.

Keywords: Cellular automaton, road congestion, mathematics, urban mobility, mathematical simulation.

Reviewed by:

Mgs. Sofia Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

Introducción

El crecimiento de la población hace cada vez más complicado predecir el comportamiento de la movilidad en una ciudad, sobre todo en ciudades como Riobamba, donde el crecimiento demográfico hace una presión considerable sobre una infraestructura vial limitada. De acuerdo a las cifras del INEC, en 2022 la provincia de Chimborazo contó con una población de 471.933 habitantes, de los cuales 260.882 viven en el cantón Riobamba, siendo 188.891 habitantes residentes del área urbana. Aunque la tasa de crecimiento poblacional bordea el 3,5% anual, el parque automotriz ha experimentado un ritmo de expansión considerablemente mayor, con un promedio de 18,66% en los últimos años.

Según la Dirección de Gestión de Movilidad, Tránsito y Transporte de Riobamba, en el año 2023 se contabilizaron cerca de 55.671 vehículos privados y se proyecta que para 2030 se podría superar los 120.000 automóviles, incrementando, la congestión especialmente en el centro de la ciudad. En este contexto, en la ciudad de Riobamba existen varios puntos críticos del tráfico urbano, uno de ellos se evidencia entre la calle Olmedo (vía principal) y la calle Cristóbal Colón (vía secundaria) esta intersección se encuentra en el centro de la ciudad y concentra uno de los mayores flujos de vehículos particulares que, en ciertas horas representa un foco de congestión en el centro de Riobamba.

Con el fin de estudiar el impacto específico de estos incrementos poblacionales y vehiculares en los próximos cinco años, se propone la implementación de un modelo basado en autómatas celulares. Esta metodología facilita la representación discreta del comportamiento de numerosos automóviles, permitiendo capturar fenómenos emergentes como la formación de cuellos de botella y transiciones en la densidad de flujo.

Para la simulación se hará uso de datos obtenidos de entidades locales, páginas webs (Google Maps, Waze), conteos mediante observación directa en horas pico lo cual ayudará a simular correctamente el flujo vehicular. La implementación que ha sido desarrollada en Python, combina la dinámica de crecimiento poblacional y vehicular proyectada en un horizonte para los próximos cinco años (2025–2030) con la lógica de los autómatas celulares, reproduciendo de forma objetiva y lo más realista la conducta vehicular en una intersección importante en la ciudad de Riobamba.

Al hablar del enfoque social la presente investigación busca proporcionar un modelo que permita servir como una guía para la planificación y gestión en el tráfico de la ciudad de Riobamba esto con el fin de lograr soluciones rápidas sin un alto valor económico sino más bien haciendo uso de la infraestructura ya existente, por otro lado si hablamos del enfoque académico se busca proporcionar un modelo que integre la lógica de los autómatas celulares con datos de población y vehículos para abordar una problemática de congestión vehicular en la ciudad. Estas herramientas analíticas serán útiles para autoridades e instituciones de movilidad facilitando la toma de decisiones.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del Problema

La ciudad de Riobamba (provincia de Chimborazo, Ecuador) crece poblacionalmente a un ritmo cercano al 3.5% anual, situándose en 260.882 habitantes en el cantón y 188.891 en la zona urbana (INEC, 2022). Por otro lado, el parque automotriz privado presenta un incremento histórico de 18.66% anual, con 55.671 vehículos registrados en 2023, incluyendo motocicletas y otros tipos de transporte. (Dirección de Gestión de Movilidad, Tránsito y Transporte, 2024).

Este crecimiento poblacional y vehicular pronostica mayores niveles de congestión vial, especialmente en el centro de la ciudad. En la intersección de las calles Olmedo y Cristóbal Colón, ambas de sentido único y con un semáforo que alterna ciclos de 30 segundos en verde, tres segundos en amarillo y 25 en rojo para la calle Olmedo, mientras que, para la calle Cristóbal Colón se alterna ciclos de 25 segundos en verde, tres segundos en amarillo y 25 en rojo por lo que se alcanzan flujos de 300 a 400 vehículos (Calle Colón) y 800 a 1.000 vehículos (Calle Olmedo) por hora en horas pico. Además, la presencia de paradas de buses urbanos y taxis, así como la limitación de maniobras, refuerzan la saturación.

Existen estudios previos relacionados con la movilidad en Riobamba, pero no enfocados en el transporte privado o en la creciente población de automóviles para los próximos cinco años, es debido a ello que se propone desarrollar un modelo de autómatas celular para simular el tráfico de una importante intersección para la ciudad de Riobamba.

Este enfoque busca brindar un soporte analítico para la toma de decisiones futuras, sin contemplar intervenciones con la infraestructura de la ciudad.

1.2 Justificación de la Investigación

El acelerado crecimiento poblacional (3.5% anual) y del parque automotriz privado (18.66% anual) en Riobamba ha incrementado la presión sobre la infraestructura vial, especialmente en el centro de la ciudad. La intersección de las calles Olmedo y Cristóbal Colón, se perfila como un punto crítico, pues cuenta con altos volúmenes de tránsito en horas pico que podrían agravar la congestión en los próximos cinco años.

Ante la falta de estudios que modelen de forma específica y cuantitativa los escenarios futuros de tránsito privado, surge la necesidad de emplear un modelo de autómatas celular. Mediante esta herramienta se podrá analizar el flujo vehicular en condiciones reales y pronosticar posibles saturaciones, ofreciendo una base analítica confiable para la toma de resoluciones estratégicas en la movilidad urbana. Aunque no se consideren intervenciones de infraestructura, ni acuerdos con el GAD de Riobamba, esta simulación proporcionará información relevante para entender el alcance del crecimiento de la población y la movilidad de la ciudad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Analizar el impacto del crecimiento poblacional y del parque automotriz en el tráfico de la intersección ubicada entre la calle Olmedo y la calle Cristóbal Colón, en el centro de Riobamba, durante los próximos cinco años, mediante la implementación de modelos matemáticos y de autómatas celular, utilizando datos reales proporcionados por entidades locales y otras fuentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información real sobre la evolución poblacional y el parque automotriz privado en Riobamba.
- Desarrollar y calibrar un modelo matemático para proyectar la población de Riobamba en los próximos 5 años, utilizando datos oficiales del INEC.
- Diseñar e implementar un modelo de autómata celular que simule el flujo vehicular en la intersección de la calle Olmedo y la calle Cristóbal Colón, teniendo en cuenta las configuraciones actuales.
- Evaluar el impacto del crecimiento poblacional en la movilidad privada y generar recomendaciones para optimizar la circulación en el área central según el escenario proyectado.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

En las últimas décadas, el crecimiento poblacional especialmente en áreas urbanas, ha generado desafíos a los GAD municipales en cuanto a planificación y transporte, la movilidad urbana se ve afectada por múltiples factores, entre ellos, el aumento de la densidad poblacional y el uso de vehículos particulares; diversos estudios han abordado esta problemática mediante herramientas como la simulación matemática, la modelación computacional y el análisis de datos, todo esto, con el objetivo de predecir y mitigar impactos negativos en la infraestructura vial y el flujo vehicular.

Además, para medir la eficiencia del sistema de transporte y diagnosticar puntos críticos de saturación se darán a conocer conceptos esenciales de movilidad urbana y congestión vehicular, resaltando referencias como la densidad vehicular, el flujo y la velocidad promedio.

Por último, para simular el comportamiento del tráfico en ciudades intermedias como Riobamba se incluirá la teoría de autómatas celulares, resaltando la razón por la que se considera un enfoque propicio para simular el comportamiento del tráfico en ciudades donde el crecimiento poblacional y la expansión del parque automotor generan patrones de congestión difíciles de predecir con métodos tradicionales.

2.1 Antecedentes Investigativos

Existen investigaciones en otras ciudades a nivel nacional e internacional las mismas que han demostrado la utilidad de las simulaciones matemáticas para poder evaluar y comparar diferentes situaciones de tránsito con distintas infraestructuras viales, de igual

manera también, existen otras investigaciones que combina nuevas tecnologías, así como son las redes neuronales, autos autómatas y también autómatas celulares.

A continuación, se presenta una descripción de los estudios que han aportado a fundamentar este trabajo.

- **Simulación del tráfico vehicular en la ciudad San Francisco de Quito con el software AnyLogic. Caso estudio: Intercambiador del Condado Shopping** (Jiménez Gavilanes, 2023).

Autor: Diego Fernando Jiménez Gavilanes, (2023).

Objetivo general: Crear una simulación de tráfico vehicular con la herramienta AnyLogic del intercambiador actual y compararla con otro para determinar cuál se comporta mejor frente a la congestión.

Metodología:

Recopilación de datos de campo como el conteo vehicular y tiempos de viaje.

Construcción de modelos para el escenario actual y el diseño alternativo con AnyLogic.

Los resultados se obtienen en base al tiempo promedio de cruce con los niveles de congestión vehicular.

Hallazgos:

Configuración vehicular actual sin semáforos: aproximadamente 310 segundos para cruzar.

Configuración vehicular con semáforos: aproximadamente 230 segundos para cruzar.

Simulaciones matemáticas: aproximadamente 146 segundos con una reducción significativa en la congestión.

Conclusión en torno al objetivo general: El uso de AnyLogic ayuda a poder cuantificar el impacto de la congestión vehicular en base a los diseños de intercambiadores actuales con y sin configuración de semáforos. El diseño propuesto reduce significativamente los tiempos de cruce en comparación con la configuración actual en el Condado Shopping. Además, se ve de manera notoria la utilidad del software AnyLogic como soporte en la toma de decisiones para proyectos viales en el país, siempre y cuando se cuente con datos confiables y un modelo matemático calibrado.

Aporte: Aplicación práctica del software AnyLogic para modelar escenarios de tráfico con datos reales para así comparar alternativas de diseño estructural.

Diferencia: Se toma en cuenta cambios en la infraestructura del Condado Shopping, mientras que en la presente investigación está enfocada en proyecciones de población y vehículos privados sin proponer cambios estructurales ni viales.

- **Modelación, Simulación y Predicción de los Accidentes Viales en una Intersección mediante Autómatas Celulares e Inteligencia Artificial** (Hernández Peralta, 2024).

Autor: Pablo Humberto Hernández Peralta, (2024).

Objetivo general: Desarrollar mediante autómatas celulares e inteligencia artificial el modelo de un programa que simule y prediga los accidentes automovilísticos en una intersección vial.

Metodología:

Uso de Autómatas Celulares en la simulación con parámetros viales y reglas previamente definidas como: aceleración, frenado, aleatoriedad, cambios de carril.

Después de ser ejecutada la simulación se obtienen datos como: flujo vehicular, densidad vehicular, probabilidad de choque para diversos escenarios de tráfico.

Por último, se hace uso de la IA (Inteligencia Artificial) con el fin de entrenar un modelo de clasificación K-Vecinos más Cercanos (KNN) con los datos obtenidos de la simulación.

Hallazgos: El correcto uso de los Autómatas Celulares simula de manera eficiente la congestión, embotellamientos y choques vehiculares.

En base a los datos obtenidos de la simulación las redes neuronales no alcanzaron una buena precisión ($R < 0.1$).

El algoritmo KNN resulta ser el más confiable para predecir la ocurrencia de accidentes con un $ROC \approx 0.97$.

Conclusión en torno al objetivo general: El uso de los Autómatas Celulares junto con el Machine Learning (ML) mostró un eficiente desempeño para clasificar los accidentes y los no accidentes de la simulación. Además, el algoritmo KNN ofreció resultados satisfactorios en una intersección vehicular señalizada esto en contraste con las redes neuronales que no ofrecieron resultados concretos y confiables.

Aporte: Los datos obtenidos al realizar las simulaciones nos dan fuertes bases para poder entrenar un modelo de IA, que al ser combinada con Machine Learning nos permitirá predecir con más certeza las probabilidades de choques en simulaciones futuras.

Diferencia: Se hace uso de autómatas celulares con el enfoque de predecir accidentes y no accidentes en una determinada intersección, por otro lado, la presente investigación se centra en la congestión vehicular.

- **Análisis del impacto de vehículos autónomos y convencionales sobre el tráfico vehicular mixto** (Gómez Suárez, 2023).

Autor: Laura Evelyn Gómez Suárez, (2023).

Objetivo general: Desarrollar un modelo de autómata celulares para modelar la dinámica del tráfico vehicular mixto, considerando vehículos autónomos y convencionales. Este tipo de modelos son adecuados para simular, analizar y estudiar el comportamiento del tráfico mixto en vías que tienen uno o varios carriles, así como el impacto que este produce en las vías de bajo diferentes escenarios

Metodología:

Se reviso bibliografía relacionada con: vehículos autónomos (sensores, niveles SAE) y autómatas celulares como enfoque microscópico para la modelación vehicular.

Se modifica el modelo original de Autómata Celular ya que se incorporan vehículos autónomos con tiempo de reacción muy rápida a comparación de una persona, también debido al uso distancias de seguridad menores a las tradicionales.

Las simulaciones son realizadas en distintos escenarios de uno y varios carriles, con distintas velocidades con el fin de obtener graficas de flujo-densidad para observar la congestión vehicular.

Hallazgos:

Al simular con velocidades intermedias se evitan atascos severos en el tráfico lo cual ayuda a la congestión vehicular.

Las simulaciones en varios carriles ofrecen mejoras adicionales, aunque surgen mayores variaciones de velocidad por los cambios de carril entre vehículos.

El factor de seguridad de distancia (r) reduce aún más la distancia de seguridad, lo cual aumenta la capacidad de los carriles viales ya que provoca colisiones leves a velocidades bajas.

Conclusión en torno al objetivo general: El uso de vehículos autónomos ayuda de manera significativa ya que optimiza el tráfico, reduce la congestión, permite una conducción segura y una capacidad vial más alta. De esta forma, el impacto de los vehículos autónomos ayuda al tráfico de una ciudad.

Aporte: El uso de un modelo de Autómata Celular realista que integra la capacidad de reacción ultrarrápida de AV que permite distancias de seguridad más pequeñas (factor r) lo cual modifica la estructura en las fases del tráfico.

Diferencia: La presente investigación usa datos de vehículos convencionales y no autómatas, también involucra el crecimiento demográfico y su impacto en la movilidad urbana del centro de Riobamba en cinco años.

- **Modelo de Simulación Multimodal de Movilidad Urbana** (Carretero Triveño, 2024).

Autor: Mónica Carretero Triveño, (2024).

Objetivo general: Obtener un modelo de simulación de un sistema de transporte multimodal que optimice las rutas para mejorar la eficiencia con la que se mueven las personas y los bienes. De esta forma, se facilitará el cambio de medios y mejorará la eficiencia para satisfacer al usuario en base a sus necesidades.

Metodología:

Diseño del modelo empírico: Se definieron los componentes (estaciones, vehículos y usuarios), las restricciones (capacidad, horarios, congestión) y las variables clave (tiempos de viaje, tasas de llegada, ocupación).

Formulación matemática: Se usaron ecuaciones y distribuciones de probabilidad (por ejemplo, Poisson) para modelar la llegada de pasajeros y el comportamiento de los vehículos en el tiempo.

Desarrollo computacional: Implementación en Python de un modelo por eventos discretos, donde en cada “ciclo de reloj” se actualiza el estado de estaciones, vehículos y usuarios.

Simulación del modelo: Se tomaron rutas de bus y Metro fijas con variaciones de demanda de transporte con las horas pico y frecuencias calibradas para la simulación.

Hallazgos: Para escenarios con demanda vehicular alta el modelo demostró que al incrementar la capacidad o la frecuencia de los vehículos se logra evitar atascos o cuellos de botella. De similar manera al calibrar la frecuencia de los vehículos se mejora de manera muy contundente los tiempos de espera y la puntualidad de las personas que usan estos medios de transporte. Por último, al combinar el Metro con el bus se reduce notablemente la congestión vehicular.

Conclusión en torno al objetivo general: La simulación resalta la utilidad de la modelación para tomar decisiones tales como: incrementar el número de vehículos, cambiar tiempos de salida o llegada de los mismos y modificar las rutas vehiculares existentes. Por otro lado, el lograr una configuración correcta del transporte urbano puede reducir la duración de los viajes y así mejorar la experiencia de los usuarios de transporte urbano.

Aporte: El implementar un modelo multimodal con buses y el Metro de la ciudad ayuda a proporcionar datos cuantitativos sobre los tiempos de viaje, número de vehículos y ocupación de los mismos. Estos datos ayudan a la toma de decisiones en cuanto a modificaciones estructurales o de rutas de transporte público.

Diferencia: La investigación se centra en la ciudad de Madrid con otros tipos de transporte urbano y con el diseño de un modelo que intente satisfacer las necesidades de tránsito para Madrid, en cambio la presente investigación analiza el crecimiento de la población de Riobamba y el parque automotriz sin la necesidad de hacer cambios estructurales ni de rutas de transporte ya existentes.

- **Herramienta para el modelado y la simulación de movilidad urbana** (Heras Quesada, 2023).

Autores: Daniel Heras Quesada, (2023).

Objetivo general: Abordar el reto de adaptar la infraestructura urbana a la creciente necesidad de movilidad sostenible, integrando vehículos ligeros (como bicicletas y vehículos de movilidad personal) en entornos originalmente diseñados para automóviles y buses. Para ello, se propone el diseño de redes de vías ciclistas eficientes en la ciudad de Salamanca, utilizando técnicas de análisis de datos (recolección y ponderación de métricas poblacionales y de tipo de ubicación) y simulación de tráfico mediante la herramienta SUMO.

Metodología:

Recolección y análisis de datos: Recopilación de datos relevantes en fuentes como: OpenStreetMap y el Observatorio de Salamanca.

Procesamiento de datos obtenidos: Uso del algoritmo de Lloyd para agrupar los datos y generar nodos que representen intersecciones estratégicas en las vías para bicicletas.

Simulación del tráfico: Con los datos procesados se los convierten a un formato compatible con SUMO para así lograr la ejecución de simulaciones de flujo para evaluar el rendimiento de cada arquitectura, para así obtener variables como el flujo vehicular, tiempos de viaje y congestión.

Hallazgos: La solución por vecinos equilibra la extensión de la red y la capacidad de carga ya que elimina prácticamente la congestión y reduce los tiempos de viaje, lo cual se ve reflejado en flujos de tráfico regulares durante la simulación.

La conexión densa mejora ciertos tiempos de viaje, pero es inviable por el costo de aplicar esta medida, de igual manera al aplicarla aún existe saturación de en algunas intersecciones.

Conclusión en torno al objetivo general: Se identifica que la configuración de arquitectura optima es la de conexión por vecinos ya que integra de manera sostenible el tránsito de vehículos ligeros en el entorno urbano contribuyendo a la descongestión vehicular lo cual permite mejorar la calidad de vida de las personas que habitan la ciudad. Por lo cual se podría diseñar una red de vías para bicicletas eficiente en la ciudad de Salamanca.

Aporte: Al combinar la recolección de datos con sus algoritmos de filtrado y una simulación en SUMO se puede diseñar nuevas infraestructuras de movilidad sostenible para una ciudad concurrida. Además, se ajusta no solo a una ubicación lo cual facilita un diseño más realista que se puede adaptar a las necesidades de una ciudad.

Diferencia: El estudio se centra en el diseño y la simulación de redes de vías ciclísticas usando algoritmos de clustering y una herramienta SUMO con énfasis en soluciones prácticas para la movilidad sostenible en ciudades con infraestructuras urbanas ya establecidas. Por otro lado, la presente investigación se enfoca en el análisis y la proyección vehicular en Riobamba sin proponer cambios estructurales ni considerando las vías para bicicletas.

El uso de autómatas celulares para analizar fenómenos como la congestión vehicular cuenta con un respaldo sólido en la literatura ya existente. Aun así, no es suficiente puesto que no se enfoca en ciudades pequeñas con calles de dos carriles o estrechas lo cual abre una brecha teórico-práctica para la oportunidad de estudios como el presente, que buscan adaptar modelos ya probados a situaciones cotidianas y contextos específicos.

2.2 Fundamentación Legal

Para garantizar el orden y el desarrollo sostenible en la ciudad de Riobamba y su crecimiento vehicular, se requiere de un estructurado sustento normativo. Este marco legal se encuentra definido en un conjunto de reglamentos nacionales y locales que establecen competencias, regulaciones y estrategias de planificación. A continuación, se presentan las principales normativas que fundamentan esta investigación.

Legislación Nacional

- **Constitución de la República del Ecuador (2008):** El artículo 264 otorga a los gobiernos autónomos descentralizados municipales la competencia de planificar, regular y controlar el tránsito y transporte público dentro de su jurisdicción. También vemos que en el artículo 241 se establece la planificación territorial obligatoria para todos los niveles de gobierno, lo cual sienta las bases para que el Municipio de

Riobamba pueda hacer uso de estrategias para equilibrar el crecimiento demográfico con la infraestructura vial (GAD Municipal del Cantón Riobamba, 2023).

- **Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (2010):** Según el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (2010), el artículo 55, literal f, establece que los gobiernos municipales pueden planificar, regular y controlar el transporte terrestre. Es decir, el municipio tiene la autoridad para diseñar estrategias de movilidad urbana y regular el uso del espacio público (GAD Municipal del Cantón Riobamba, 2023).
- **Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo (2016):** Esta normativa regula de forma eficiente el uso del suelo y también exige que los planes de desarrollo y ordenamiento territorial (PDOT) incorporen proyecciones de crecimiento poblacional. (MIDUVI, 2018).
- **Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial (2008):** Este código legal permite al Municipio de Riobamba la potestad de gestionar el tránsito vehicular dentro de sus territorios con lineamientos claros para la planificación, regulación y control del transporte dentro de la ciudad. También, en uno de sus incisos se puede observar que el Municipio de Riobamba tiene la autorización de implementar medidas específicas que controlen el tráfico dentro de la ciudad (GAD Municipal del Cantón Riobamba, 2023). Es por eso que este código permite a las autoridades la toma de decisiones estratégicas para mejorar la movilidad y la seguridad vial de la ciudad de Riobamba (GAD Municipal del Cantón Riobamba, 2023).

Legislación Local

- **Ordenanza Municipal 005-2016:** Esta ordenanza hace alusión a la competencia municipal sobre tránsito, transporte terrestre y seguridad vial la misma que permite al Municipio de Riobamba asumir la gestión del tránsito local, establecer agentes civiles de tránsito y tomar decisiones que competan al tránsito de la ciudad (GAD Municipal del Cantón Riobamba, 2023).
- **Ordenanza Municipal 006-2017:** Con el objetivo de garantizar el orden y la seguridad en el centro de la ciudad, esta ordenanza establece normas para la ocupación y el uso del espacio público. Lo cual se puede entender como que están prohibidas las actividades que obstruyan el tránsito de vehículos y el de los peatones (GAD Municipal del Cantón Riobamba, 2023).
- **Ordenanza Municipal 009-2024:** Esta ordenanza habla sobre el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) en el cantón Riobamba que asegura un desarrollo urbano sostenible con la incorporación de medidas que ayuden a minimizar los posibles impactos en la circulación vehicular de la ciudad de Riobamba (GAD Municipal del Cantón Riobamba, 2023).
- **Ordenanza Municipal 012-2024:** Esta normativa se busca descongestionar el centro urbano y evitar paradas no autorizadas que agraven el problema del tráfico (GAD Municipal del Cantón Riobamba, 2023), de esta manera, se regula el tránsito de buses interprovinciales dentro del espacio público del cantón (Diario Los Andes, 2024).

2.3 Fundamentación Teórica

2.3.1 Definición y Evolución Histórica de la Matemática Aplicada

La matemática aplicada se concibe como la rama de las matemáticas dedicada a la formulación y solución de problemas reales mediante modelos matemáticos. Estos modelos permiten abstraer, analizar y resolver situaciones complejas en campos tan variados como la ingeniería, la física, la economía y la biología (Kreyszig, 1993).

El modelado matemático se basa en el surgimiento del cálculo diferencial e integral en el siglo XVII, la formulación de ecuaciones diferenciales para modelar procesos físicos y, más recientemente, la implementación de métodos numéricos y estadísticos en la era de la computación, estos han sido hitos fundamentales que han ampliado el alcance y la precisión del modelado matemático resaltando su importancia en el análisis de fenómenos del mundo. (Rao, 2019).

2.3.2 Crecimiento Poblacional en Contextos Urbanos

La interacción entre el crecimiento de la población y la demanda de transporte en las ciudades es un tema recurrente en la estructuración urbana (Hauser & Duncan, 1959). A medida que aumenta la densidad poblacional, se intensifica la presión sobre los servicios e infraestructuras, especialmente en lo referente a la movilidad. Esta manifestación se observa de forma pronunciada en ciudades intermedias, como Riobamba, donde la expansión demográfica conlleva una mayor cantidad de vehículos en circulación incrementando de la congestión (Meyer & Miller, 2001).

2.3.3 Crecimiento Poblacional y Movilidad Urbana

Históricamente, el crecimiento poblacional ha sido explicado por diferentes modelos teóricos. El modelo exponencial propuesto por Malthus (1798) sostiene que la población

tiende a duplicarse a una tasa constante mientras no existan factores que la limiten. Este planteamiento ha sido muy criticado por suponer recursos ilimitados y una capacidad de carga invariable (Hauser & Duncan, 1959).

Estos modelos son muy útiles en ciudades que empiezan a crecer rápidamente lo cual ocasiona la saturación de servicios públicos como es el caso del transporte público ya que analiza de manera más realista el comportamiento de las infraestructuras con el crecimiento urbano (Meyer & Miller, 2001).

2.3.4 Movilidad Urbana y Congestión Vehicular

La movilidad urbana se define como la capacidad de desplazamiento de personas y bienes en el espacio urbano, contemplando aspectos como infraestructura, oferta de transporte público y patrones de viaje (Vuchic, 2007). Históricamente se ha constatado que, a medida que las ciudades crecen y los ingresos mejoran, aumenta la preferencia por el transporte privado, lo que repercute directamente en la congestión.

2.3.5 Crecimiento del Parque Automotor

El parque automotor hace referencia al conjunto de vehículos que circulan en una ciudad o región, y su aumento se ha convertido en un factor clave en la congestión de las zonas urbanas. A medida que mejora el poder adquisitivo de la población y se incrementa la disponibilidad de vehículos, la tasa de motorización, es decir, el número de vehículos por cada mil habitantes tiende a crecer, especialmente en ciudades intermedias que buscan fortalecer su desarrollo económico (Meyer & Miller, 2001).

Es importante entender que la tasa de motorización refleja el ritmo al que la población adquiere vehículos. En entornos donde el transporte público no es eficiente o no cubre adecuadamente las necesidades de la ciudadanía, la preferencia por el automóvil

particular se vuelve predominante, de igual manera tiene relación con los factores socioeconómicos ya que el crecimiento demográfico y la expansión económica suelen correlacionarse con el aumento de vehículos particulares, al mismo tiempo que las políticas públicas pueden o no fomentar la adquisición de autos.

2.3.6 Modelo de Crecimiento Poblacional

El propósito de este modelo es anticipar tendencias futuras y apoyar la toma de decisiones en ámbitos como la economía o la demografía (Malthus, 2023). Básicamente, busca describir cómo una variable cambia a lo largo del tiempo bajo ciertas condiciones, considerando tanto factores internos, como la reproducción o regeneración, como externos, por ejemplo, la disponibilidad de recursos o la presión ambiental. Entre los diferentes enfoques posibles, el modelo exponencial destaca por su simplicidad y por la amplitud de su aplicación.

Modelo Exponencial

El modelo exponencial asume que la tasa de crecimiento es constante y proporcional al tamaño de la población en cada instante (Clark, 1976). Se expresa de la siguiente forma:

$$P(t) = P_0 * (1 + r)^t$$

Donde P_0 es la población inicial, r la tasa de crecimiento y t el tiempo. Este modelo suele utilizarse en escenarios de crecimiento acelerado, cuando no existen datos o evidencias claras sobre la saturación de recursos (Meyer & Miller, 2001).

2.3.7 *Densidad vehicular*

La densidad vehicular (ρ) se refiere al número de vehículos que ocupan un tramo vial en un momento dado (Geroliminis & Daganzo, 2008). Su medición es esencial para estimar el nivel de saturación de una vía:

$$\rho = \frac{N^{\circ} \text{vehículos}}{0.0075}$$

Donde el denominador representa la unidad de longitud o área que se ha normalizado para el conteo, la unidad de medida puede variar (vehículos por kilómetro, vehículos por kilómetro-carril, etc.). A mayor densidad, mayor probabilidad de formación de atascos.

2.3.8 *Velocidad Media y Tiempos de Viaje*

La velocidad media (\bar{v}) permite evaluar la eficiencia de la circulación, calculándose como el promedio de las velocidades de todos los vehículos:

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i}{N^{\circ} \text{vehículos}}$$

Y constituye un indicador de la eficiencia de la circulación. A medida que la densidad vehicular aumenta, la velocidad media tiende a disminuir y los tiempos de viaje se incrementan (Vuchic, 2007).

Para ciudades como Riobamba que estás experimentando un crecimiento rápido la congestión vehicular es un problema grande ya que cuenta con calles angostas y una creciente demanda en el transporte urbano existente. Esta situación se agrava al no existir políticas de gestión del tráfico que regulen el acceso vehicular o impulsen el uso de transporte público eficiente (Meyer & Miller, 2001).

2.3.9 *Autómatas Celulares*

Los autómatas celulares son modelos matemáticos computacionales que interactúan con entornos de espacio y tiempo, en donde cada celda cambia de manera simultánea a partir de un conjunto de reglas establecidas al inicio del modelo. Cada celda actúa de manera única con sus celdas vecinas y cada celda puede adoptar un número finito de estados. Debido a su simpleza se convierte en una herramienta importante al modelar sistemas dinámicos y fenómenos físicos complejos.

Los investigadores pioneros en autómatas celulares fueron John von Neumann y Stephen Wolfram quienes en su origen estudiaron como las reglas simples de los autómatas celulares daban lugar a patrones mucho más complejos, debido al enfoque que tienen los autómatas celulares han permitido su uso en la biología, la física, modelación de crecimiento urbano y la matemática computacional.

Fundamentos de los Autómatas Celulares

El fundamento teórico de los autómatas celulares se sustenta en tres componentes esenciales: la estructura de celdas, la definición de vecindad y las reglas de transición, cuya interacción local es la responsable de la dinámica global y los comportamientos emergentes del sistema.

- **Celdas:** Las celdas constituyen los elementos básicos del autómata. Cada celda puede adoptar un estado de un conjunto finito, lo que permite representar características específicas del sistema modelado.
- **Vecindad:** La definición de la vecindad es fundamental para determinar la interacción entre celdas. Se establecen diversas configuraciones de vecindad, como

la vecindad de Von Neumann (que incluye las celdas adyacentes en direcciones ortogonales) o la vecindad de Moore (que abarca también las diagonales).

- **Reglas de Transición:** Las reglas de transición definen cómo se actualizan los estados de las celdas en función de los estados de sus vecinos. Estas reglas, que son de carácter local constituyen el núcleo del comportamiento del autómata. Aunque simples en su formulación, la reiterada aplicación de estas reglas puede dar lugar a comportamientos complejos y patrones inesperados.

Definición formal de un autómata celular

Conceptualmente, un autómata celular (AC) es un sistema dinámico discreto definido en un espacio n-dimensional, compuesto por una red de celdas que evolucionan en el tiempo según reglas locales deterministas o estocásticas. Formalmente, un autómata celular se puede definir como la tupla:

$$AC = (L, S, N, f)$$

Donde:

- **L (Lattice o Red):** Es un conjunto finito o infinito de posiciones discretas en un espacio n-dimensional. Generalmente, en el caso bidimensional (2D), se representa como una malla cuadrada en la que cada celda tiene coordenadas enteras (i, j) .
- **S (Estados):** Hace referencia al conjunto finito de posibles estados que puede asumir cada celda en la red. Un autómata celular elemental binario, por ejemplo, tiene $S = \{0,1\}$.
- **N (Vecindad):** Se define como el conjunto de celdas que influyen en el comportamiento de una celda dada. Dos de las vecindades más utilizadas son:

- **Vecindad de Von Neumann:** Incluye las cuatro celdas adyacentes en dirección ortogonal.
- **Vecindad de Moore:** Incluye las ocho celdas: adyacentes, horizontales, verticales y diagonales.

Inicialmente una vecindad de una celda en la posición (i, j) se denota como $N(i, j)$.

- **f (Regla de Transición):** Es una función que determina la evolución del estado de cada celda en función del estado actual de la celda y el estado de sus vecinas. Se expresa como:

$$f: S^{|N|} \rightarrow S$$

Donde $|N|$ es el número de celdas en la vecindad.

La actualización de los estados ocurre de manera **sincrónica** para todas las celdas en pasos discretos de tiempo. Para un tiempo $t + 1$, el estado de cada celda $x \in L$ se actualiza como:

$$s_x(t + 1) = f(s_x(t), \{s_y(t) : y \in N(x)\})$$

Donde $s_x(t)$ representa el estado de la celda x en el tiempo t .

Modelo de Nagel-Schreckenberg

El modelo Nagel-Schreckenberg es un autómata celular diseñado específicamente para simular el flujo de tráfico en vías. Se caracteriza por su simplicidad y por la capacidad de reproducir fenómenos observados empíricamente en el tráfico, como la formación de congestiones y la transición de flujo libre a estado de atasco.

Para este modelo se hace una división de celdas discretas en donde cada celda puede o no estar ocupada por un vehículo. Es decir, cada vehículo se asocia a una velocidad que

varía entre 0 y un valor máximo v_{max} . Esto permite la evolución del sistema en pasos de tiempo discretos y se actualiza de manera sincrónica para todos los vehículos.

El comportamiento del modelo se rige por cuatro reglas básicas que se aplican secuencialmente en cada iteración.

- **Aceleración:** Cada vehículo aumenta su velocidad en una unidad, mientras no supere la velocidad máxima permitida:

$$v \leftarrow \min(v + 1, v_{max})$$

- **Frenado:** Ajusta la velocidad del vehículo para evitar colisiones, considerando la distancia d (en número de celdas) con el vehículo que esta antes:

$$v \leftarrow \min(v, d - 1)$$

- **Aleatorización:** Introduce elementos de comportamiento: como reacciones tardías o variabilidad en la conducción, se reduce la velocidad en 1 con probabilidad p , siempre que $v > 0$:

$$v \leftarrow v - 1$$

- **Movimiento:** Cada vehículo se desplaza v celdas hacia adelante:

$$x \leftarrow x + v$$

Al combinar las reglas antes mencionadas se pueden modelar dinámicas realistas del tráfico, tales como la aparición espontánea de congestiones, posibles cambios de velocidad y variabilidad en los tiempos de viaje.

Varios factores han hecho que el modelo Nagel-Schreckenberg sea esencial en la simulación dado que posee los siguientes atributos:

- **Simplicidad y Eficiencia Computacional:** Su formulación simple permite simular grandes sistemas de tráfico con bajo costo computacional, facilitando estudios a escalas amplias y en tiempo real.
- **Captura de Fenómenos Emergentes:** A pesar de sus reglas sencillas, el modelo es capaz de reproducir comportamientos complejos como la transición entre flujo libre y congestión, además de reflejar la sensibilidad a pequeñas perturbaciones en la velocidad (efecto de “caída de presión”).
- **Base para Estudios Comparativos:** Se utiliza como referencia en investigaciones que comparan modelos discretos con enfoques continuos basados en ecuaciones diferenciales, y es un punto de partida para la integración de técnicas de optimización y machine learning en análisis de tráfico.

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación

La presente investigación adopta un enfoque mixto que integra métodos cuantitativos y cualitativos para evaluar el impacto del crecimiento poblacional y del parque automotor en la movilidad urbana de las calles Olmedo y Cristóbal Colón en el centro de Riobamba.

Con este propósito, se emplearán modelos matemáticos de crecimiento poblacional junto con autómatas celulares para simular tanto el aumento de la población como el crecimiento del parque automotor y la congestión vehicular. Para ello se utilizarán datos provenientes del INEC, la Dirección de Gestión de Movilidad, Google Maps, Waze y conteos directos, mientras que un análisis cualitativo del contexto local, basado en observaciones, permitirá comprender las conductas colectivas y las limitaciones del sistema de transporte. La combinación de ambos enfoques facilitará contrastar y complementar los resultados numéricos con la realidad del entorno, lo que a su vez permitirá diseñar estrategias prácticas y de bajo costo destinadas a mitigar la congestión vehicular y mejorar la movilidad urbana.

3.2 Diseño de la Investigación

El estudio se realizará mediante un diseño no experimental, mixto y descriptivo, que integra la recolección y el análisis simultáneo de datos cuantitativos y cualitativos; en el componente cuantitativo se aplicarán modelos matemáticos como autómatas celulares y modelos de crecimiento demográfico apoyados en datos oficiales del INEC y de la Dirección de Gestión de Movilidad para simular y proyectar la evolución del tráfico vehicular en el

centro de Riobamba, mientras que en el componente cualitativo se emplearán técnicas de campo y revisión documental para contextualizar el fenómeno, describir las dinámicas sociales y comprender las limitaciones del sistema de transporte en el entorno urbano, permitiendo de esta forma obtener una visión integral del impacto del crecimiento poblacional y vehicular sobre la movilidad urbana.

3.3 Tipo de Investigación

Esta investigación es aplicada, pues sus resultados tienen implicaciones prácticas directas para la planificación y gestión del transporte urbano en Riobamba; además, adopta un carácter descriptivo al centrarse en la identificación y caracterización de patrones de movilidad y congestión vehicular, permitiendo comprender el impacto del crecimiento poblacional y del parque automotor.

3.4 Nivel de Investigación

El presente estudio tiene un enfoque descriptivo y proyectivo, ya que busca documentar y analizar los patrones actuales de movilidad urbana en el centro de Riobamba, al mismo tiempo que proyecta posibles escenarios futuros considerando el crecimiento de la población y del parque automotor. Este enfoque permite identificar tendencias, reconocer los puntos críticos de congestión y anticipar cómo podrían evolucionar estos factores en los próximos años, ofreciendo así una base sólida para diseñar estrategias efectivas de gestión del tráfico.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La recolección de datos se realizará mediante una combinación de técnicas e instrumentos: se efectuará una revisión documental de informes oficiales del INEC y la Dirección de Gestión de Movilidad, junto con datos históricos de tráfico vehicular, para

establecer una base cuantitativa sobre el crecimiento poblacional y el parque automotor; se llevará a cabo la observación directa del flujo vehicular en la intersección de las calles Olmedo y Cristóbal Colón del centro de Riobamba, con el fin de registrar la congestión en diferentes horarios; y se utilizarán herramientas tecnológicas como Google Maps y Waze para obtener información en tiempo real sobre el tráfico y la congestión, lo que permitirá validar y ajustar las simulaciones, mientras que Excel se usará para organizar, procesar y visualizar los datos, adicionalmente en Python se realizarán las simulaciones de congestión vehicular y se proyectará el impacto del crecimiento poblacional en el sistema de transporte.

3.6 Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de Datos

Las simulaciones y el análisis con herramientas tecnológicas permitirán el procesamiento y la interpretación de los datos. Para el componente cuantitativo, se emplearán simulaciones en Python para modelar el crecimiento poblacional, el parque automotor y la congestión vehicular utilizando autómatas celulares. Además, Excel se utilizará para el procesamiento preliminar de datos, entre ellos, la organización y visualización de resultados. Estas simulaciones permitirán generar escenarios de congestión y evaluar cómo las variaciones en la movilidad inciden en la eficiencia del sistema de transporte en el centro de Riobamba. Para la interpretación de los resultados, se analizarán las tendencias emergentes y se compararán con los datos obtenidos de Google Maps, Waze y otras fuentes, ajustando los modelos conforme sea requerido.

3.7 Población y Muestra

En esta sección se describen las dos poblaciones principales involucradas en el estudio: la población demográfica y la población vehicular, así como la manera en que se definió la muestra que permitió recopilar datos sobre el flujo y el comportamiento del tráfico

en la intersección de las calles Olmedo y Colón, en la ciudad de Riobamba. Además, se detallan los aspectos fundamentales de la simulación que se llevará a cabo, abarcando el diseño y la recolección de datos, junto con los criterios para el muestreo y los parámetros considerados en el análisis de la movilidad urbana.

3.7.1 Población

La población de estudio se compone de dos grupos principales:

- Población demográfica: se considera a los habitantes que residen o trabajan en el área del centro histórico de Riobamba, con especial énfasis en la zona circunscrita a la intersección de la calle Olmedo y Colón, según datos del INEC, que reportó 188.891 habitantes en la zona urbana de Riobamba en 2022.
- Población vehicular: aquí se incluirán aquellos vehículos privados registrados en Riobamba utilizando datos históricos de la Dirección de Gestión de Movilidad.

3.7.2 Tamaño de la Muestra

La muestra se definió como el conjunto de datos obtenidos mediante observación directa y registros en la intersección de la calle Olmedo con la calle Colón, mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. En ella se incluyen datos de tráfico vehicular, registrando el flujo y la densidad de vehículos en intervalos de días representativos y durante horarios pico (7:00-8:00 AM, 12:30-13:30 PM y 4:30-5:30 PM), así como datos de comportamiento y sincronización, mediante la observación de patrones de aceleración, detención, cambios de carril y el efecto de los tiempos de semáforo sobre el flujo vehicular.

3.7.3 Simulación

Para la simulación se utilizaron datos provenientes de fuentes oficiales y registros de campo que aseguran la robustez del modelo. En este sentido, se incorporaron datos del

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), los cuales proporcionan información demográfica y proyecciones poblacionales relevantes para estimar la demanda de movilidad. Asimismo, se emplearon conteos que incluyen datos precisos sobre el flujo vehicular, tiempos de semáforo y patrones de tráfico en la zona.

La intersección de estudio se localiza en el centro de Riobamba, específicamente en el cruce de la calle Olmedo con la calle Colón, una zona caracterizada por su alta densidad vehicular durante las horas pico. La Figura 1 y 2 presentan el área junto a un mapa que ilustra la ubicación exacta de las calles, proporcionando un contexto visual y geográfico fundamental para la correcta calibración y validación del modelo de simulación. A demás, la Figura 3 muestra los autos en la calle Olmedo y la Figura 4 muestra a los autos de la calle Cristóbal Colón.

Figura 1

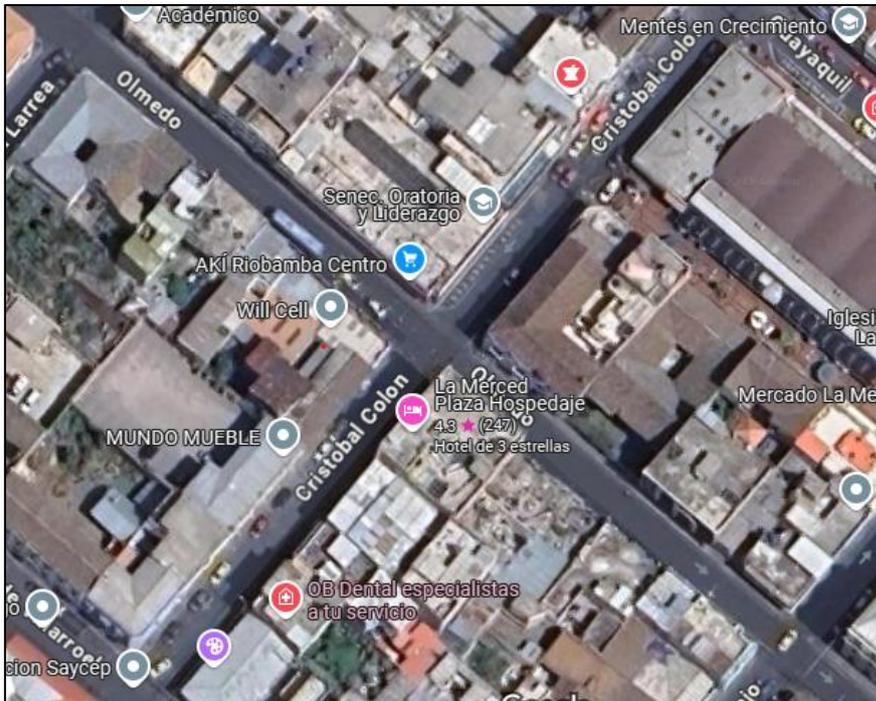
Intersección de las calles Olmedo y Cristóbal Colón (Riobamba, Ecuador)



Fuente: El autor.

Figura 2

Vista aérea de las calles Olmedo y Cristóbal Colón (Riobamba, Ecuador)



Fuente: El autor.

Figura 3

Calle Olmedo (Riobamba, Ecuador)



Fuente: El autor.

Figura 4

Calle Cristóbal Colón (Riobamba, Ecuador)



Fuente: El autor.

Proyección Poblacional y del Parque Automotriz

El propósito de este apartado es definir las bases para la simulación del tráfico, tomando en cuenta el crecimiento poblacional en relación con la tasa de incremento vehicular para los próximos cinco años (2025-2030), además, se presentaran las correspondientes proyecciones de la población y del parque automotriz de Riobamba.

3.7.4 Datos y Variables de Entrada para la Proyección Poblacional

Según datos del INEC la población de Riobamba para el año 2022 fue de 188.891 habitantes (INEC, 2022). A partir de estos datos se ha estimado una tasa de crecimiento poblacional aproximada de 3,5% anual. Esta cifra se considera razonable para la proyección de cinco años y también, se tiene en cuenta que no hay restricciones significativas en la expansión urbana ni variaciones en las estadísticas de natalidad y migración urbana.

Para proyectar la población en los próximos cinco años, se recurre a un modelo exponencial simple. Este modelo se expresa como:

$$P(t) = P_0 * (1 + r)^t$$

3.7.5 Datos y Variables de Entrada para la Proyección del Parque Automotriz

Con datos de la Dirección de Gestión de Movilidad, Tránsito y Transporte partimos de una cifra de 55.671 vehículos registrados en la ciudad de Riobamba para el año 2023 (Dirección de Gestión de Movilidad, Tránsito y Transporte, 2024). Esta cifra nos ayudara a tomar un punto de partida para proyectar el número de automotores en la ciudad durante los próximos cinco años.

Se ha optado por un modelo de crecimiento exponencial para proyectar el número de vehículos, según la siguiente expresión:

$$V(t) = V_0 * (1 + \alpha)^t$$

3.7.6 Datos y Variables de Entrada para la Simulación del Tráfico

El área de estudio se centra en la intersección de dos vías ubicadas en el centro de Riobamba, lo que permite un análisis detallado del comportamiento vehicular. La calle Olmedo es la vía principal, con un solo sentido de circulación de arriba hacia abajo, cuenta con giro único a la derecha y posee dos carriles: la calle mide 72.5 m de largo con un ancho total de siete metros, siendo cada carril de 3.5 m.

Además, esta calle funciona como parada de buses de transporte público. Por su parte, la calle Colón, que actúa como vía transversal, tiene un solo sentido de circulación de izquierda a derecha, con giro único a la izquierda y también consta de dos carriles con las mismas dimensiones (72.5 m de largo, siete metros de ancho total y carriles de 3.5 m cada

uno), siendo además una calle de libre estacionamiento a la derecha y en un tramo, parada de taxis.

En la intersección de las calles Olmedo y Cristóbal Colón ambas de sentido único y con un semáforo que alterna ciclos de 30 segundos en verde, 3 segundos en amarillo y 25 en rojo para la calle Olmedo, mientras que, para la calle Cristóbal Colón se alterna ciclos de 25 segundos en verde, 3 segundos en amarillo y 25 en rojo.

Complementariamente, la sincronización de la intersección se configura mediante semáforos instalados en cada calle, en la calle Olmedo se alternan ciclos de 30 segundos en verde, tres segundos en amarillo y 25 en rojo, mientras, que para la calle Cristóbal Colón se alterna ciclos de 25 segundos en verde, tres segundos en amarillo y 25 en rojo.

Para evaluar con mayor precisión las condiciones reales del tráfico y capturar las variaciones intra horarias de la congestión vehicular en la intersección entre la calle Olmedo y la calle Colón, se realizarán simulaciones utilizando intervalos de 15 minutos. Esta decisión se fundamenta en la necesidad de reflejar detalladamente la dinámica cambiante del tráfico en periodos cortos, permitiendo identificar picos de demanda vehicular, patrones específicos de acumulación y evaluar con más claridad la eficiencia del sistema semafórico actual.

Para representar la dinámica del tráfico, se ha optado por un modelo de autómeta celular, en el que:

- El espacio (calles) se discretiza en celdas, cada una de ellas puede estar vacía u ocupada por un vehículo.
- El tiempo se discretiza en pasos (un segundo por iteración).

- Cada vehículo se mueve según reglas locales (si la siguiente celda está libre y la luz del semáforo es verde, avanza; si está ocupada o el semáforo está en rojo, se detiene).

Calle Olmedo:

- Longitud de la calle: 10 celdas (dos carriles en un solo sentido).
- Tasa de llegada: 13 autos por minuto (observación directa).
- Velocidad de los vehículos: una celda cada iteración (aprox. una celda por segundo).
- Semáforo: verde 30s, amarillo tres segundos, rojo 25s (total de 58s).

La Tabla 1 presenta el conteo de vehículos registrados en la Calle Olmedo durante la semana de observación (lunes a viernes), específicamente en la franja horaria de 7:00–8:00, con intervalos de 15 minutos. Estos datos iniciales son fundamentales para la calibración y validación del modelo de simulación utilizado en la investigación.

Tabla 1

Número de vehículos en la Calle Olmedo durante la semana de observación en intervalos de 15 min de 7:00 a 8:00.

Franja Horaria	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Promedio Semanal
7:00 - 7:15	219	205	166	206	202	200
7:15 - 7:30	200	201	149	172	165	177
7:30 - 7:45	146	154	189	162	173	165
7:45 - 8:00	195	191	221	196	203	201

Fuente: El autor.

En base a la Tabla 1 vamos a obtener los datos de autos/min y autos/seg para la implementación en Python:

- Para 7:00–7:15, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 200 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 200 \div 15 \approx 13.33.$$

$$\text{Autos/seg} = 13.33 \div 60 \approx 0.22.$$

- Para 7:15–7:30, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 177 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 177 \div 15 \approx 11.8.$$

$$\text{Autos/seg} = 11.8 \div 60 \approx 0.19.$$

- Para 7:30–7:45, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 165 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 165 \div 15 \approx 11.$$

$$\text{Autos/seg} = 11 \div 60 \approx 0.18.$$

- Para 7:45–8:00, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 201 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 201 \div 15 \approx 13.4.$$

$$\text{Autos/seg} = 13.4 \div 60 \approx 0.22.$$

La Tabla 2 presenta el conteo de vehículos para en la Calle Olmedo durante la semana de observación (lunes a viernes), para la franja horaria de 12:30–13:30 con intervalos de 15 minutos.

Tabla 2

Número de vehículos en la Calle Olmedo durante la semana de observación en intervalos de 15 min de 12:30 a 13:30.

Franja Horaria	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Promedio Semanal
12:30 - 12:45	228	231	234	225	235	231
12:45 - 13:00	280	264	247	276	266	267
13:00 - 13:15	254	251	252	238	254	250
13:15 - 13:30	260	243	235	234	238	242

Fuente: El autor.

- Para 12:30–12:45, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 231 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 231 \div 15 \approx 15.4.$$

$$\text{Autos/seg} = 15.4 \div 60 \approx 0.25.$$

- Para 12:45–13:00, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 267 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 267 \div 15 \approx 17.8.$$

$$\text{Autos/seg} = 17.8 \div 60 \approx 0.29.$$

- Para 13:00–13:15, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 250 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 250 \div 15 \approx 16.66.$$

$$\text{Autos/seg} = 16.66 \div 60 \approx 0.27.$$

- Para 13:15–13:30, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 242 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 242 \div 15 \approx 16.13.$$

$$\text{Autos/seg} = 16.13 \div 60 \approx 0.26.$$

La Tabla 3 presenta el conteo de vehículos registrados en la Calle Olmedo durante la semana de observación (lunes a viernes), en la franja horaria de 16:30–17:30 con intervalos de 15 minutos.

Tabla 3

Número de vehículos en la Calle Olmedo durante la semana de observación en intervalos de 15 min de 16:30 a 17:30.

Franja Horaria	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Promedio Semanal
16:30 - 16:45	226	217	174	213	222	210
16:45 - 17:00	230	234	202	203	195	213
17:00 - 17:15	223	212	186	197	204	204
17:15 - 17:30	223	201	203	189	202	204

Fuente: El autor.

- Para 16:30–16:45, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 210 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 210 \div 15 \approx 14.$$

$$\text{Autos/seg} = 14 \div 60 \approx 0.23.$$

- Para 16:45–17:00, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 213 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 213 \div 15 \approx 14.2.$$

$$\text{Autos/seg} = 14.2 \div 60 \approx 0.23.$$

- Para 17:00–17:15, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 204 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 204 \div 15 \approx 13.6.$$

$$\text{Autos/seg} = 13.6 \div 60 \approx 0.22.$$

- Para 17:15–17:30, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 204 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 204 \div 15 \approx 13.6.$$

$$\text{Autos/seg} = 13.6 \div 60 \approx 0.22.$$

Calle Colón:

- Longitud de aproximación: siete celdas (dos carriles en un solo sentido).
- Tasa de llegada actual: ~tres autos/min (observación directa).
- Velocidad de los vehículos: una celda/iteración.
- Semáforo: verde 25 s, amarillo tres segundos, rojo 30 s (ciclo total de 58 s).

La Tabla 4 presenta el conteo de vehículos registrados en la Calle Colón durante la semana de observación (lunes a viernes), específicamente en la franja horaria de 7:00–8:00, con intervalos de 15 minutos. Estos datos iniciales son fundamentales para la calibración y validación del modelo de simulación utilizado en la investigación.

Tabla 4

Número de vehículos en la Calle Cristóbal Colón durante la semana de observación en intervalos de 15 min de 7:00 a 8:00.

Franja Horaria	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Promedio Semanal
7:00 - 7:15	40	44	35	46	45	42
7:15 - 7:30	36	41	48	45	51	44
7:30 - 7:45	41	39	73	51	77	56
7:45 - 8:00	64	78	83	71	81	75

Fuente: El autor.

En base a la Tabla 4 vamos a obtener los datos de autos/minuto y autos/s para la implementación en Python:

- Para 7:00–7:15, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 42 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 42 \div 15 \approx 2.8.$$

$$\text{Autos/seg} = 2.8 \div 60 \approx 0.04.$$

- Para 7:15–7:30, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 44 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 44 \div 15 \approx 2.93.$$

$$\text{Autos/seg} = 2.93 \div 60 \approx 0.04.$$

- Para 7:30–7:45, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 56 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 56 \div 15 \approx 3.73.$$

$$\text{Autos/seg} = 3.73 \div 60 \approx 0.06.$$

- Para 7:45–8:00, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 75 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 75 \div 15 \approx 5.$$

$$\text{Autos/seg} = 5 \div 60 \approx 0.08.$$

La Tabla 5 presenta el conteo de vehículos registrados en la Calle Colón durante la semana de observación (lunes a viernes) para la franja horaria de 12:30–13:30 con intervalos de 15 minutos.

Tabla 5

Número de vehículos en la Calle Cristóbal Colón durante la semana de observación en intervalos de 15 min de 12:30 a 13:30.

Franja Horaria	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Promedio Semanal
12:30 - 12:45	73	81	77	68	89	78
12:45 - 13:00	59	65	94	64	83	73
13:00 - 13:15	78	80	84	75	85	80
13:15 - 13:30	74	88	79	82	94	83

Fuente: El autor.

- Para 12:30–12:45, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 78 vehículos.
Autos/min = $78 \div 15 \approx 5.2$.
Autos/s = $5.2 \div 60 \approx 0.08$.
- Para 12:45–13:00, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 73 vehículos.
Autos/min = $73 \div 15 \approx 4.86$.
Autos/s = $4.86 \div 60 \approx 0.08$.
- Para 13:00–13:15, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 80 vehículos.
Autos/min = $80 \div 15 \approx 5.33$.
Autos/s = $5.33 \div 60 \approx 0.08$.
- Para 13:15–13:30, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 83 vehículos.
Autos/min = $83 \div 15 \approx 5.53$.
Autos/s = $5.53 \div 60 \approx 0.09$.

La Tabla 6 muestra el conteo de vehículos registrados en la Calle Colón durante la semana de observación (lunes a viernes) para la franja horaria de 16:30–17:30 con intervalos de 15 minutos.

Tabla 6

Número de vehículos en la Calle Cristóbal Colón durante la semana de observación en intervalos de 15 min de 16:30 a 17:30.

Franja Horaria	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Promedio Semanal
16:30 - 16:45	92	78	42	54	69	67
16:45 - 17:00	92	76	88	78	83	83
17:00 - 17:15	78	67	66	75	67	71
17:15 - 17:30	94	75	78	79	88	83

Fuente: El autor.

- Para 16:30–16:45, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 67 vehículos.
Autos/min = $67 \div 15 \approx 4.46$.

$$\text{Autos/s} = 4.46 \div 60 \approx 0.07.$$

- Para 16:45–17:00, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 83 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 83 \div 15 \approx 5.53.$$

$$\text{Autos/s} = 5.53 \div 60 \approx 0.09.$$

- Para 17:00–17:15, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 71 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 71 \div 15 \approx 4.73.$$

$$\text{Autos/s} = 4.73 \div 60 \approx 0.07.$$

- Para 17:15–17:30, el Promedio Semanal en Calle Olmedo = 83 vehículos.

$$\text{Autos/min} = 83 \div 15 \approx 5.53.$$

$$\text{Autos/s} = 5.53 \div 60 \approx 0.09.$$

Intersección:

- Representada como una matriz de 2×2 celdas donde convergen ambas calles.
- Cuando el semáforo de la Calle Olmedo está en verde, los vehículos avanzan de norte a sur (fila 0 → fila 1).
- Cuando el semáforo de la Calle Colón está en verde, los vehículos avanzan de derecha a izquierda (columna 1 → columna 0).

Se analizan dos escenarios principales:

Escenario Actual (2025)

- Basado en los conteos reales de una semana de observación.
- Tasa de llegada para Calle Olmedo: depende de la franja horaria elegida
- Tasa de llegada para Calle Colón: tres autos/min.
- Parque automotriz total: 55.671 vehículos (dato de 2023).
- Población: 188.891 habitantes (INEC, censo 2022).

- Simulación: Se corre el modelo (15 minutos).

Escenario Futuro (2030)

- Horizonte de 5 años respecto al escenario actual (2030).
- Población: Se proyecta de 188.891 a ~ 248733 habitantes (usando 3,5% anual).
- Parque automotriz: Crecimiento de 55.671 vehículos en 2023 a aproximadamente 119276 en 2030.
- Simulación: Se corre el modelo durante 15 minutos con los nuevos datos de llegada.
- Tasa de crecimiento anual del parque automotriz: $(1 + 0.115)^5 \approx 1.72$ esto implica que dentro de 5 años se espera un 72% más.

Se utilizó el lenguaje Python para la implementación, apoyándose en librerías como:

- numpy: librería para manejo de arreglos y funciones matemáticas.
- random: genera números aleatorios de los vehículos.
- matplotlib.pyplot: para generar las gráficas de los vehículos.
- time: para controlar los intervalos y tiempos de la simulación.

Estructura del Código

A continuación, se presentan extractos del código de simulación realizado en Python que ayudaron a simular la intersección de las calles Olmedo y Cristóbal Colón. Los extractos muestran cómo está organizado el modelo así mismo incluyendo la configuración inicial de los parámetros, la lógica detrás de los semáforos presentes y la salida de los datos después de finalizada la simulación.

Segmento 1. Parámetros y Configuración Inicial

```
import numpy as np

import random

import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Parámetros de la Simulación

olmedo_approach_length = 8 # celdas en la aproximación de Calle Olmedo

olmedo_lanes = 2          # 2 carriles (un solo sentido)

colon_approach_length = 6 # celdas en la aproximación de Calle Colón

colon_lanes = 2          # 2 carriles (un solo sentido)

# Intersección 2x2

intersection = np.full((2, 2), None)

# Ciclo semafórico total (segundos)

cycle = 58

# Probabilidades de llegada (autos/s)

olmedo_arrival_prob = 0.27

colon_arrival_prob = 0.08

# Tiempo que tarda un vehículo en cruzar la intersección (s)

CROSSING_TIME = 4
```

```
# Conversión celdas/seg → km/h (1 celda = 20 m)
```

```
CELL_LENGTH_METERS = 20
```

```
def celdas_por_seg_a_kmh(v):
```

```
    return v * CELL_LENGTH_METERS * 3.6
```

Segmento 2. Estado del Semáforo

```
def get_traffic_light_state(road, t):
```

```
    mod_t = t % cycle
```

```
    if road == "olmedo":
```

```
        if mod_t < 30:    return "green"
```

```
        elif mod_t < 33: return "yellow"
```

```
        else:           return "red"
```

```
    else: # colon
```

```
        if mod_t < 30:    return "red"
```

```
        elif mod_t < 55: return "green"
```

```
        else:           return "yellow"
```

Segmento 3. Actualización de la Simulación (core)

```
def update_simulation(t):
```

```
    global max_queue_olmedo, max_queue_colon, entered_vehicles_count,
    exited_vehicles
```

```
    # 1) Leer semáforos
```

```
    ol_light = get_traffic_light_state("olmedo", t)
```

```
    co_light = get_traffic_light_state("colon", t)
```

```
    # 2) Mover vehículos en Calle Olmedo
```

```
    for lane in range(olmedo_lanes):
```

```
        for pos in reversed(range(olmedo_approach_length)):
```

```

v = olmedo[lane][pos]
if v:
    if pos < olmedo_approach_length - 1 and olmedo[lane][pos+1] is None:
        v["distance_traveled"] += 1
        olmedo[lane][pos+1], olmedo[lane][pos] = v, None
    elif pos == olmedo_approach_length - 1 and ol_light in ["green","yellow"]:
        col = lane
        if intersection[0,col] is None:
            v["distance_traveled"] += 1
            v["cross_time"] = 0
            intersection[0,col], olmedo[lane][pos] = v, None
# 3) Mover vehículos en Calle Colón
for lane in range(colon_lanes):
    for pos in range(colon_approach_length):
        v = colon[lane][pos]
        if v:
            if pos > 0 and colon[lane][pos-1] is None:
                v["distance_traveled"] += 1
                colon[lane][pos-1], colon[lane][pos] = v, None
            elif pos == 0 and co_light in ["green","yellow"]:
                row = lane
                if intersection[row,1] is None:
                    v["distance_traveled"] += 1
                    v["cross_time"] = 0
                    intersection[row,1], colon[lane][pos] = v, None

```

4) Procesar cruce de intersección

for i in range(2):

 for j in range(2):

 v = intersection[i,j]

 if v and v["cross_time"] >= CROSSING_TIME:

 exit_time = t

 v["time_in_system"] = exit_time - v["entry_time"]

 exited_vehicles.append(v)

 intersection[i,j] = None

 elif v:

 v["cross_time"] += 1

5) Llegada de nuevos vehículos (probabilística)

for lane in range(olmedo_lanes):

 if olmedo[lane][0] is None and random.random() < olmedo_arrival_prob:

 entered_vehicles_count += 1

 olmedo[lane][0] =

 {"id":random.randint(1000,9999),"type":"olmedo","entry_time":t,"distance_traveled":0}

 for lane in range(colon_lanes):

 if colon[lane][colon_approach_length-1] is None and random.random() < colon_arrival_prob:

 entered_vehicles_count += 1

 colon[lane][colon_approach_length-1] =

 {"id":random.randint(1000,9999),"type":"colon","entry_time":t,"distance_traveled":0}

6) Estadísticas de cola

max_queue_olmedo = max(max_queue_olmedo, sum(1 for lane in olmedo for c in lane if c))

```

max_queue_colon = max(max_queue_colon, sum(1 for lane in colon for c in lane if c))

# 7) Guardar datos para gráficas

cola_olmedo_list.append(sum(1 for lane in olmedo for c in lane if c))

cola_colon_list.append(sum(1 for lane in colon for c in lane if c))

speeds_over_time.append(compute_average_speed_of_exited())

vehicles_passed_over_time.append(len(exited_vehicles))

```

Segmento 4. Ejecución y Resultados

```

def main():

    simulation_time = 900 # 15 minutos = 900 s

    for t in range(simulation_time):

        update_simulation(t)

    print("=== Resultados de la Simulación ===")

    print(f"Cola máxima Olmedo: {max_queue_olmedo}")

    print(f"Cola máxima Colón: {max_queue_colon}")

    ol_ex = sum(v["type"]=="olmedo" for v in exited_vehicles)

    co_ex = sum(v["type"]=="colon" for v in exited_vehicles)

    total = len(exited_vehicles)

    print(f"Vehículos cruzados (Olmedo): {ol_ex}")

    print(f"Vehículos cruzados (Colón): {co_ex}")

    print(f"Total vehículos:          {total}")

    avg_time_ol = np.mean([v["time_in_system"] for v in exited_vehicles if
v["type"]=="olmedo"])

    avg_time_co = np.mean([v["time_in_system"] for v in exited_vehicles if
v["type"]=="colon"])

```

```
    avg_speed =
celdas_por_seg_a_kmh(np.mean([v["distance_traveled"]/v["time_in_system"] for v in
exited_vehicles]))

    print(f"Tiempo espera Olmedo: {avg_time_ol:.2f} s")

    print(f"Tiempo espera Colón: {avg_time_co:.2f} s")

    print(f"Velocidad media:    {avg_speed:.2f} km/h")

    # Gráficas

    plt.figure(); plt.plot cola_olmedo_list, label="Cola Olmedo"); plt.plot cola_colon_list,
label="Cola Colón")

    plt.legend(); plt.title("Evolución de la Cola"); plt.xlabel("Tiempo (s)");
plt.ylabel("Vehículos"); plt.show()

    # ... (resto de gráficas similares) ...

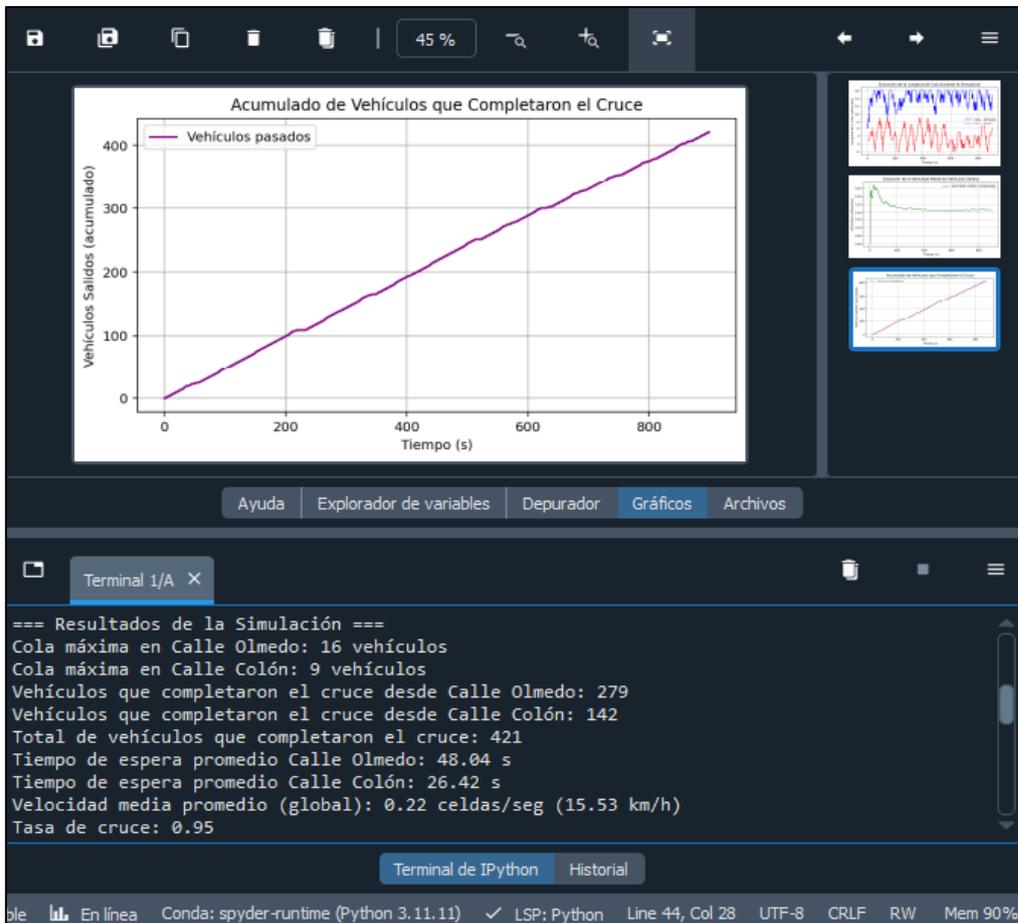
if __name__ == "__main__":

    main()
```

A continuación, en la Figura 5 se muestra la ejecución del código en Python:

Figura 5

Simulación del código en Python



Fuente: El autor.

Inicialización

- Se crean matrices para cada carril de la Calle Olmedo y Colón.
- Se define la intersección de las calles Olmedo y Colón como una matriz de 2x2.
- El ciclo de los semáforos es de 58s con la probabilidad de llegada de vehículos cada segundo.
- La simulación tiene unas 900 iteraciones es decir 15 minutos.
- El estado del semáforo varía entre verde, rojo y amarillo según las iteraciones posibles.

Mover vehículos:

- Cada vehículo avanza si la celda de enfrente está libre y el semáforo lo permite.
- Se detiene al no estar libre la celda de enfrente.
- Se ingresa a la intersección si lo permite el semáforo y si no existen celdas de enfrente ocupadas.
- En la posición inicial de cada carril, se genera un nuevo auto con la probabilidad generada en las tablas anteriormente mencionadas.

Capítulo 4

Análisis y Discusión de los Resultados

El presente capítulo está orientado al análisis y discusión de los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo matemático y la simulación computacional planteados en capítulos anteriores. Se evalúan tanto el escenario actual como la proyección futura (cinco años) del crecimiento poblacional y vehicular, enfocándose especialmente en los efectos sobre la congestión vial en la intersección entre la Calle Olmedo y la Calle Colón, en Riobamba.

4.1 Análisis Descriptivo de los Resultados

4.1.1 Resultados de la Proyección Poblacional

En la Tabla 7 se muestra la evolución esperada de la población de Riobamba desde 2022 hasta 2030. Se observa que para el año 2030 la población proyectada sería de aproximadamente 248.733 habitantes, lo que implica un incremento del 32% con respecto al año base 2022.

Los valores que se muestran a continuación, se obtuvieron mediante un script en Python que implementa la ecuación exponencial:

$$P(t) = P_0 * (1 + r)^t$$

Tabla 7

Evolución esperada de la población de Riobamba desde 2022 hasta 2030

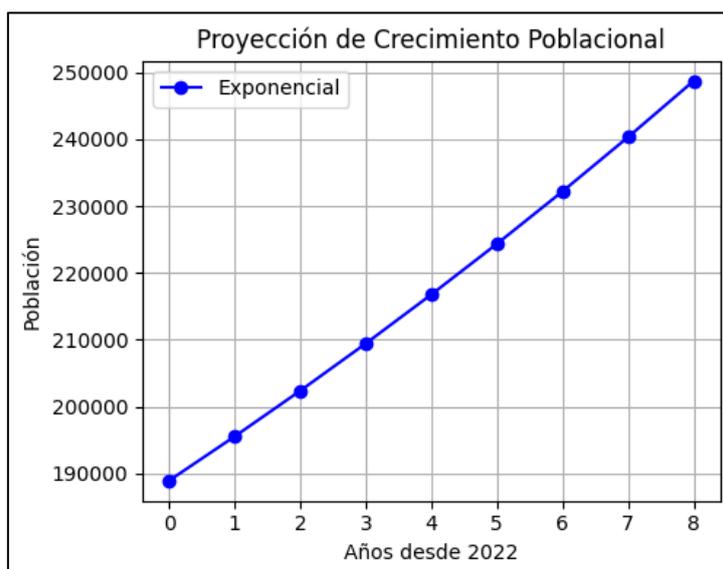
Año	Población	Tasa de crecimiento (%)
2022	188891	3.5
2023	195502	3.5
2024	202344	3.5
2025	209426	3.5
2026	216756	3.5
2027	224343	3.5
2028	232195	3.5
2039	240322	3.5
2030	248733	3.5

Fuente: El autor.

En la Figura 6 se representa la evolución esperada de la población en Riobamba, calculada mediante un modelo exponencial con una tasa de crecimiento anual del 3,5 %. La curva permite visualizar el aumento sostenido desde las 188.891 personas en 2023 hasta los 248.733 habitantes proyectados para 2030, valor que se emplea posteriormente como insumo para la simulación de tráfico en el escenario futuro.

Figura 6

Proyección de Crecimiento Poblacional



Fuente: El autor.

4.1.2 Resultados de la Proyección del Parque Automotriz

En la Tabla 8 se muestra la proyección del parque automotor para los próximos cinco años. Se prevé que para 2030 el número de vehículos llegue a 119.276 automóviles, lo cual implica un aumento del 114% en comparación con 2023.

Los valores que se muestran a continuación, se obtuvieron mediante un script en Python que implementa la ecuación:

$$V(t) = V_0 * (1 + \alpha)^t$$

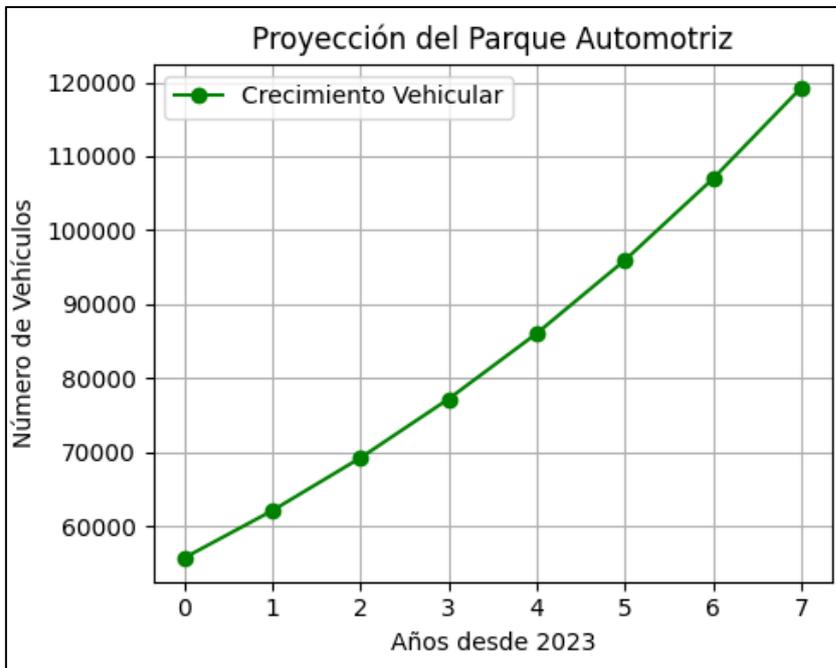
Tabla 8

Proyección del parque automotor para los próximos cinco años.

Año	Población	Tasa de crecimiento (%)
2023	55.671	11.5
2024	62073	11.5
2025	69211	11.5
2026	77170	11.5
2027	86045	11.5
2028	95940	11.5
2029	106974	11.5
2030	119276	11.5

Fuente: El autor

En la Figura 7 se representa la evolución esperada del número de vehículos particulares en Riobamba, calculada mediante un modelo exponencial con una tasa de crecimiento anual del 11,5 %. La curva permite visualizar el aumento sostenido desde los 55.671 vehículos registrados en 2023 hasta los 119.276 proyectados para 2030, valor que se emplea posteriormente como insumo para la simulación de tráfico en el escenario futuro.

Figura 7*Proyección del Parque Automotriz*

Fuente: El autor.

4.1.3 Resultados de la Simulación Vehicular en la calle Olmedo y Cristóbal Colón actualidad

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (7:00 – 7:15)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 4 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 221

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 42

Total, de vehículos que completaron el cruce: 263

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 61.57 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 20.71 s

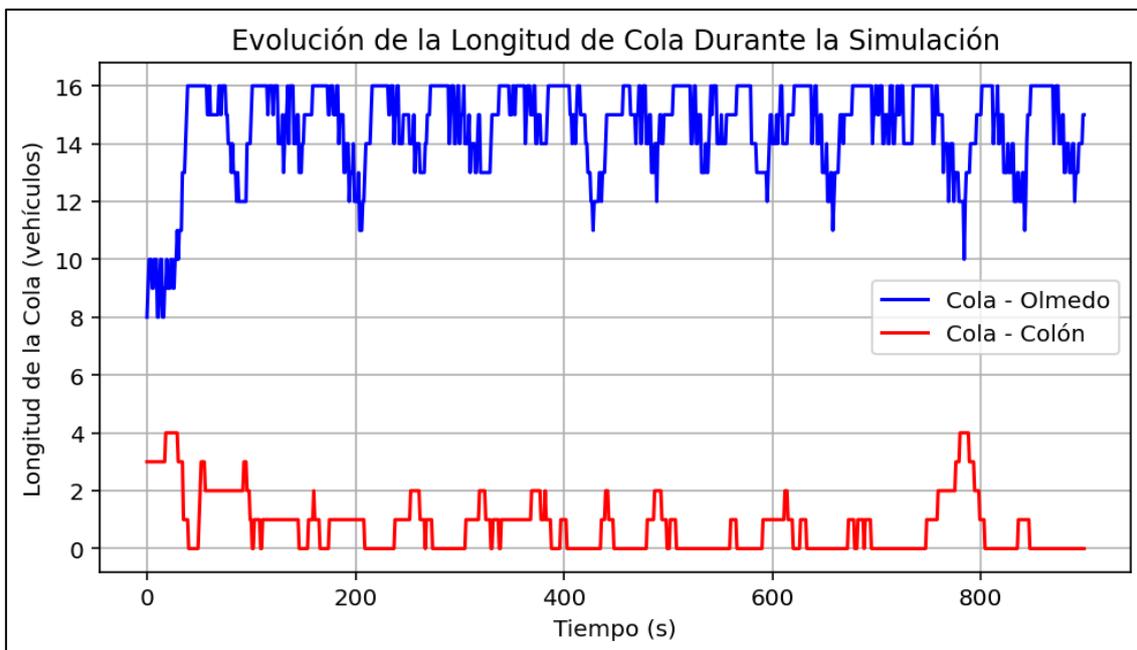
Velocidad media promedio (global): 0.18 celdas/seg (12.77 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 8 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 7:00 a 7:15.

Figura 8

Longitud de la Cola de automóviles de 7:00 a 7:15 en las calles Olmedo y Colón

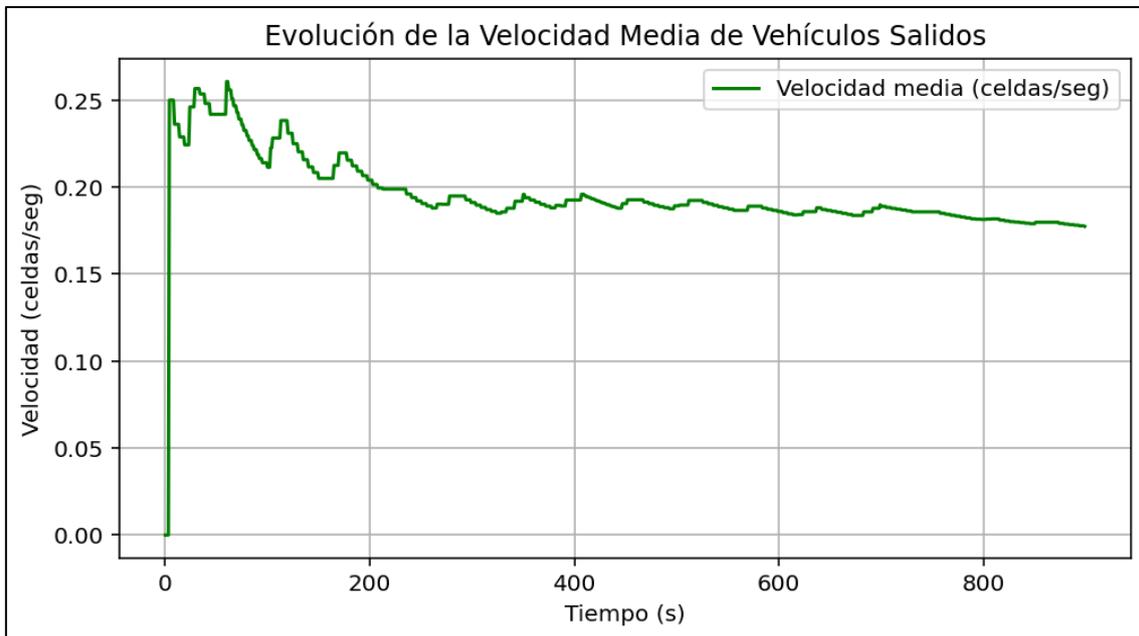


Fuente: El autor.

La Figura 9 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,18–0,20 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 7:00 a 7:15.

Figura 9

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:00 a 7:15

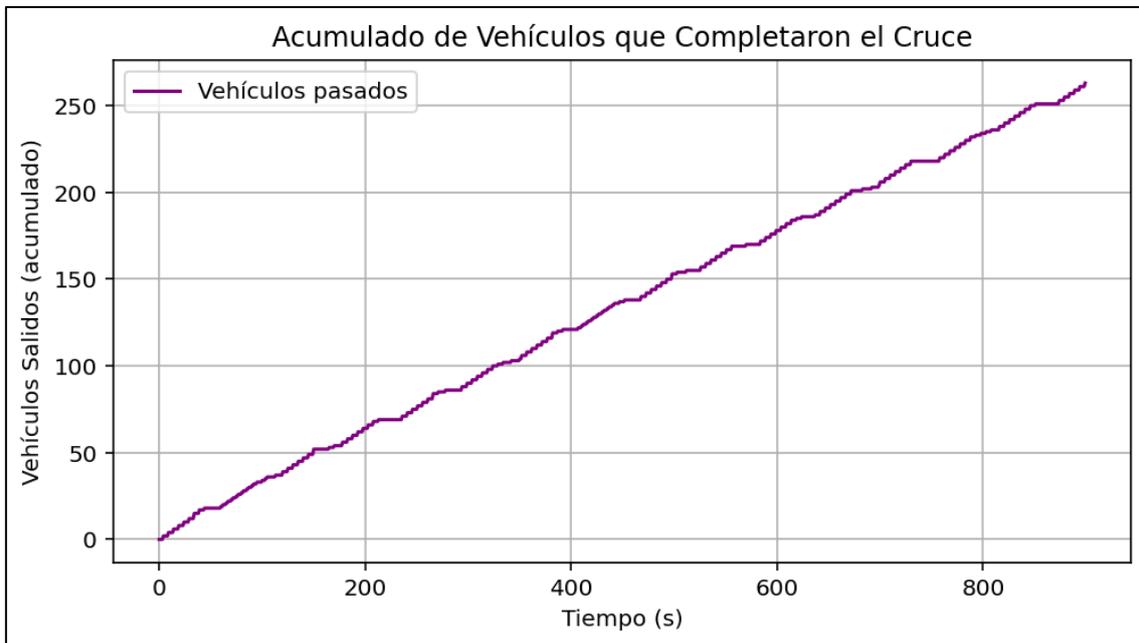


Fuente: El autor.

En la Figura 10 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 263 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 7:00 a 7:15.

Figura 10

Vehículos que completaron el cruce de 7:00 a 7:15 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (7:15 – 7:30)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 8 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 221

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 45

Total, de vehículos que completaron el cruce: 266

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 55.61 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 24.38 s

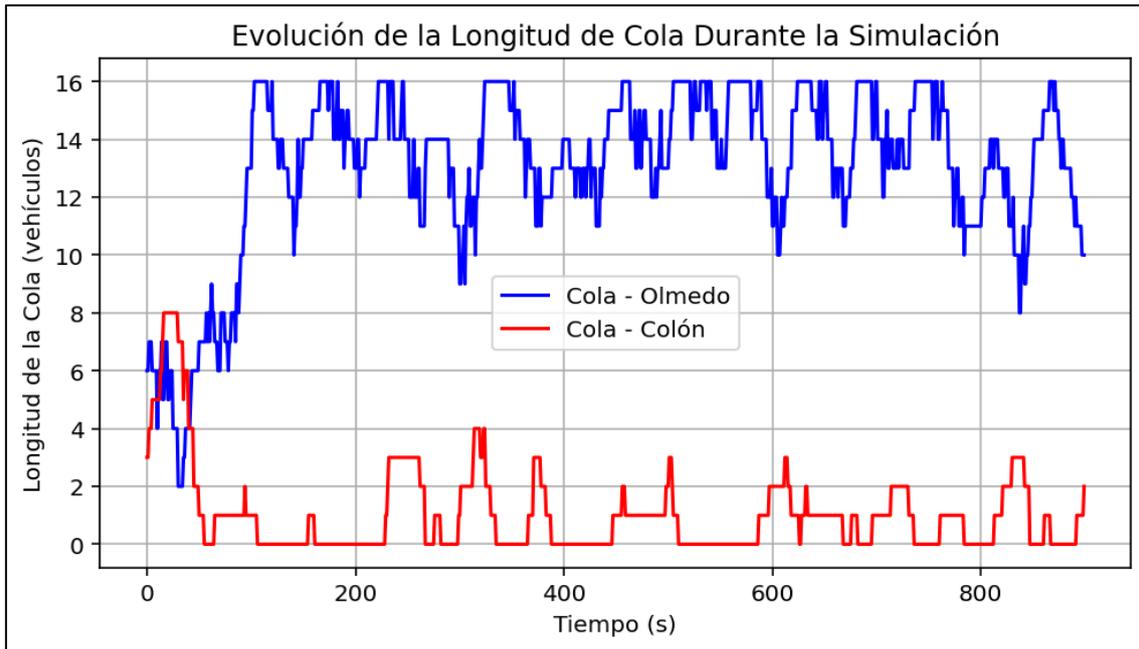
Velocidad media promedio (global): 0.19 celdas/seg (13.77 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 11 muestra cómo segundo a segundo, varía la longitud de la cola en la intersección, durante la franja 07:15–07:30. La línea azul corresponde a la Calle Olmedo y la roja a la Calle Colón, permitiendo comparar la saturación de ambas vías en ese intervalo

Figura 11

Longitud de la Cola de automóviles de 7:15 a 7:30 en las calles Olmedo y Colón

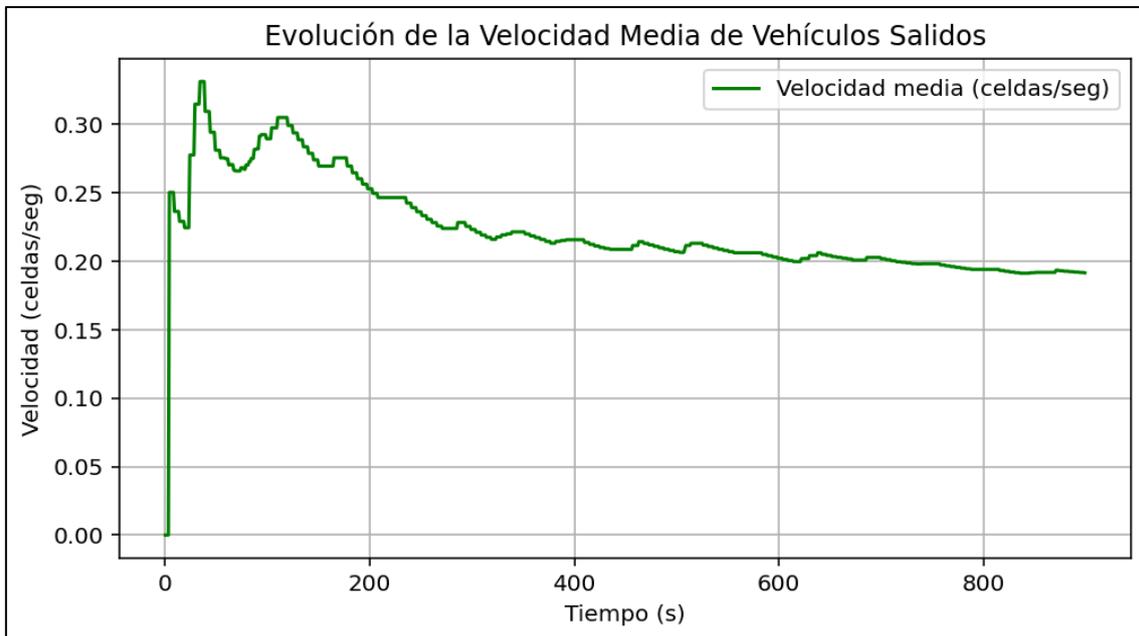


Fuente: El autor.

La Figura 12 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,18–0,19 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 7:15 a 7:30.

Figura 12

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:15 a 7:30

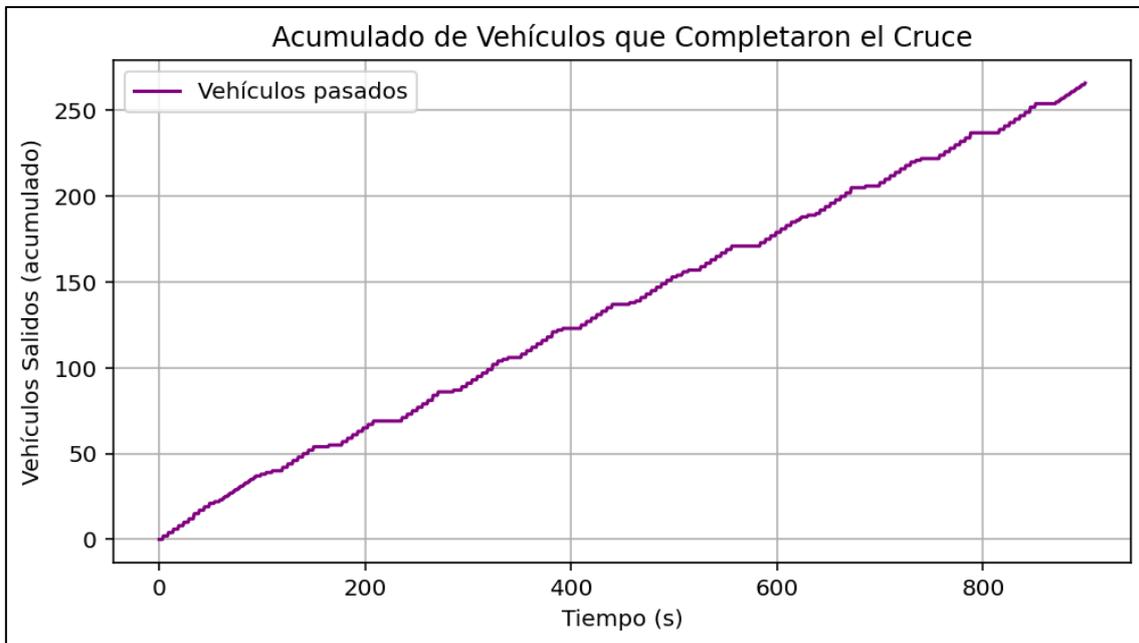


Fuente: El autor.

En la Figura 13 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 266 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 7:15 a 7:30.

Figura 13

Vehículos que completaron el cruce de 7:15 a 7:30 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (7:30 – 7:45)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 6 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 222

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 72

Total, de vehículos que completaron el cruce: 294

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 56.29 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 23.78 s

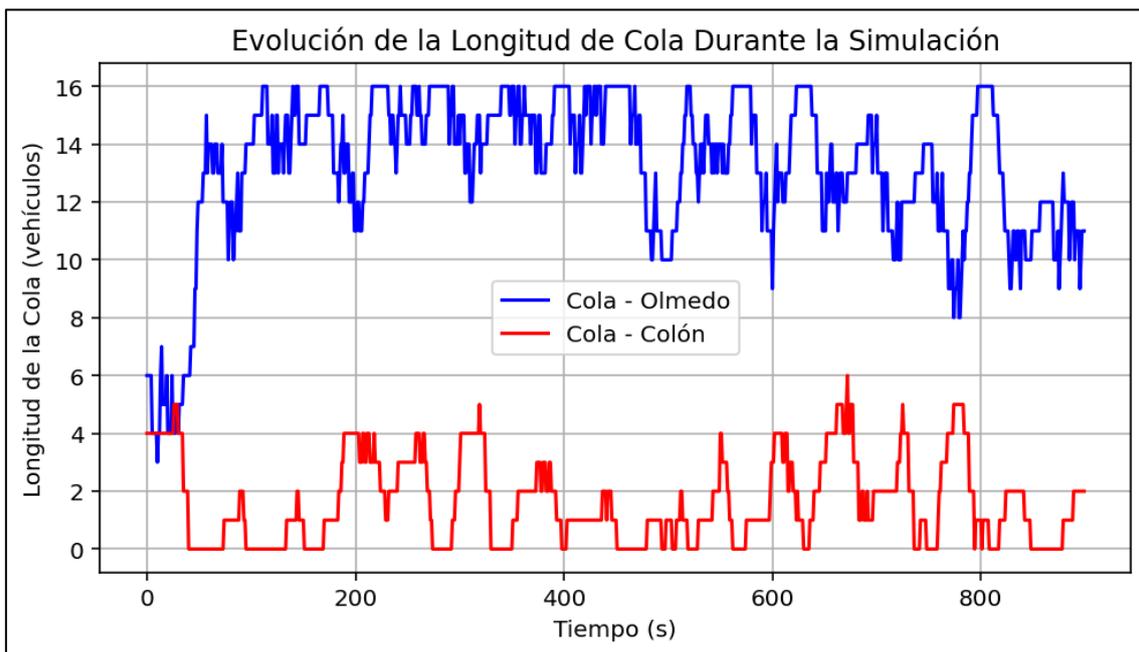
Velocidad media promedio (global): 0.20 celdas/seg (14.07 km/h)

Tasa de cruce: 0.96

La Figura 14 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 7:30 a 7:45.

Figura 14

Longitud de la Cola de automóviles de 7:30 a 7:45 en las calles Olmedo y Colón

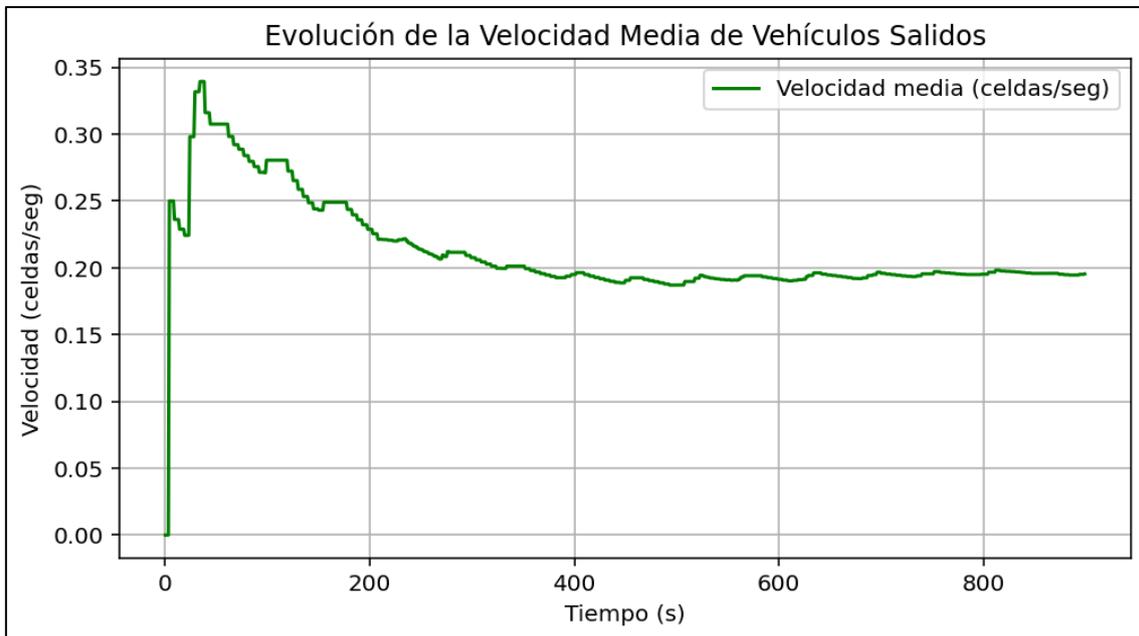


Fuente: El autor.

La Figura 15 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,18–0,20 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 7:30 a 7:45.

Figura 15

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:30 a 7:45

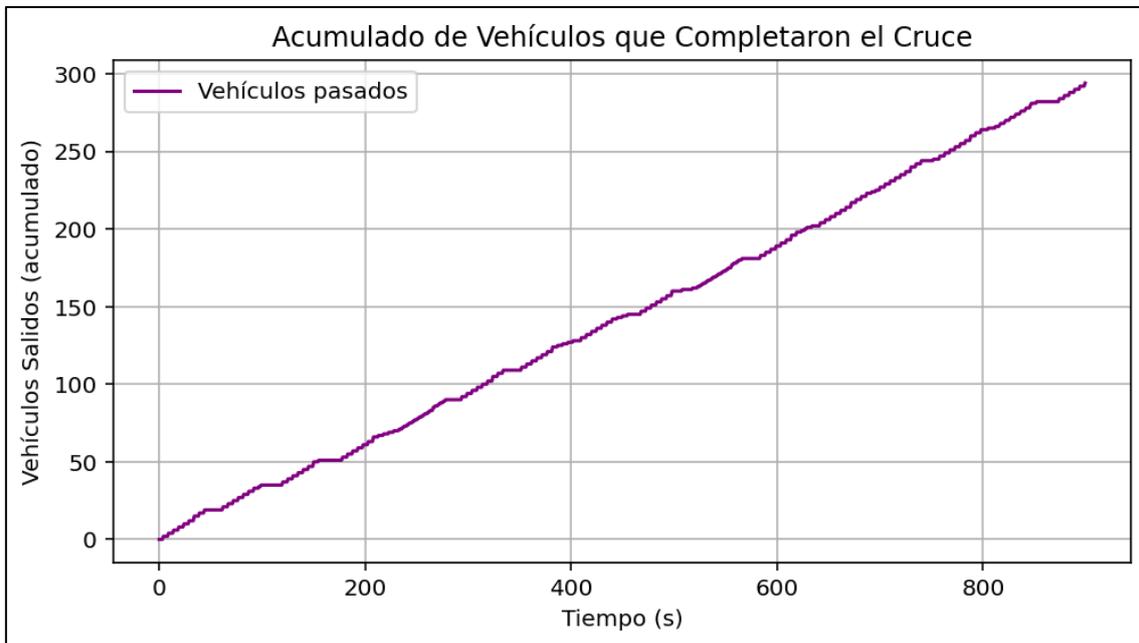


Fuente: El autor.

En la Figura 16 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 294 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 7:30 a 7:45.

Figura 16

Vehículos que completaron el cruce de 7:30 a 7:45 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (7:45 – 8:00)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 9 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 218

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 89

Total, de vehículos que completaron el cruce: 307

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 61.05 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 25.74 s

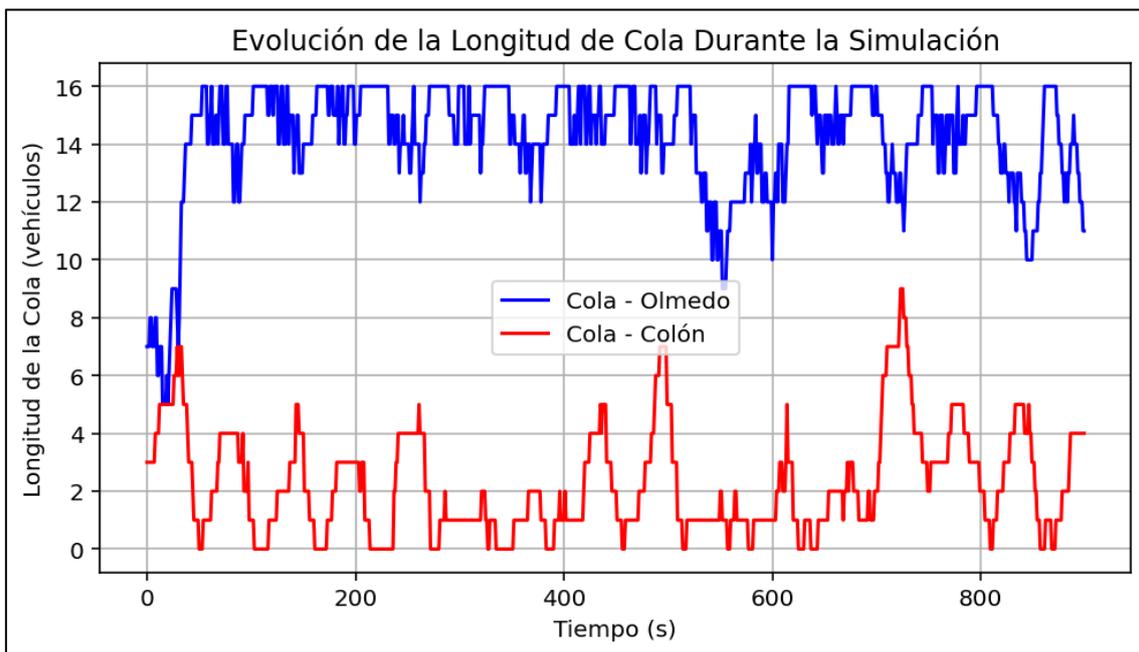
Velocidad media promedio (global): 0.19 celdas/seg (13.43 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 17 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 7:45 a 8:00.

Figura 17

Longitud de la Cola de automóviles de 7:45 a 8:00 en las calles Olmedo y Colón

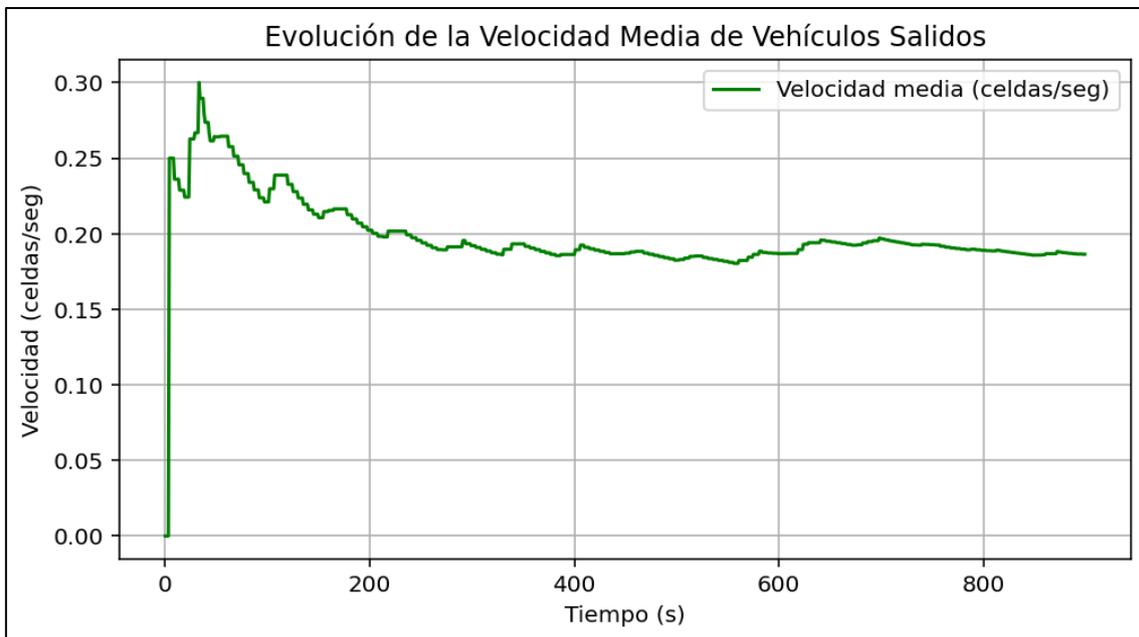


Fuente: El autor.

La Figura 18 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,18–0,19 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 7:45 a 8:00.

Figura 18

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:45 a 8:00

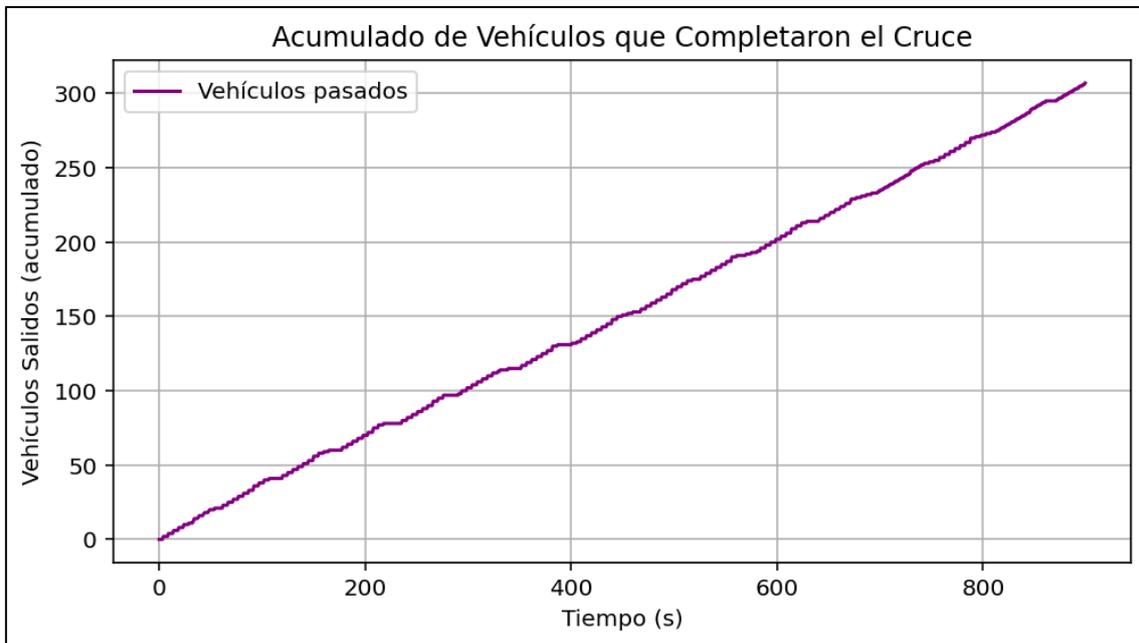


Fuente: El autor.

En la Figura 19 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 307 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 7:45 a 8:00.

Figura 19

Vehículos que completaron el cruce de 7:45 a 8:00 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (12:30 – 12:45)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 8 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 281

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 84

Total, de vehículos que completaron el cruce: 365

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 45.45 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 23.45 s

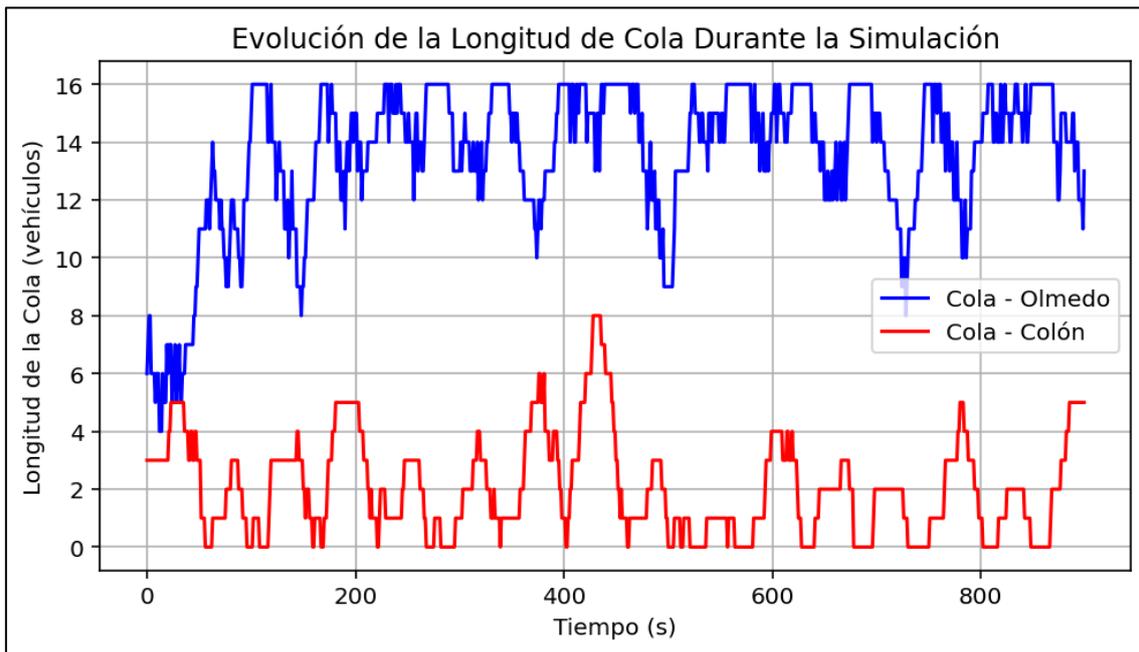
Velocidad media promedio (global): 0.23 celdas/seg (16.41 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 20 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 12:30 a 12:45.

Figura 20

Longitud de la Cola de automóviles de 12:30 a 12:45 en las calles Olmedo y Colón

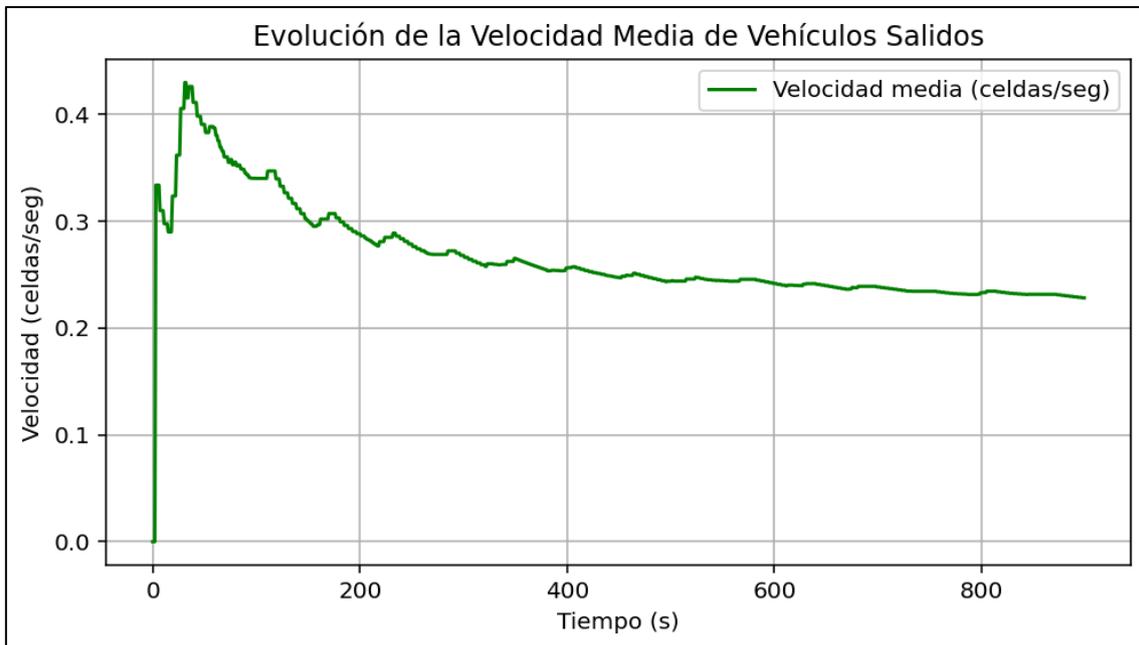


Fuente: El autor.

La Figura 21 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio celdas/seg de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,21–0,23 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 12:30 a 12:45.

Figura 21

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 12:30 a 12:45

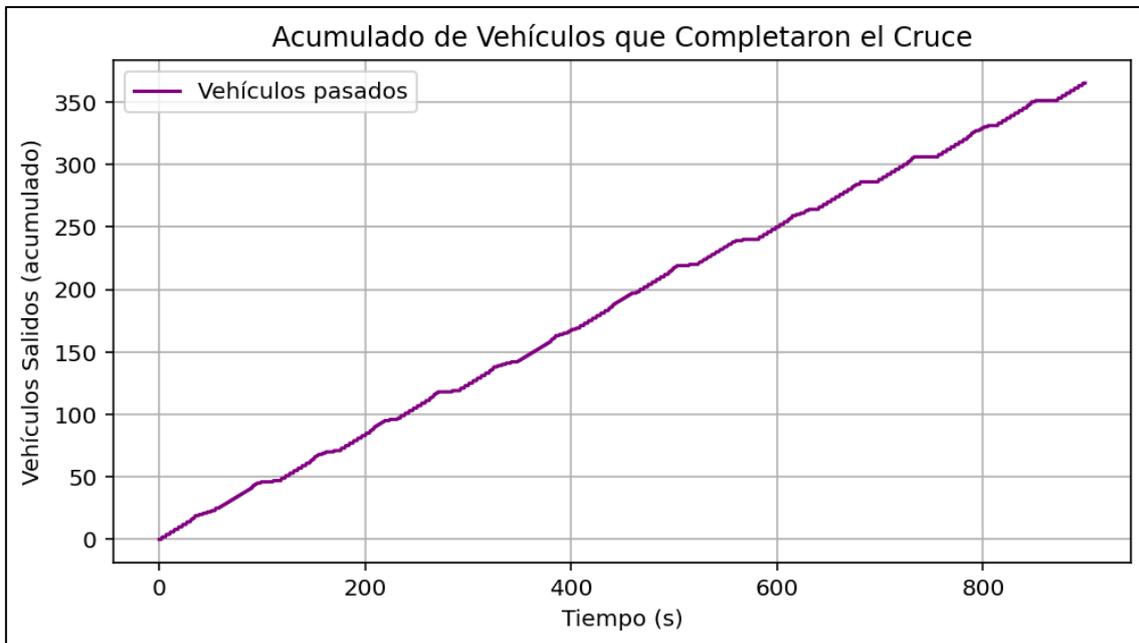


Fuente: El autor.

En la Figura 22 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 365 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 12:30 a 12:45.

Figura 22

Vehículos que completaron el cruce de 12:30 a 12:45 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (12:45 – 13:00)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 8 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 281

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 92

Total, de vehículos que completaron el cruce: 373

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 47.67 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 22.20 s

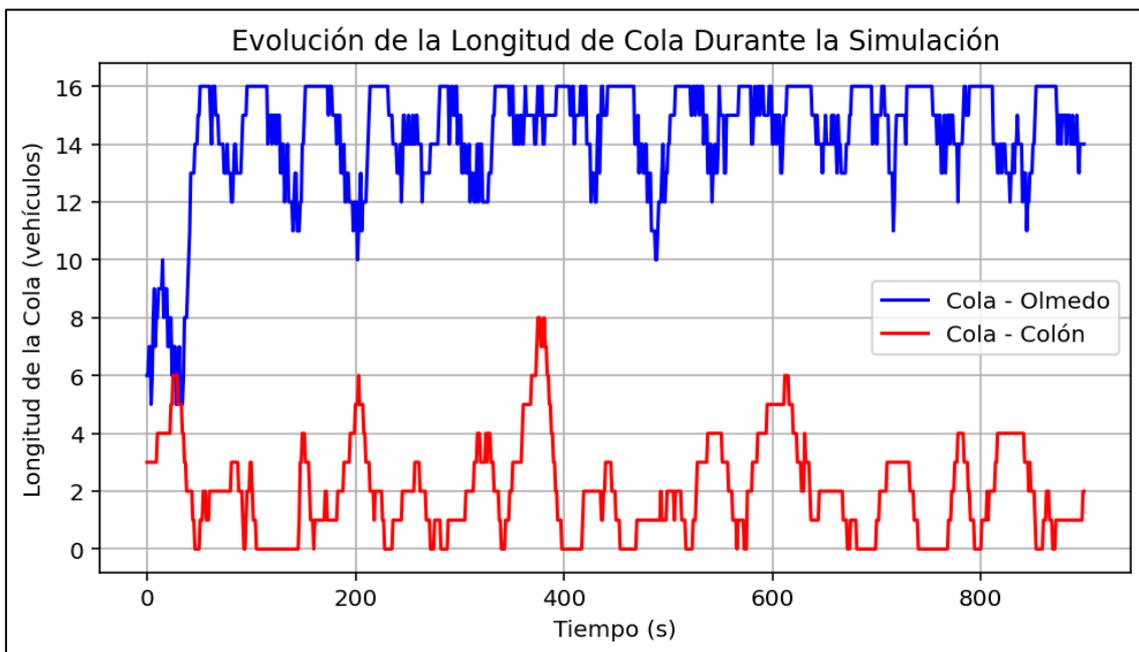
Velocidad media promedio (global): 0.23 celdas/seg (16.37 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 23 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 12:45 a 13:00.

Figura 23

Longitud de la Cola de automóviles de 12:45 a 13:00 en las calles Olmedo y Colón

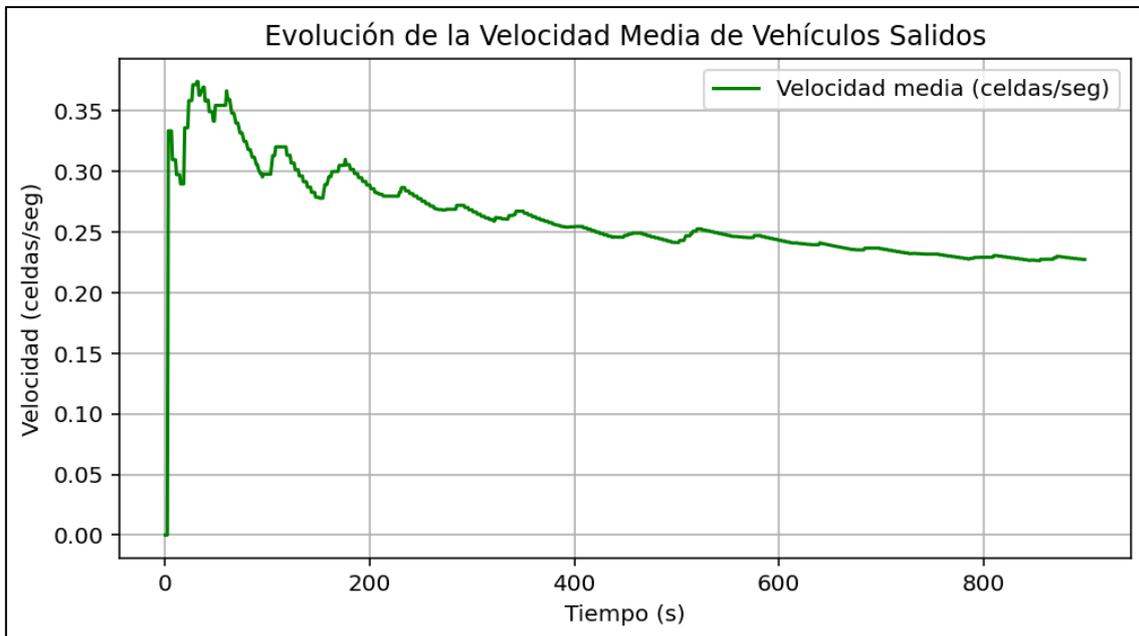


Fuente: El autor.

La Figura 24 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,21–0,23 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 12:45 a 13:00.

Figura 24

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 12:45 a 13:00

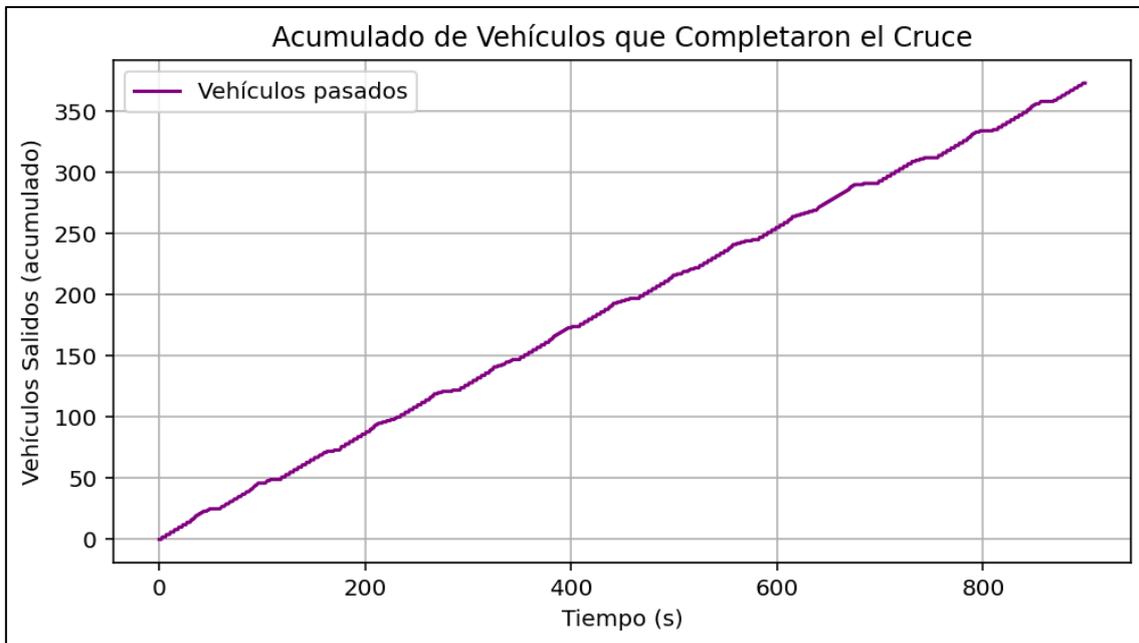


Fuente: El autor.

En la Figura 25 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 373 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 12:45 a 13:00.

Figura 25

Vehículos que completaron el cruce de 12:45 a 13:00 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (13:00 – 13:15)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 7 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 278

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 89

Total, de vehículos que completaron el cruce: 367

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 46.94 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 19.06 s

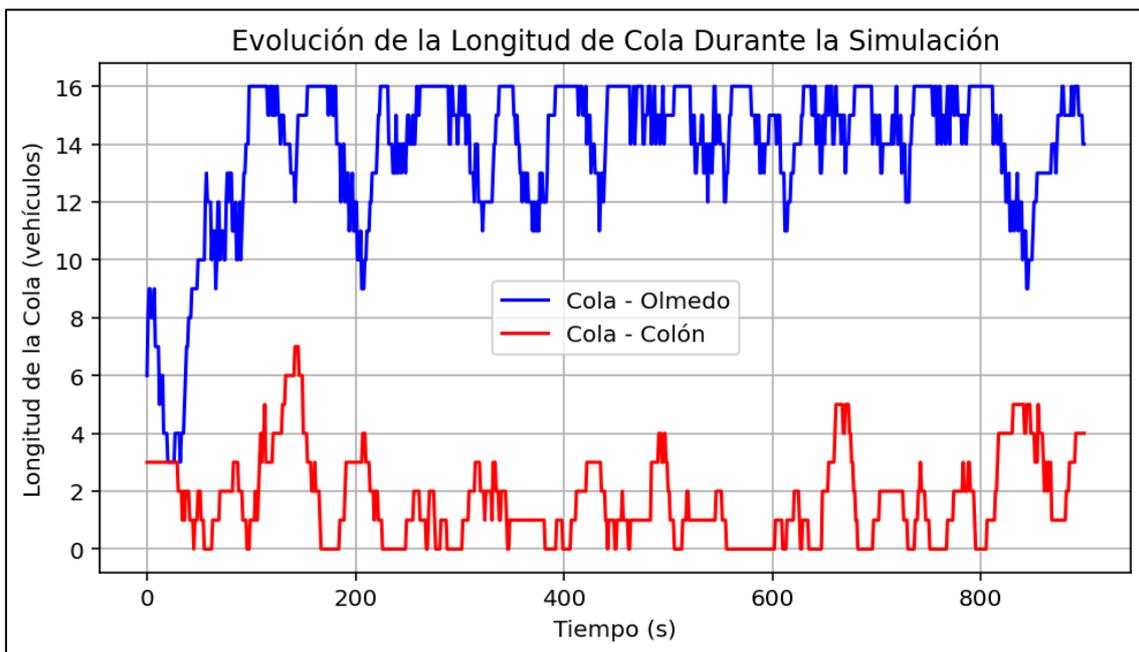
Velocidad media promedio (global): 0.24 celdas/seg (17.42 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 26 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 13:00 a 13:15.

Figura 26

Longitud de la Cola de automóviles de 13:00 a 13:15 en las calles Olmedo y Colón

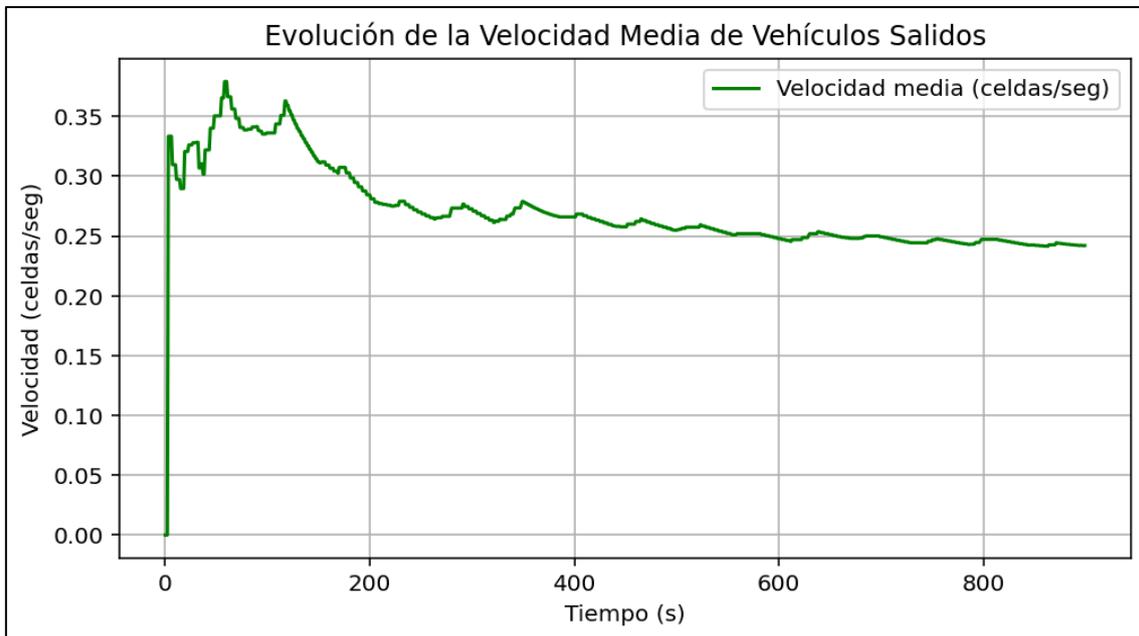


Fuente: El autor.

La Figura 27 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,22–0,24 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 13:00 a 13:15.

Figura 27

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 13:00 a 13:15

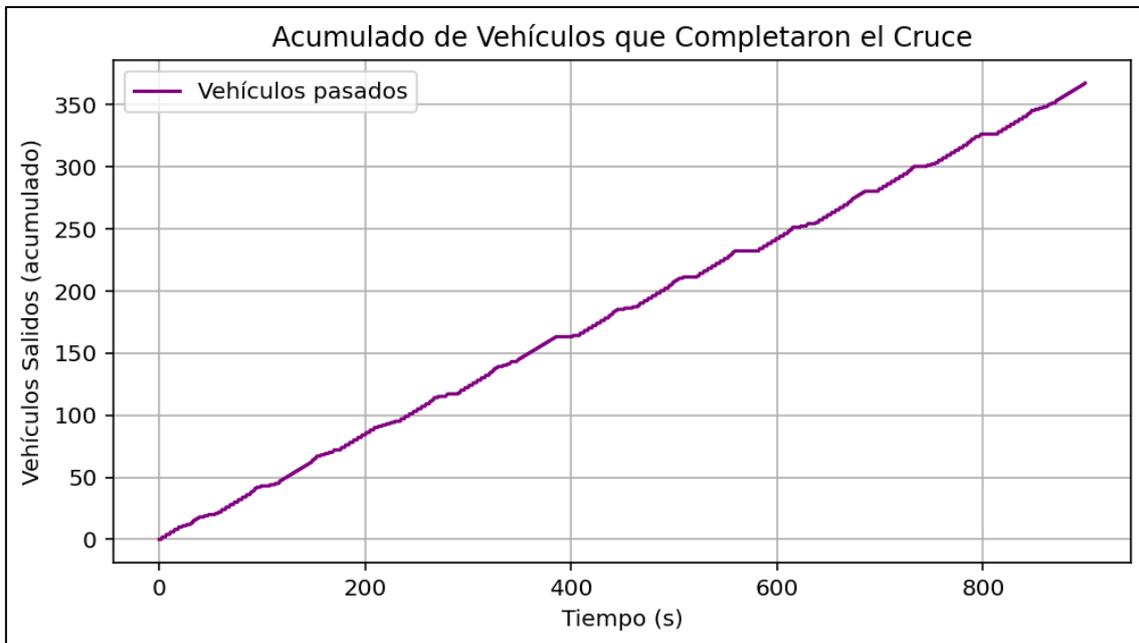


Fuente: El autor.

En la Figura 28 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 367 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 13:00 a 13:15.

Figura 28

Vehículos que completaron el cruce de 13:00 a 13:15 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (13:15 – 13:30)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 10 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 280

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 94

Total, de vehículos que completaron el cruce: 374

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 47.18 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 20.35 s

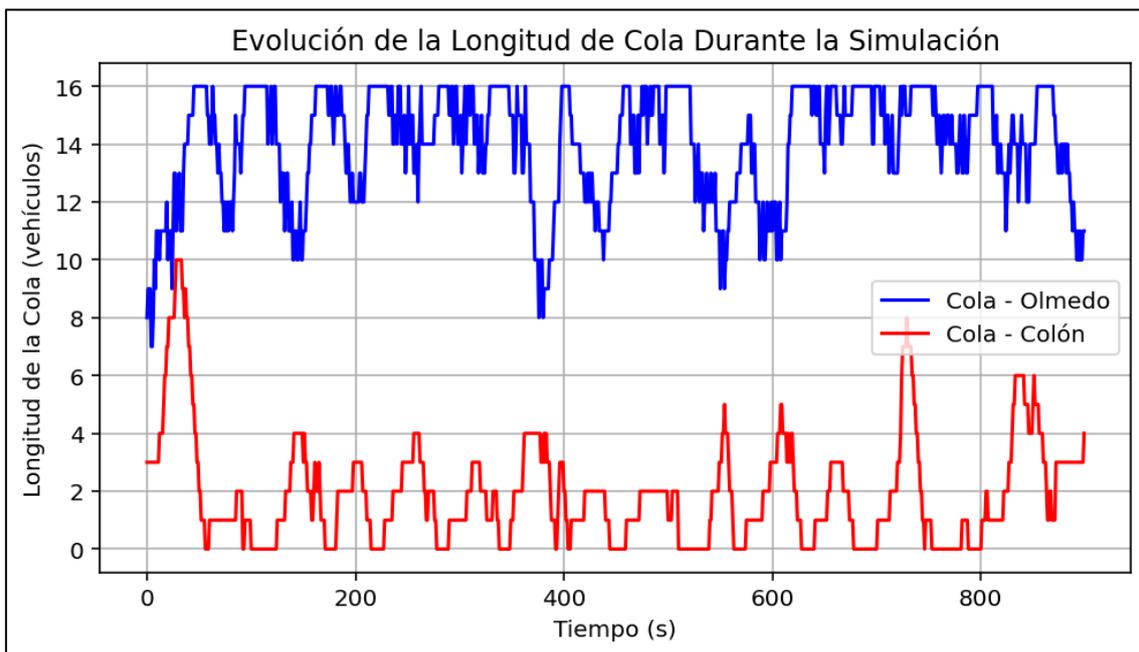
Velocidad media promedio (global): 0.23 celdas/seg (16.65 km/h)

Tasa de cruce: 0.96

La Figura 29 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 13:15 a 13:30.

Figura 29

Longitud de la Cola de automóviles de 13:15 a 13:30 en las calles Olmedo y Colón

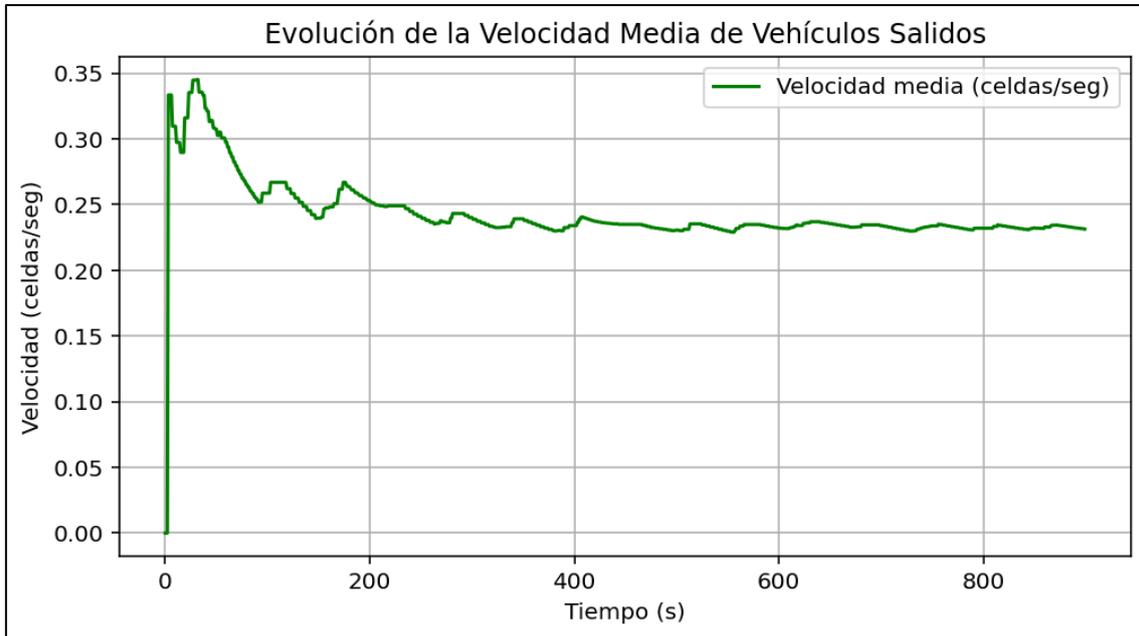


Fuente: El autor.

La Figura 30 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,21–0,23 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 13:15 a 13:30.

Figura 30

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 13:15 a 13:30

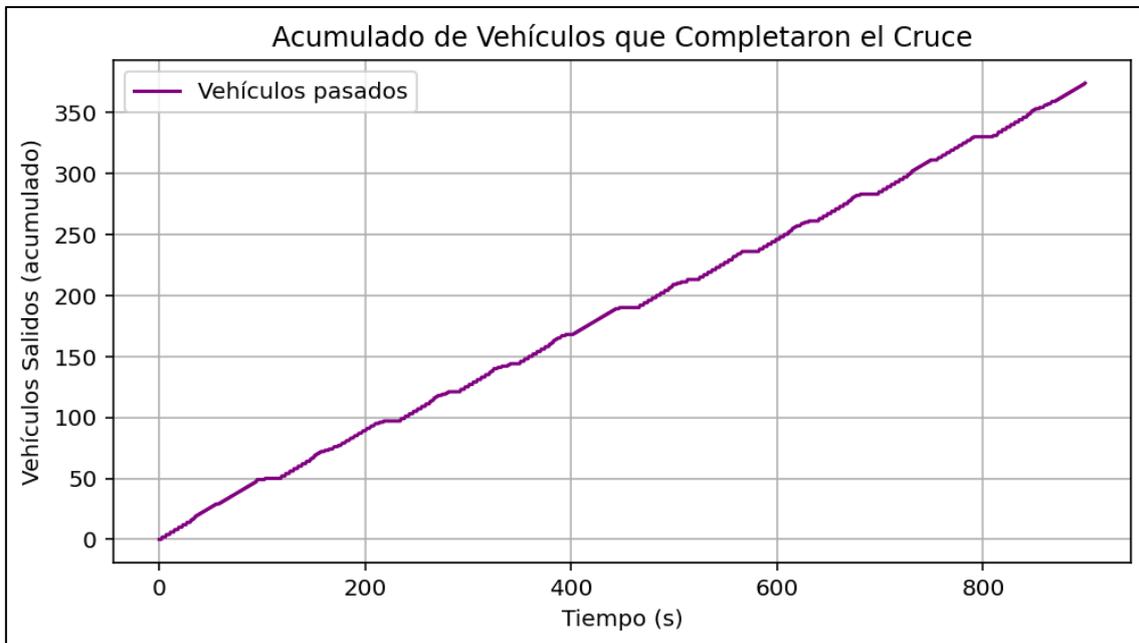


Fuente: El autor.

En la Figura 31 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 374 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 13:15 a 13:30.

Figura 31

Vehículos que completaron el cruce de 13:15 a 13:30 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (16:30 – 16:45)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 6 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 218

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 70

Total, de vehículos que completaron el cruce: 288

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 62.14 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 22.86 s

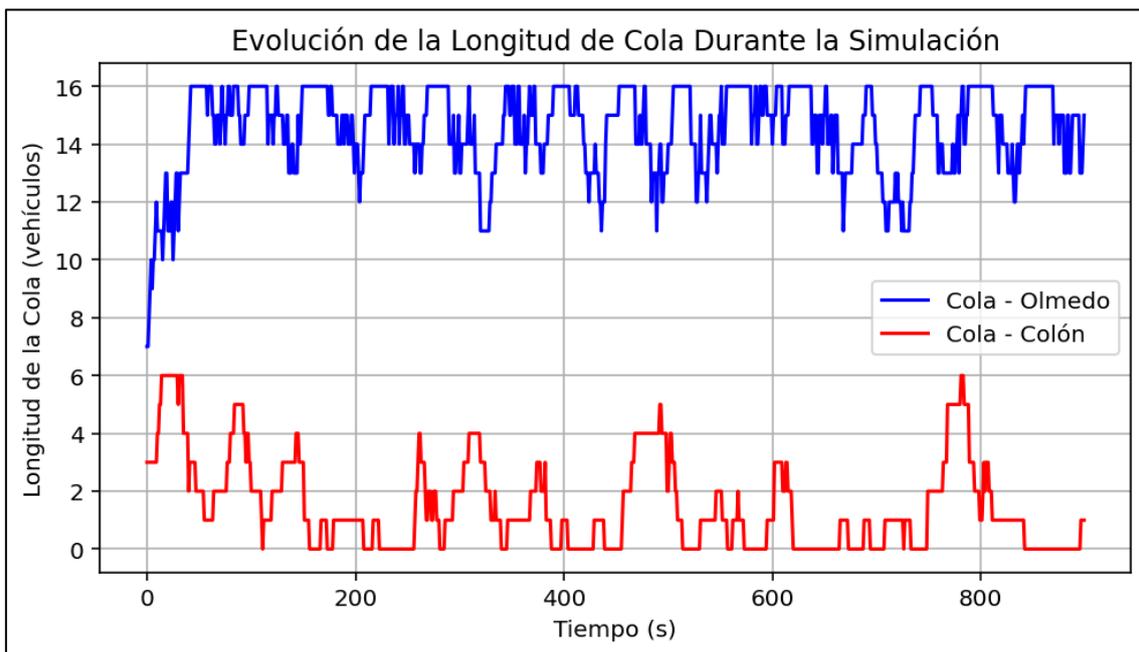
Velocidad media promedio (global): 0.19 celdas/seg (13.49 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 32 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 16:30 a 16:45.

Figura 32

Longitud de la Cola de automóviles de 16:30 a 16:45 en las calles Olmedo y Colón

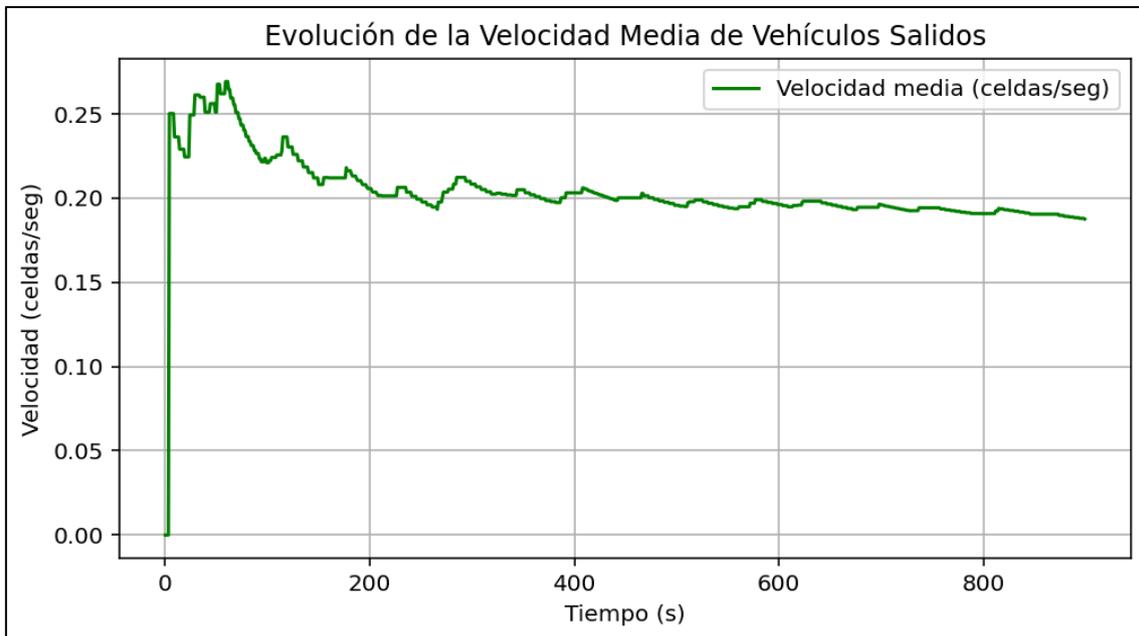


Fuente: El autor.

La Figura 33 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,18–0,19 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 16:30 a 16:45.

Figura 33

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 16:30 a 16:45

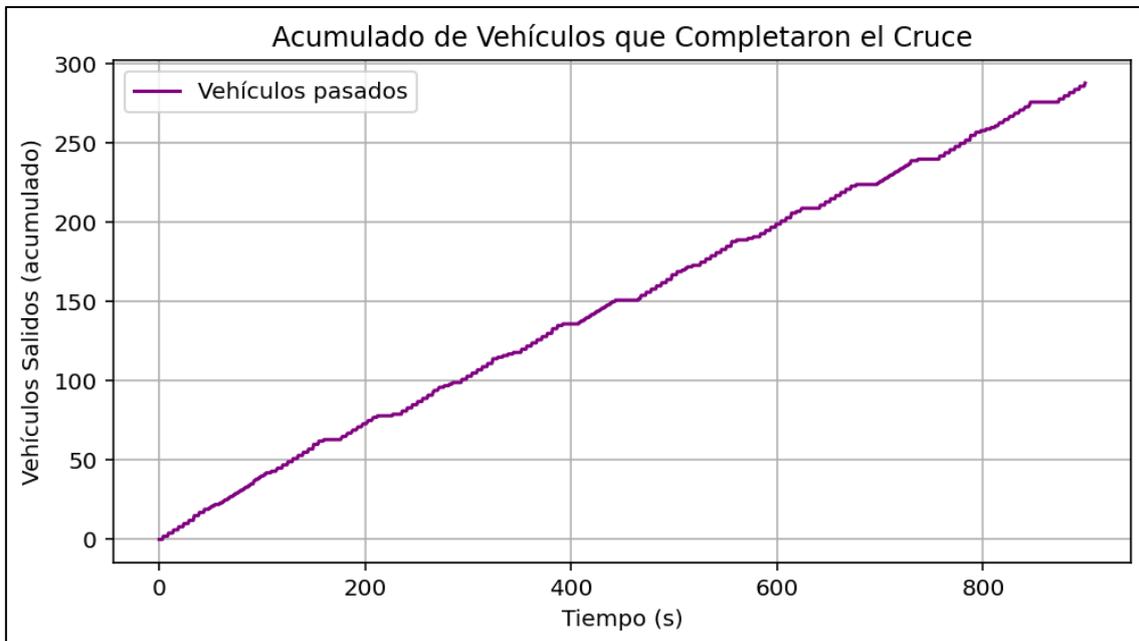


Fuente: El autor.

En la Figura 34 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 288 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 16:30 a 16:45.

Figura 34

Vehículos que completaron el cruce de 16:30 a 16:45 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (16:45 – 17:00)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 8 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 219

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 74

Total, de vehículos que completaron el cruce: 293

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 59.42 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 22.84 s

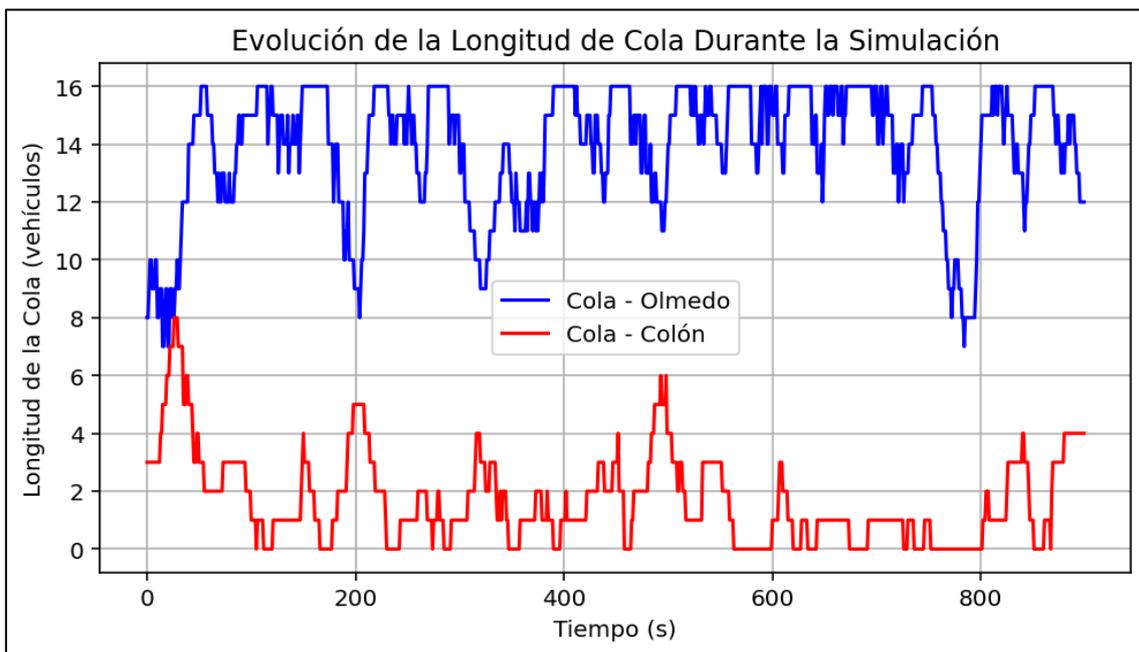
Velocidad media promedio (global): 0.20 celdas/seg (14.29 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 35 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 16:45 a 17:00.

Figura 35

Longitud de la Cola de automóviles de 16:45 a 17:00 en las calles Olmedo y Colón

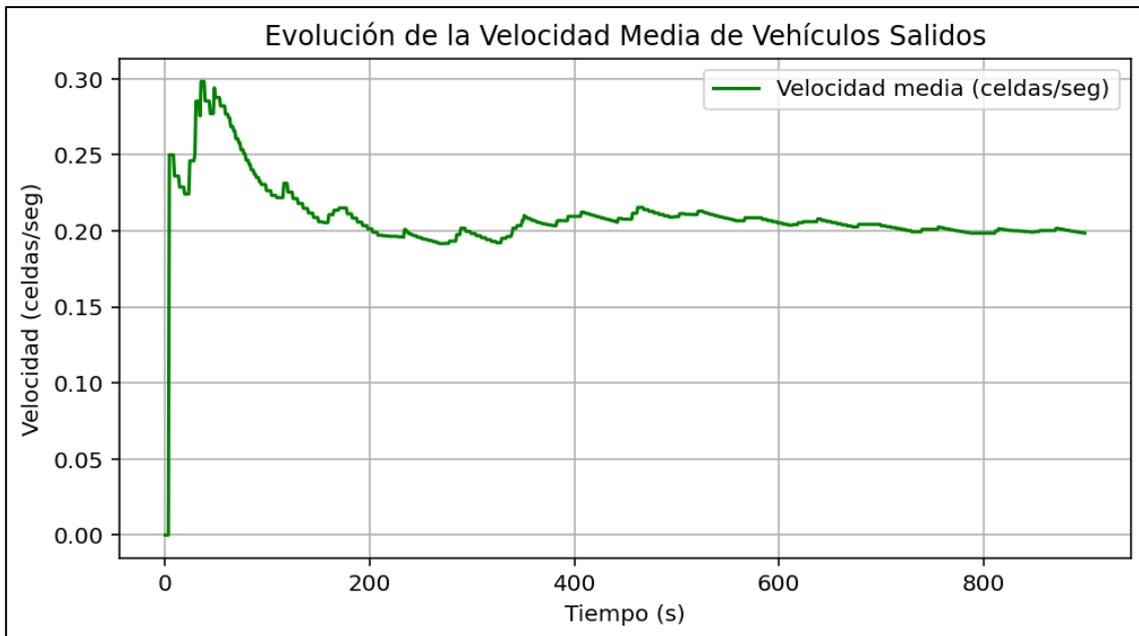


Fuente: El autor.

La Figura 36 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,18–0,20 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 16:45 a 17:00.

Figura 36

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 16:45 a 17:00

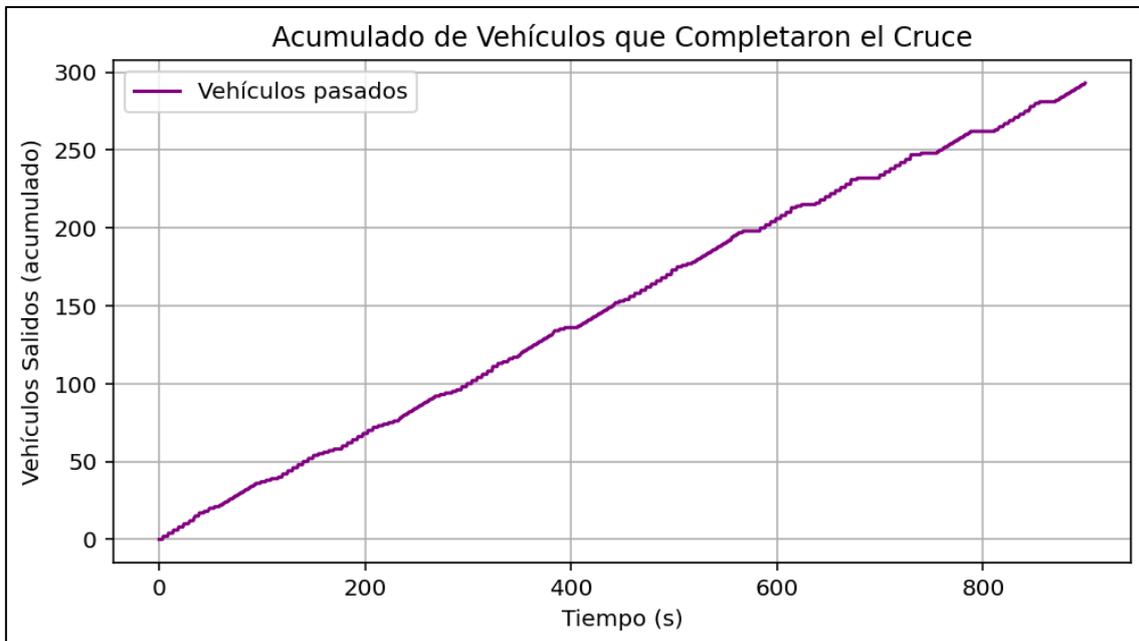


Fuente: El autor.

En la Figura 37 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 293 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 16:45 a 17:00.

Figura 37

Vehículos que completaron el cruce de 16:45 a 17:00 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (17:00 – 17:15)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 6 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 222

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 73

Total, de vehículos que completaron el cruce: 295

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 60.26 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 24.60 s

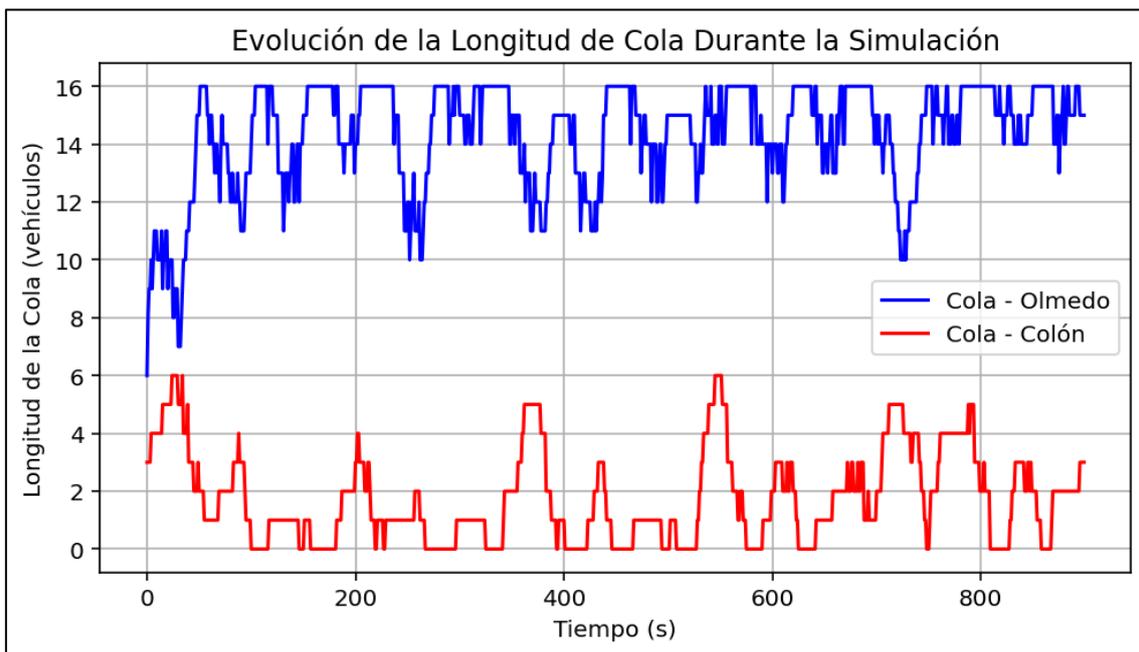
Velocidad media promedio (global): 0.19 celdas/seg (13.44 km/h)

Tasa de cruce: 0.94

La Figura 38 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 17:00 a 17:15.

Figura 38

Longitud de la Cola de automóviles de 17:00 a 17:15 en las calles Olmedo y Colón

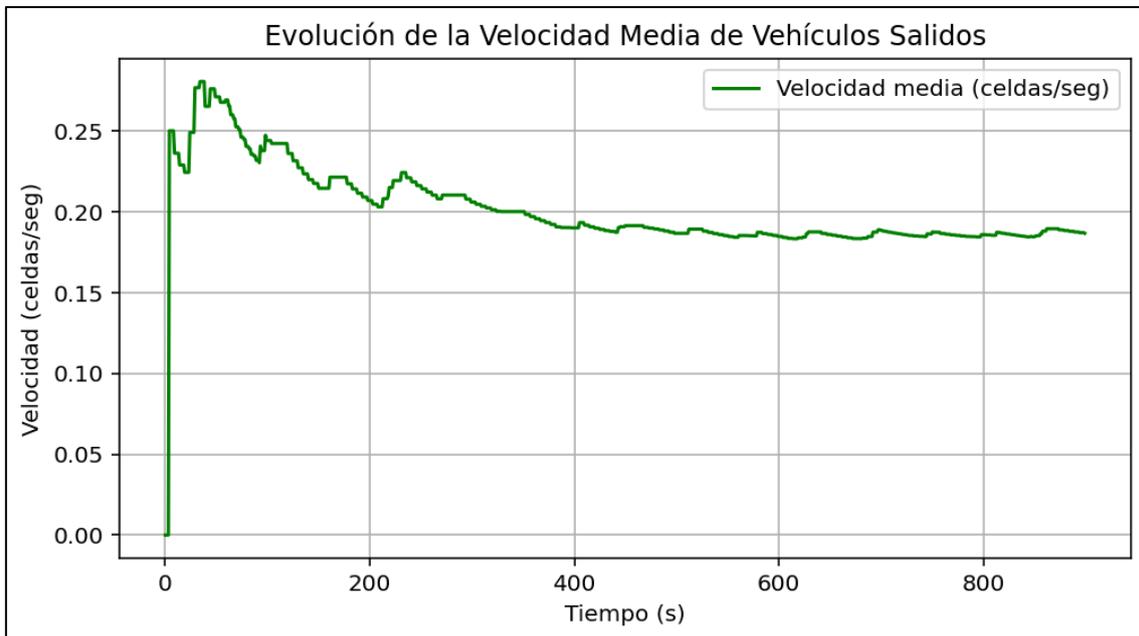


Fuente: El autor.

La Figura 39 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,17–0,19 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 17:00 a 17:15.

Figura 39

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 17:00 a 17:15

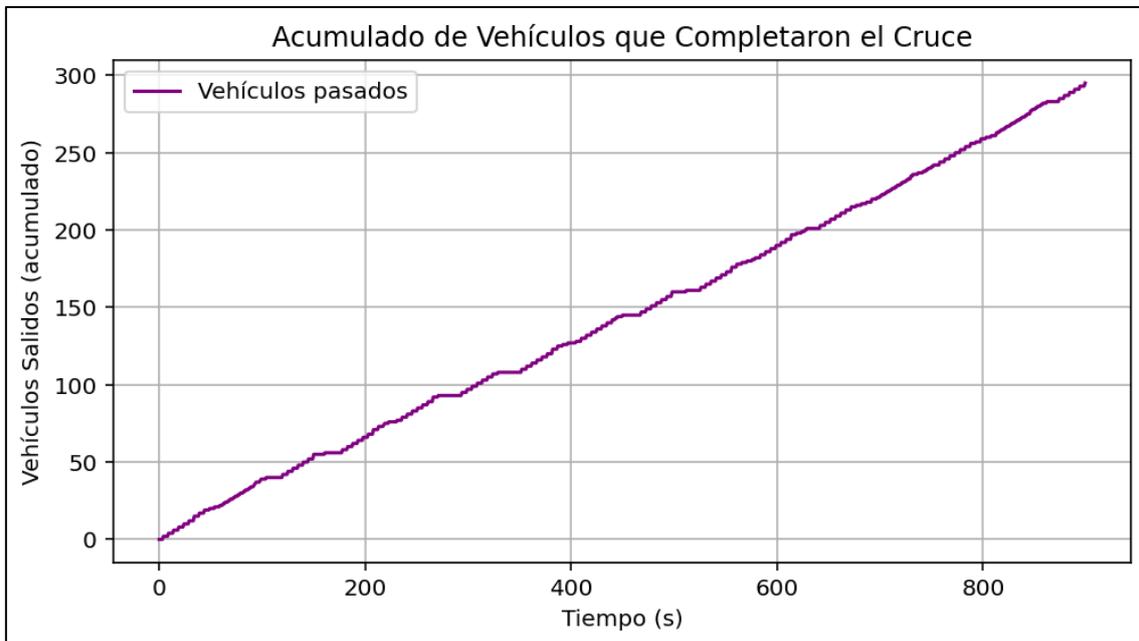


Fuente: El autor.

En la Figura 40 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 295 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 17:00 a 17:15.

Figura 40

Vehículos que completaron el cruce de 17:00 a 17:15 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (17:15 – 17:30)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 7 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 218

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 89

Total, de vehículos que completaron el cruce: 307

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 60.52 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 25.18 s

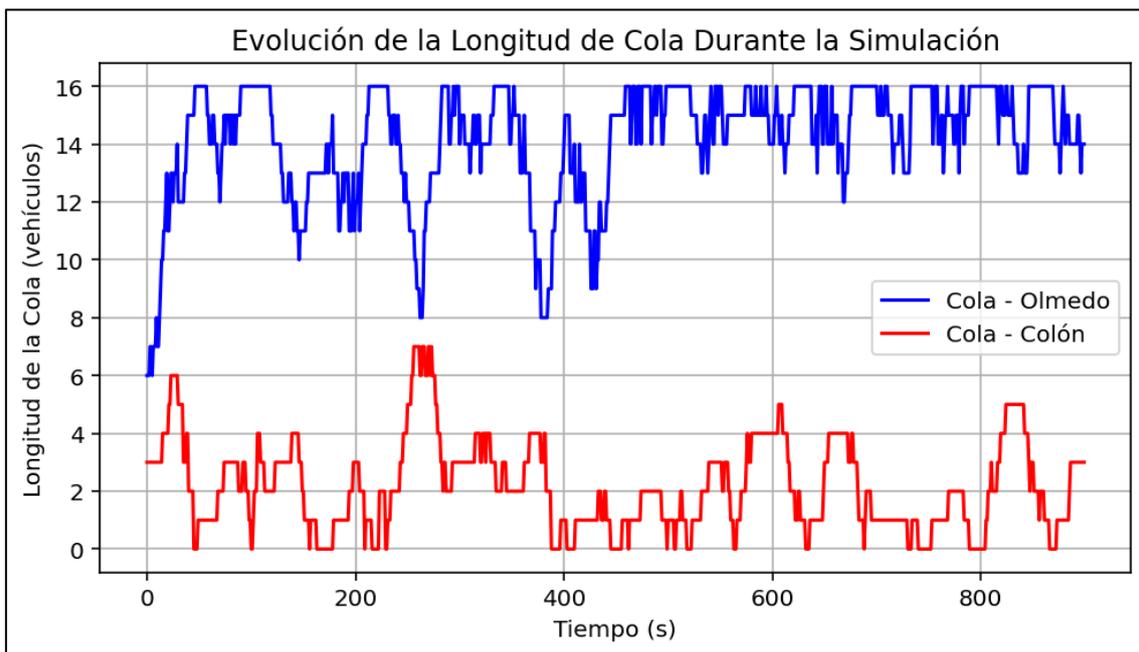
Velocidad media promedio (global): 0.19 celdas/seg (13.95 km/h)

Tasa de cruce: 0.94

La Figura 41 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 17:15 a 17:30.

Figura 41

Longitud de la Cola de automóviles de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón

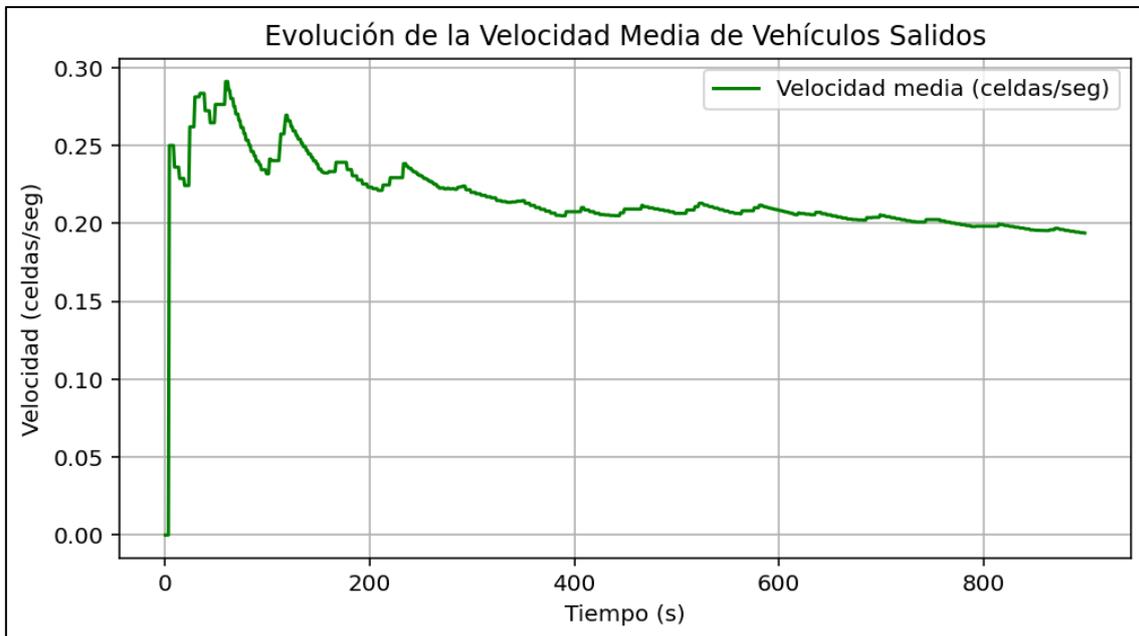


Fuente: El autor.

La Figura 42 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,18–0,19 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 17:15 a 17:30.

Figura 42

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 17:15 a 17:30

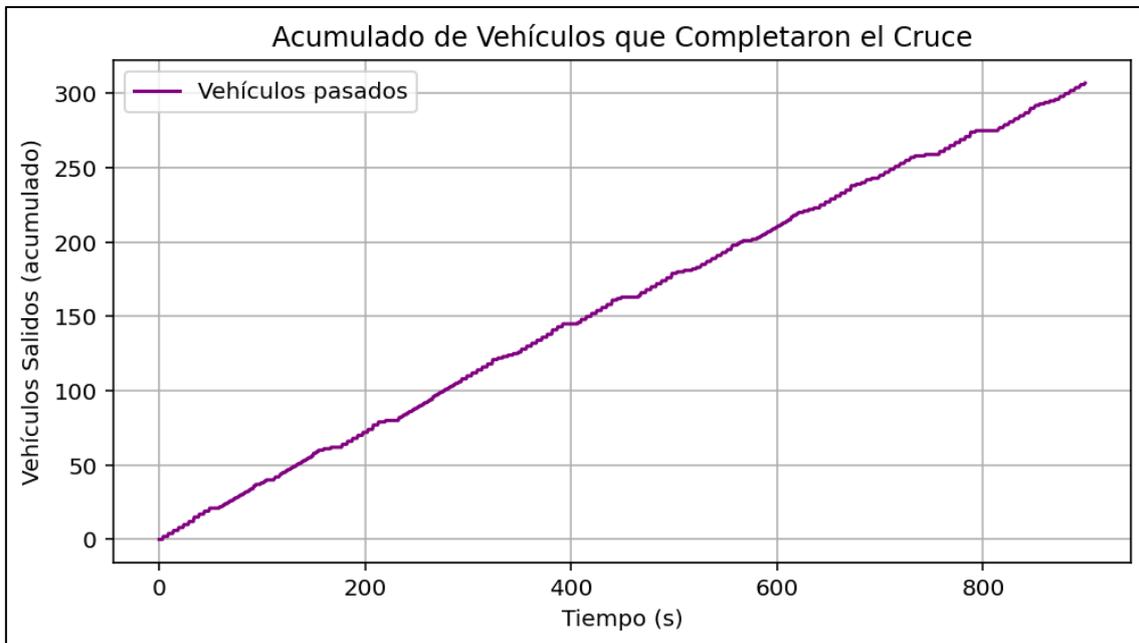


Fuente: El autor.

En la Figura 43 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 307 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 17:15 a 17:30.

Figura 43

Vehículos que completaron el cruce de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón



Fuente: El autor.

4.1.4 Resultados de la Simulación Vehicular en la calle Olmedo y Cristóbal Colón próximos cinco años

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo Y Colón (7:00 – 7:15)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 7 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 281

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 89

Total, de vehículos que completaron el cruce: 370

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 50.53 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 20.66 s

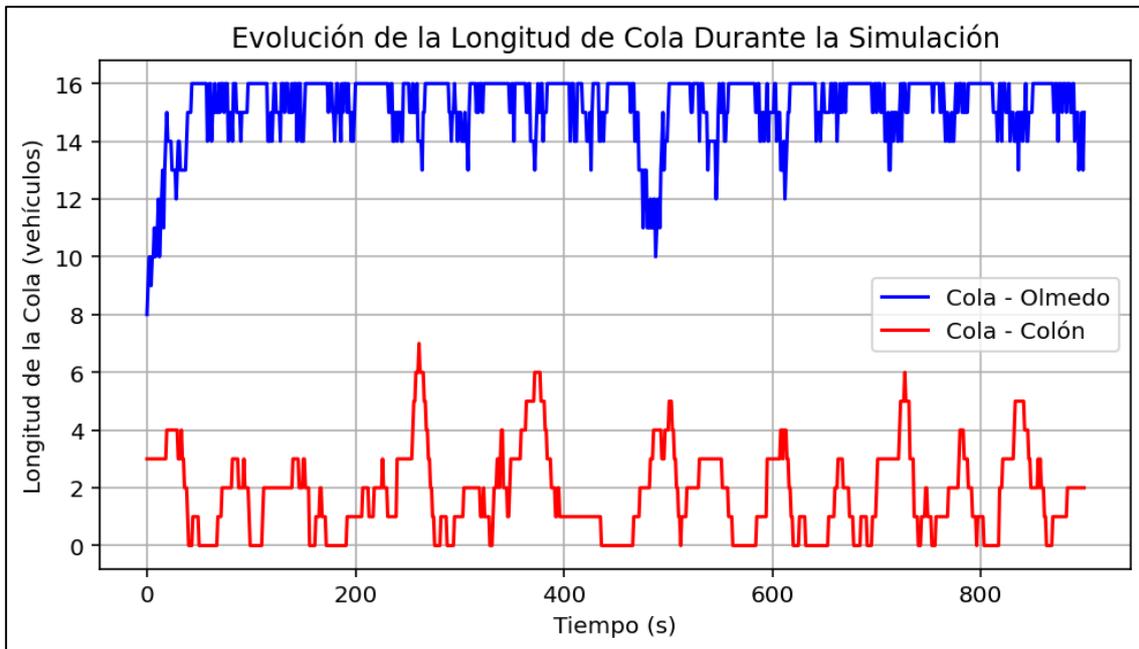
Velocidad media promedio (global): 0.22 celdas/seg (16.07 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 44 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 7:00 a 7:15 dentro de cinco años.

Figura 44

Longitud de la Cola de automóviles de 7:00 a 7:15 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años

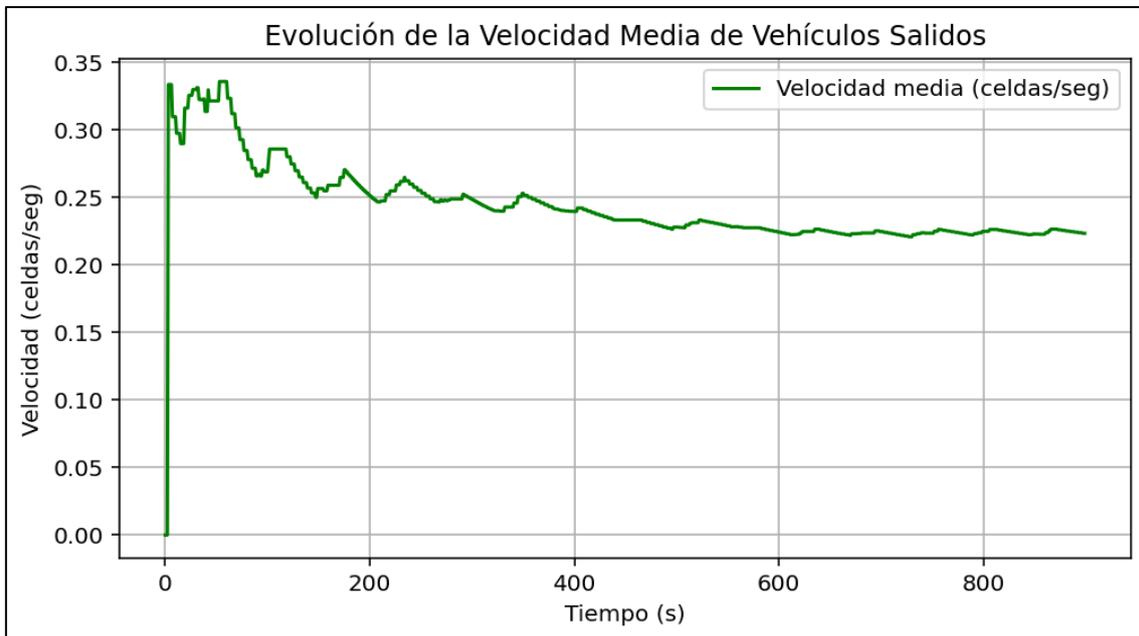


Fuente: El autor.

La Figura 45 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,21–0,22 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 7:00 a 7:15 dentro de cinco años.

Figura 45

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:00 a 7:15, simulación 5 años

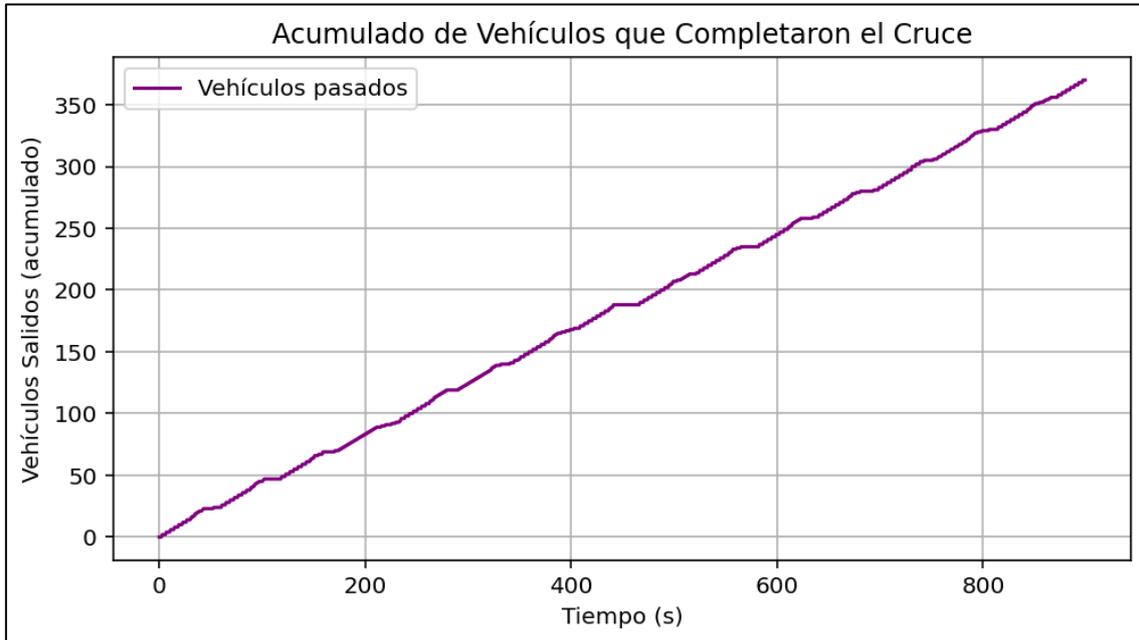


Fuente: El autor.

En la Figura 46 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 370 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 7:00 a 7:15.

Figura 46

Vehículos que completaron el cruce de 7:00 a 7:15 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (7:15 – 7:30)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 8 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 279

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 101

Total, de vehículos que completaron el cruce: 380

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 48.52 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 22.42 s

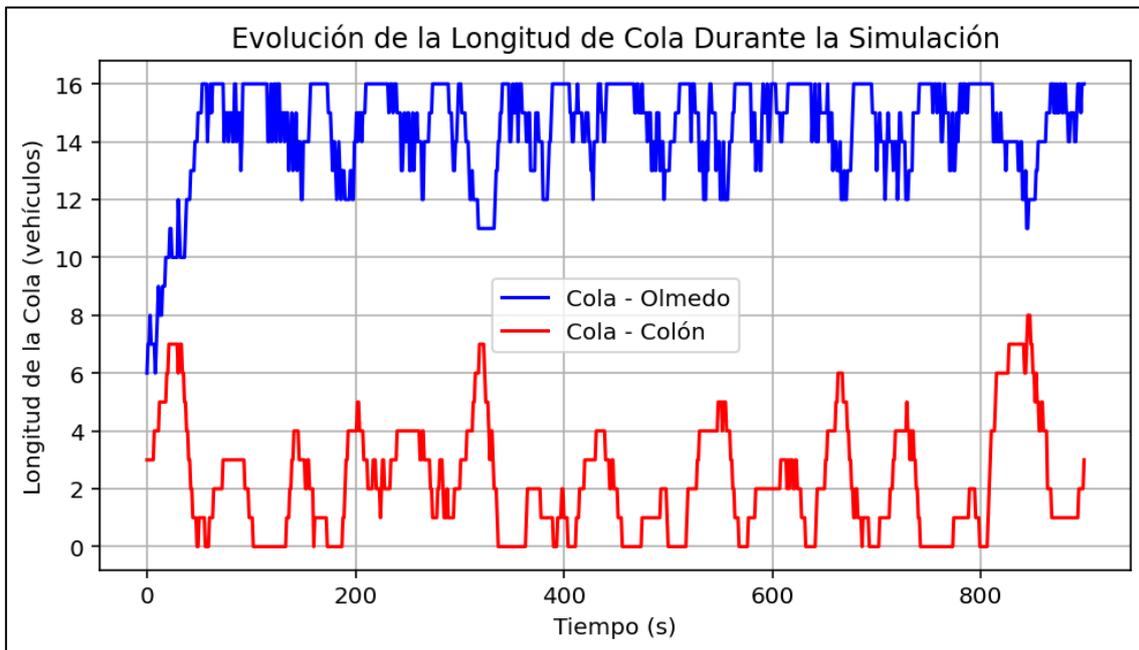
Velocidad media promedio (global): 0.23 celdas/seg (16.23 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 47 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 7:15 a 7:30 dentro de cinco años.

Figura 47

Longitud de la Cola de automóviles de 7:15 a 7:30 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años

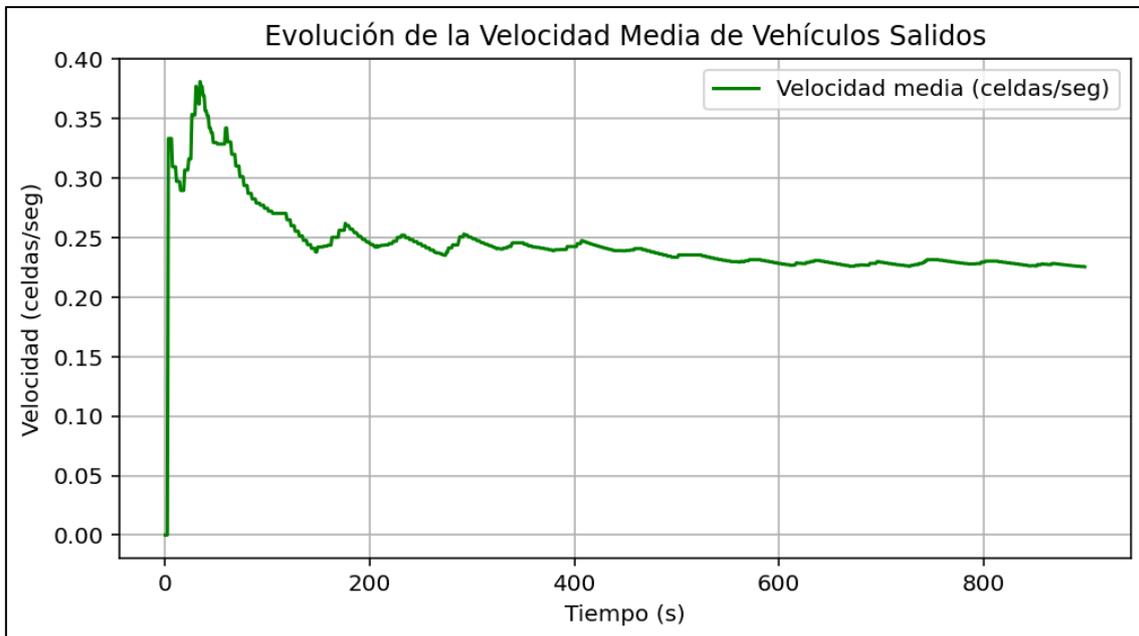


Fuente: El autor.

La Figura 48 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,21–0,23 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 7:15 a 7:30 dentro de cinco años.

Figura 48

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:15 a 7:30, simulación 5 años

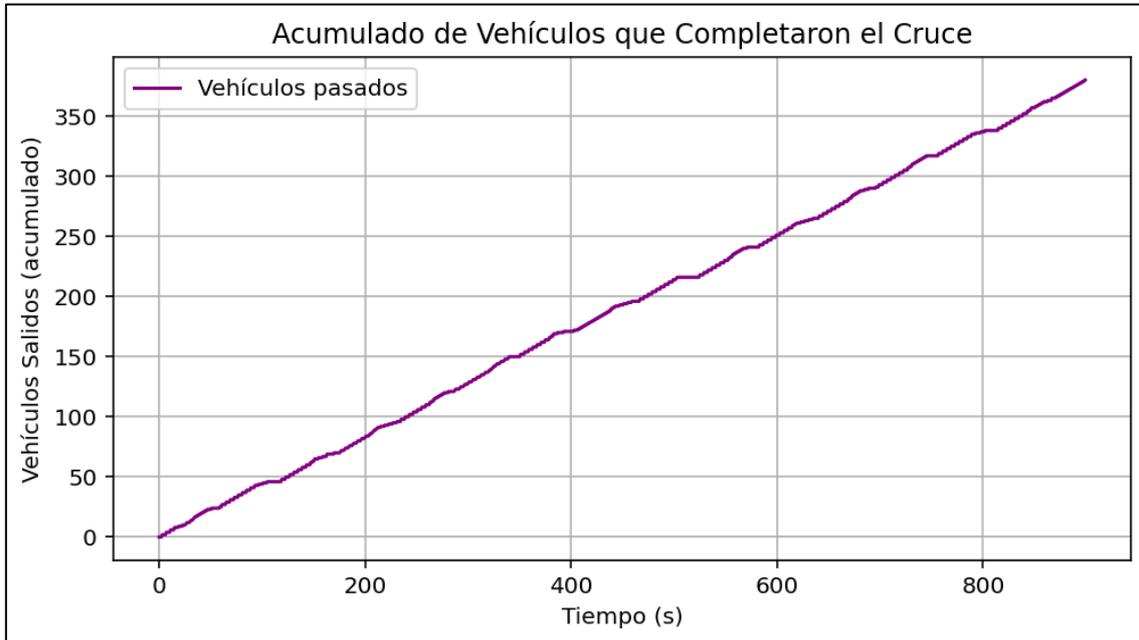


Fuente: El autor.

En la Figura 49 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 380 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 7:15 a 7:30.

Figura 49

Vehículos que completaron el cruce de 7:15 a 7:30 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (7:30 – 7:45)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 9 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 279

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 138

Total, de vehículos que completaron el cruce: 417

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 49.32 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 24.65 s

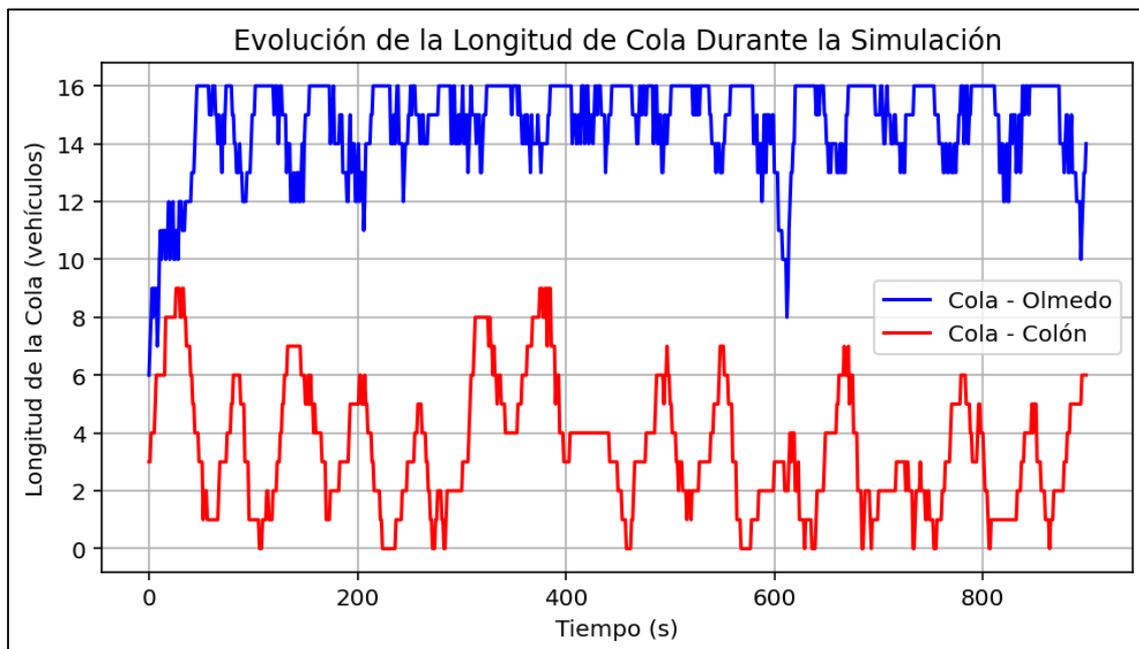
Velocidad media promedio (global): 0.23 celdas/seg (16.23 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 50 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 7:30 a 7:45 dentro de cinco años.

Figura 50

Longitud de la Cola de automóviles de 7:30 a 7:45 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

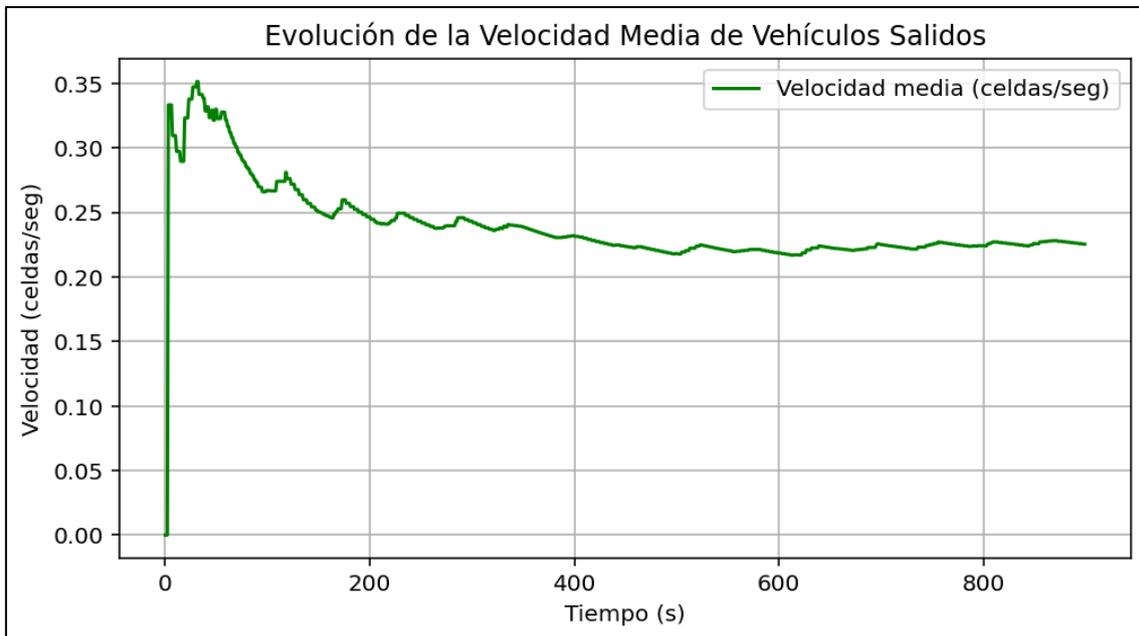


Fuente: El autor.

La Figura 51 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,21–0,23 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 7:30 a 7:45 dentro de cinco años.

Figura 51

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:30 a 7:45, simulación 5 años

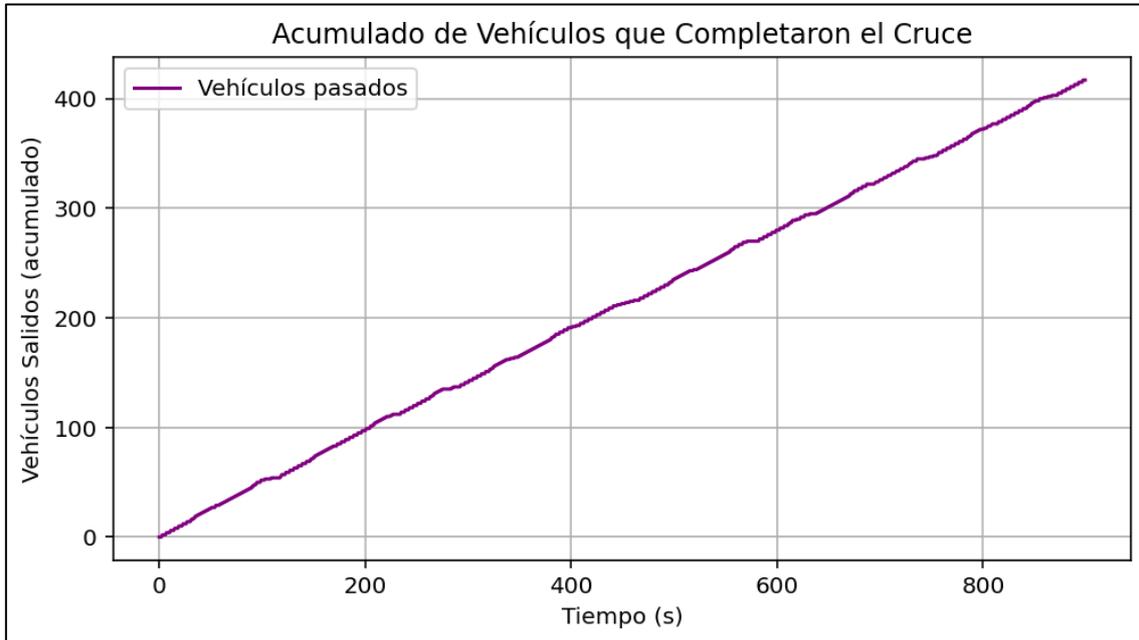


Fuente: El autor.

En la Figura 52 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 417 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 7:30 a 7:45.

Figura 52

Vehículos que completaron el cruce de 7:30 a 7:45 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (7:45 – 8:00)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 12 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 276

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 186

Total, de vehículos que completaron el cruce: 462

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 50.71 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 43.91 s

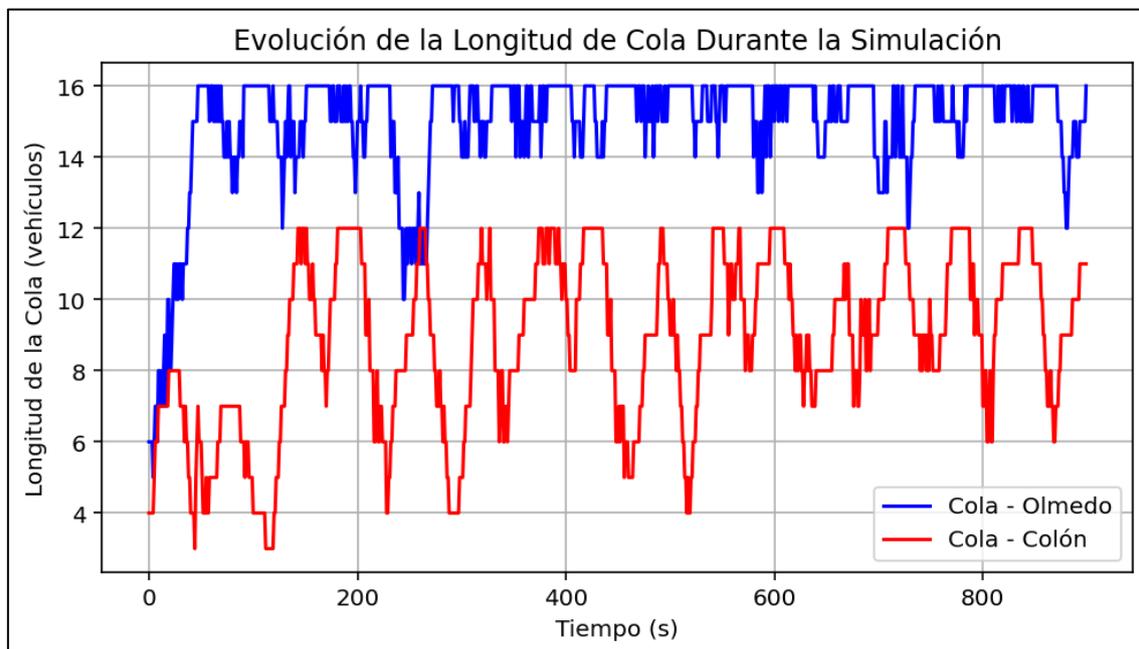
Velocidad media promedio (global): 0.16 celdas/seg (11.86 km/h)

Tasa de cruce: 0.94

La Figura 53 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 7:45 a 8:00 dentro de cinco años.

Figura 53

Longitud de la Cola de automóviles de 7:45 a 8:00 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

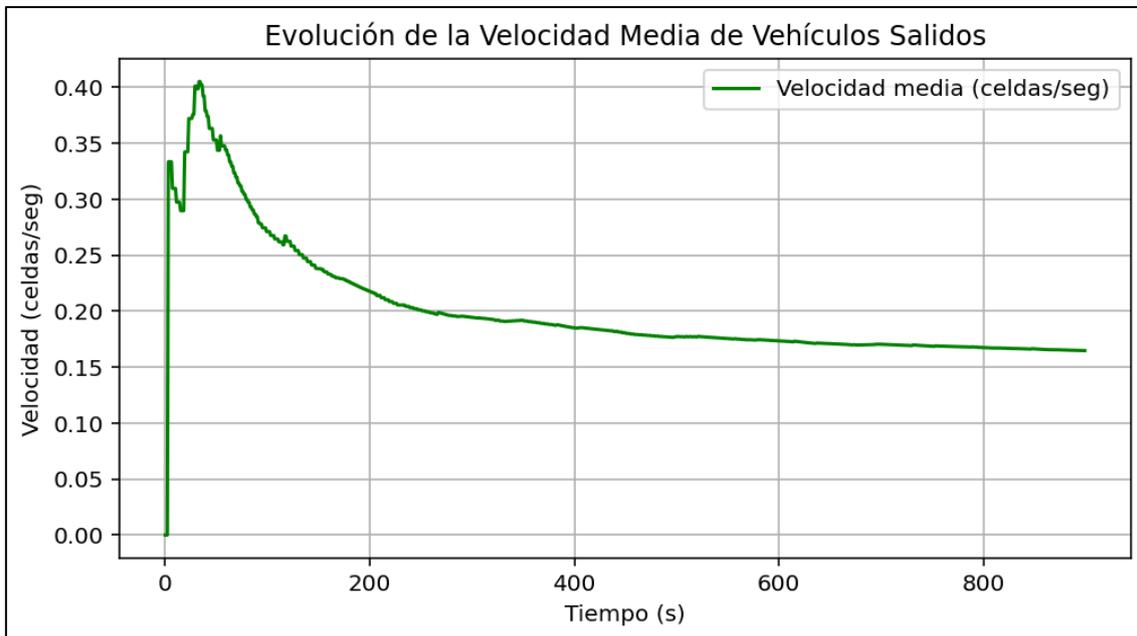


Fuente: El autor.

La Figura 54 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,15–0,16 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 7:45 a 8:00 dentro de cinco años.

Figura 54

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 7:45 a 8:00, simulación 5 años

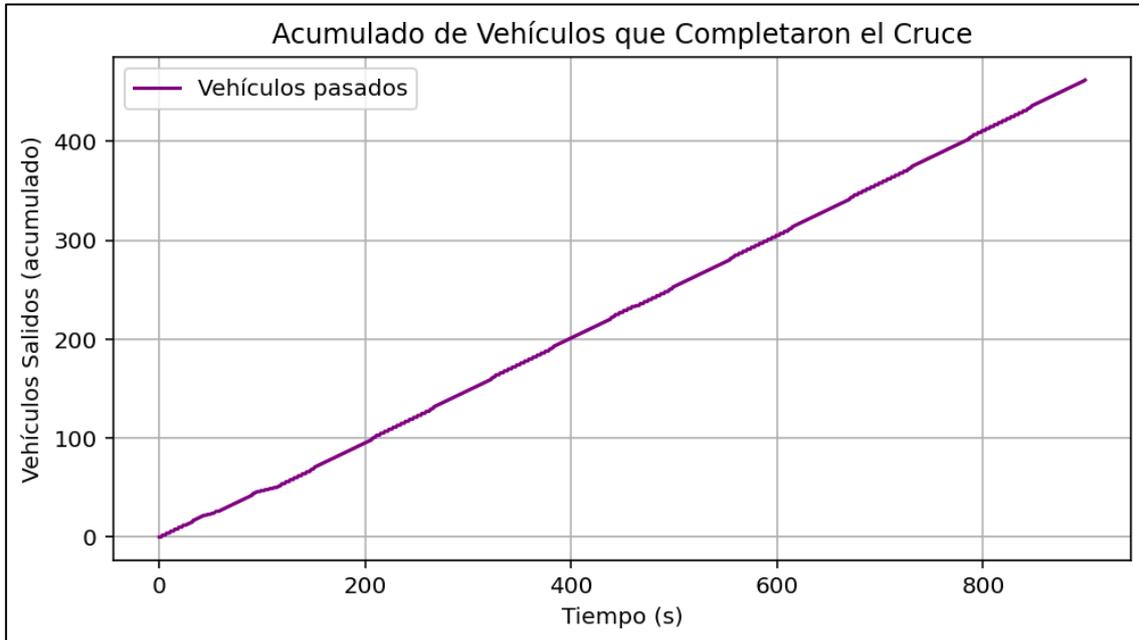


Fuente: El autor.

En la Figura 55 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 462 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 7:45 a 8:00.

Figura 55

Vehículos que completaron el cruce de 7:45 a 8:00 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo Y Colón (12:30 – 12:45)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 10 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 350

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 148

Total, de vehículos que completaron el cruce: 498

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 41.05 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 18.50 s

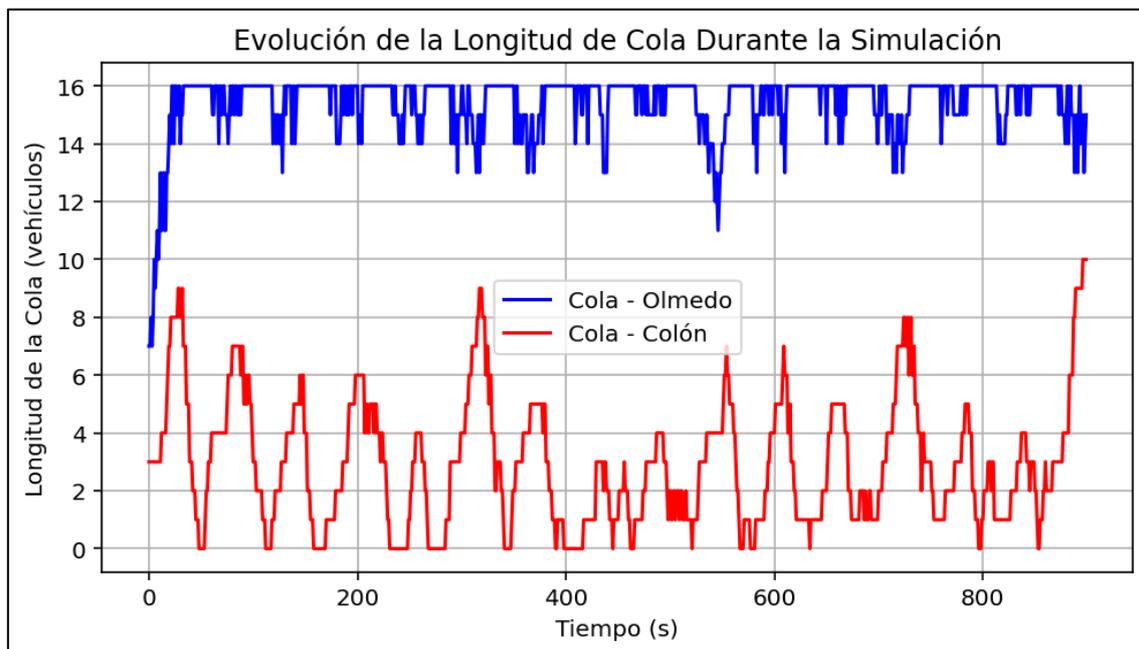
Velocidad media promedio (global): 0.28 celdas/seg (20.41 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 56 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 12:30 a 12:45 dentro de cinco años.

Figura 56

Longitud de la Cola de automóviles de 12:30 a 12:45 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

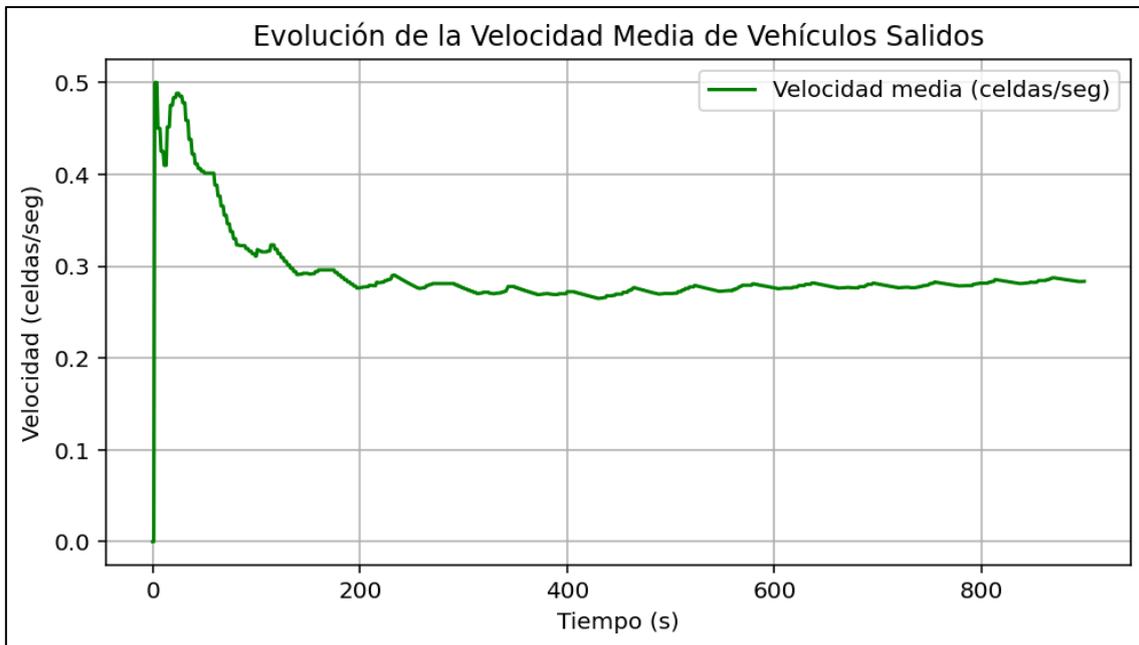


Fuente: El autor.

La Figura 57 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,27–0,28 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 12:30 a 12:45 dentro de cinco años.

Figura 57

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 12:30 a 12:45, simulación 5 años

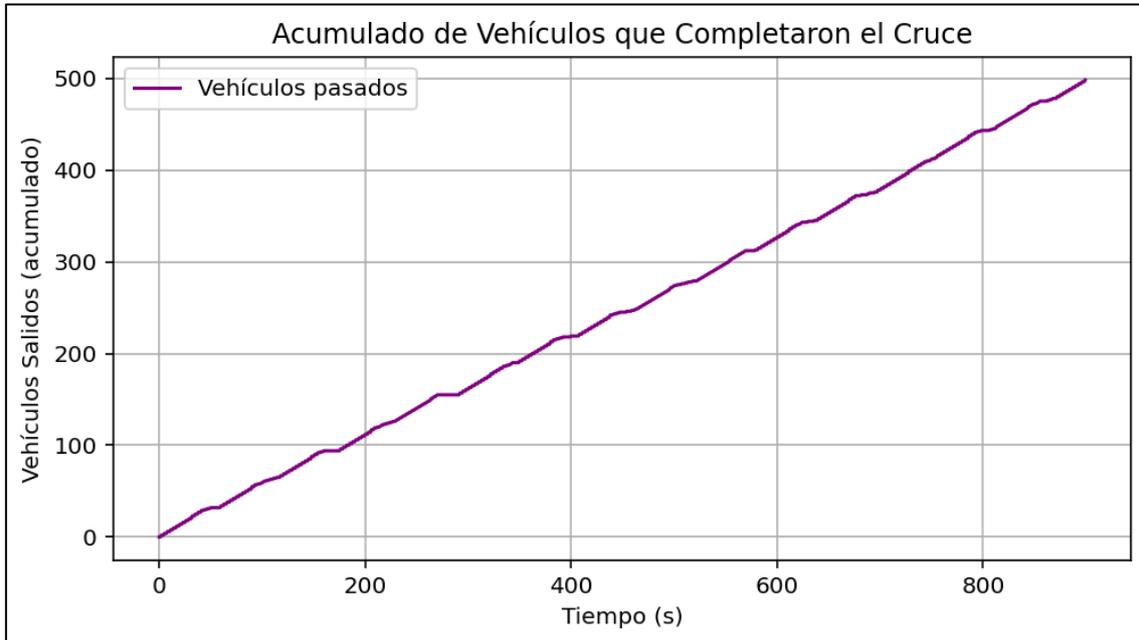


Fuente: El autor.

En la Figura 58 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 498 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 12:30 a 12:45.

Figura 58

Vehículos que completaron el cruce de 12:30 a 12:45 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (12:45 – 13:00)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 11 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 349

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 143

Total, de vehículos que completaron el cruce: 492

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 40.52 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 18.80 s

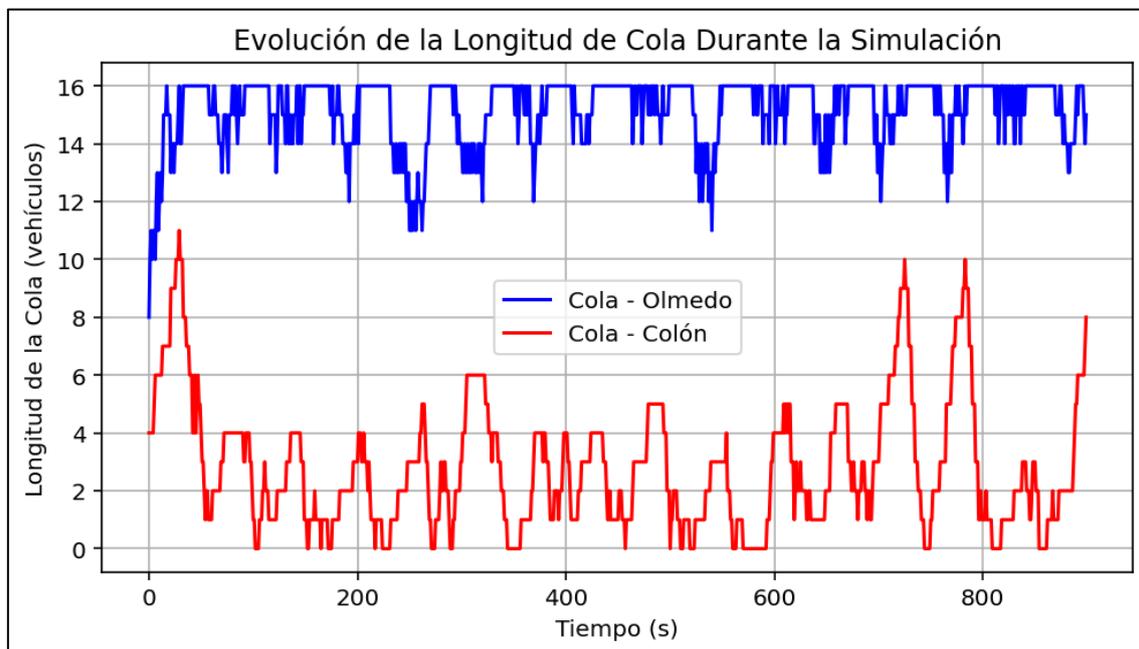
Velocidad media promedio (global): 0.29 celdas/seg (15.55 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 59 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 12:45 a 13:00 dentro de cinco años.

Figura 59

Longitud de la Cola de automóviles de 12:45 a 13:00 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

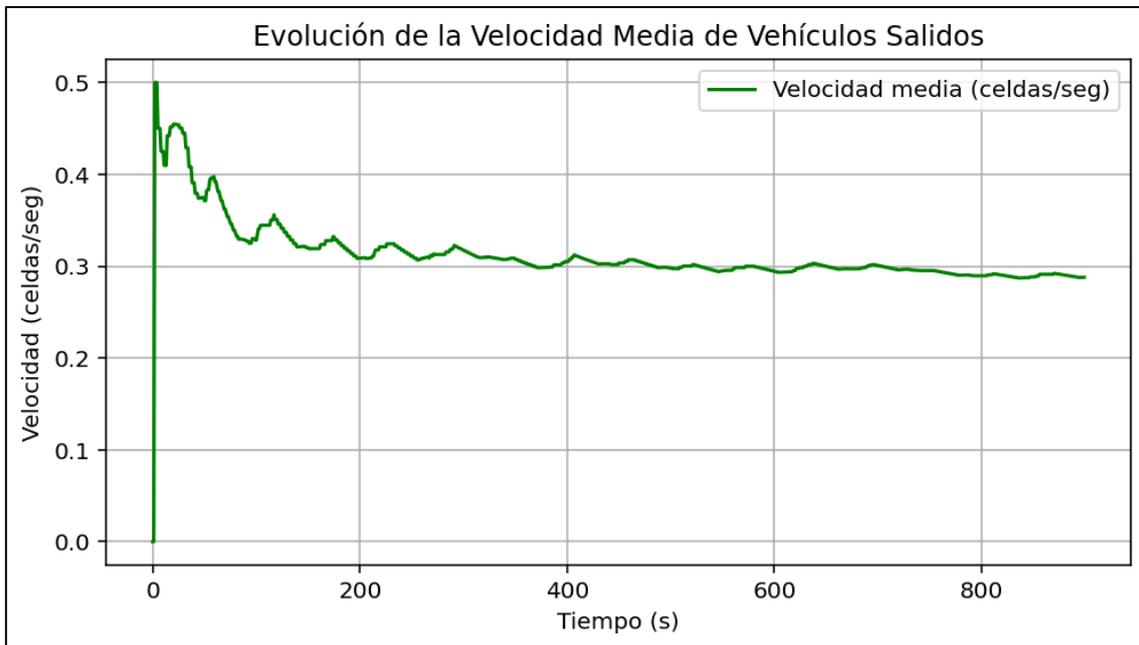


Fuente: El autor.

La Figura 60 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,28–0,29 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 12:45 a 13:00 dentro de cinco años.

Figura 60

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 12:45 a 13:00, simulación 5 años

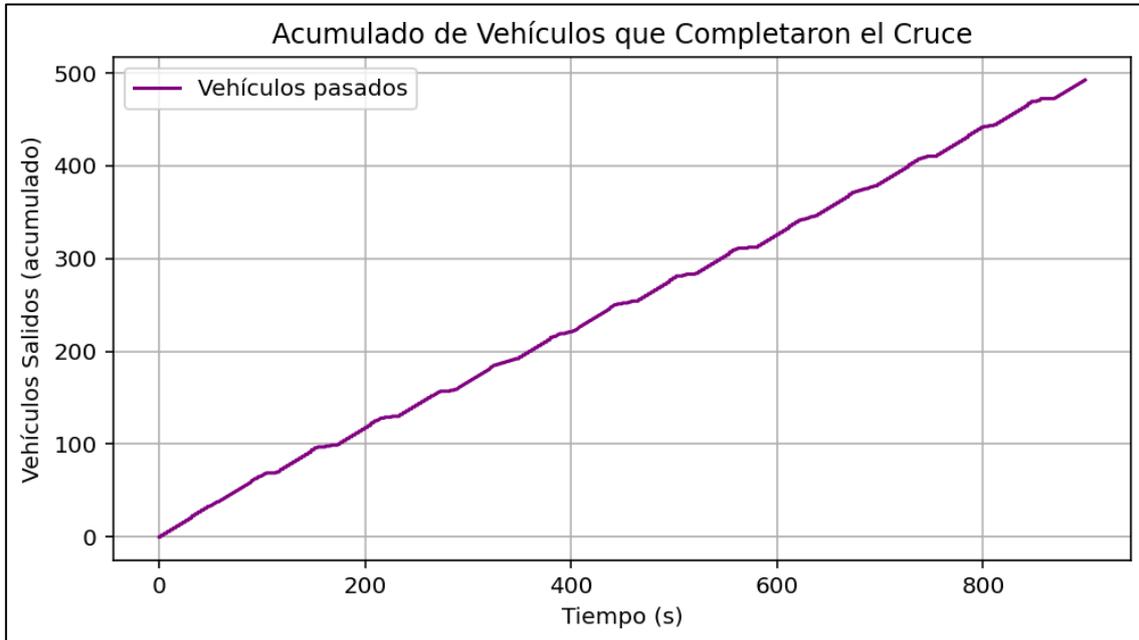


Fuente: El autor.

En la Figura 61 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 370 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 12:45 a 13:00.

Figura 61

Vehículos que completaron el cruce de 12:45 a 13:00 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (13:00 – 13:15)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 11 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 349

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 143

Total, de vehículos que completaron el cruce: 492

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 40.52 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 18.80 s

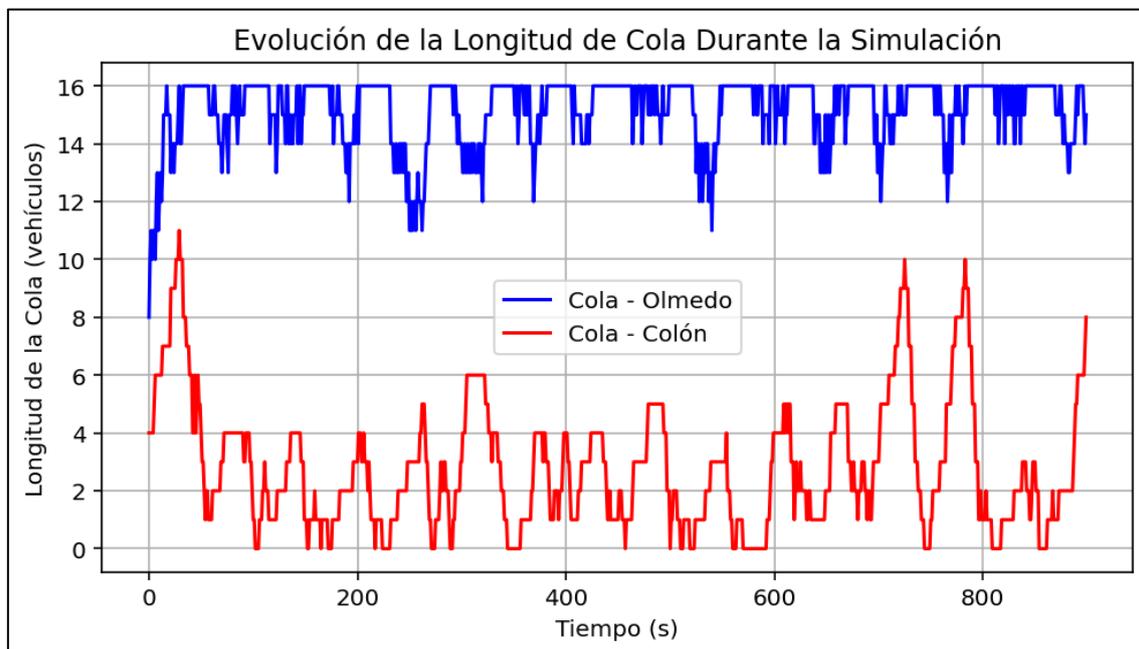
Velocidad media promedio (global): 0.29 celdas/seg (15.55 km/h)

Tasa de cruce: 0.95

La Figura 62 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 13:00 a 13:15 dentro de cinco años.

Figura 62

Longitud de la Cola de automóviles de 13:00 a 13:15 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

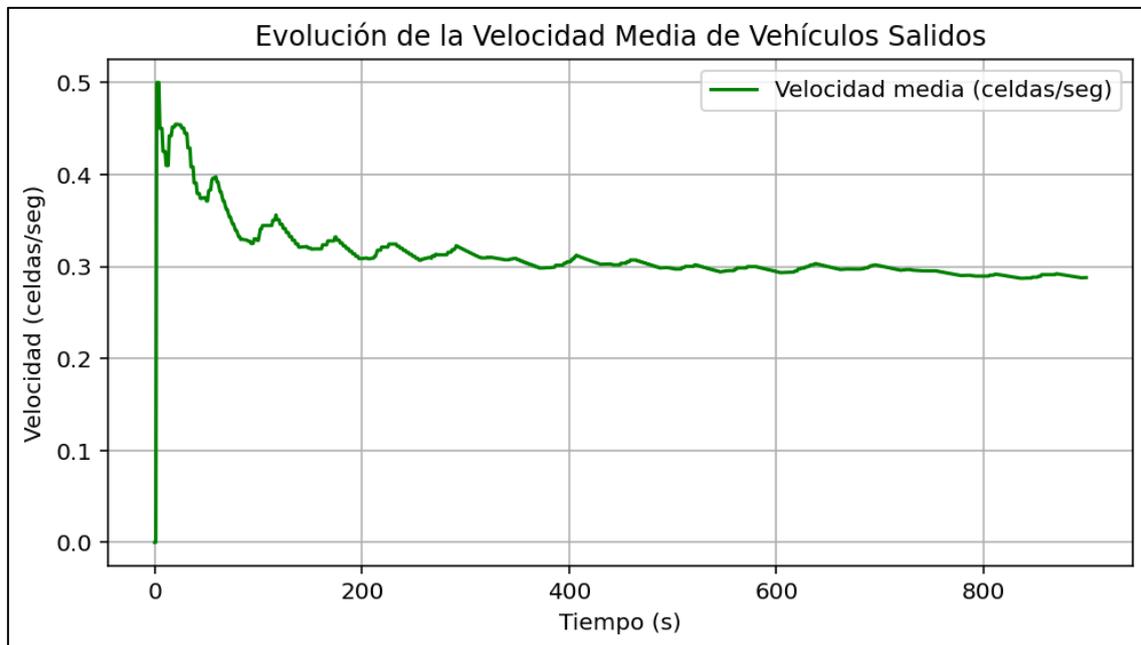


Fuente: El autor.

La Figura 63 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,28–0,29 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 13:00 a 13:15 dentro de cinco años.

Figura 63

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 13:00 a 13:15, simulación 5 años

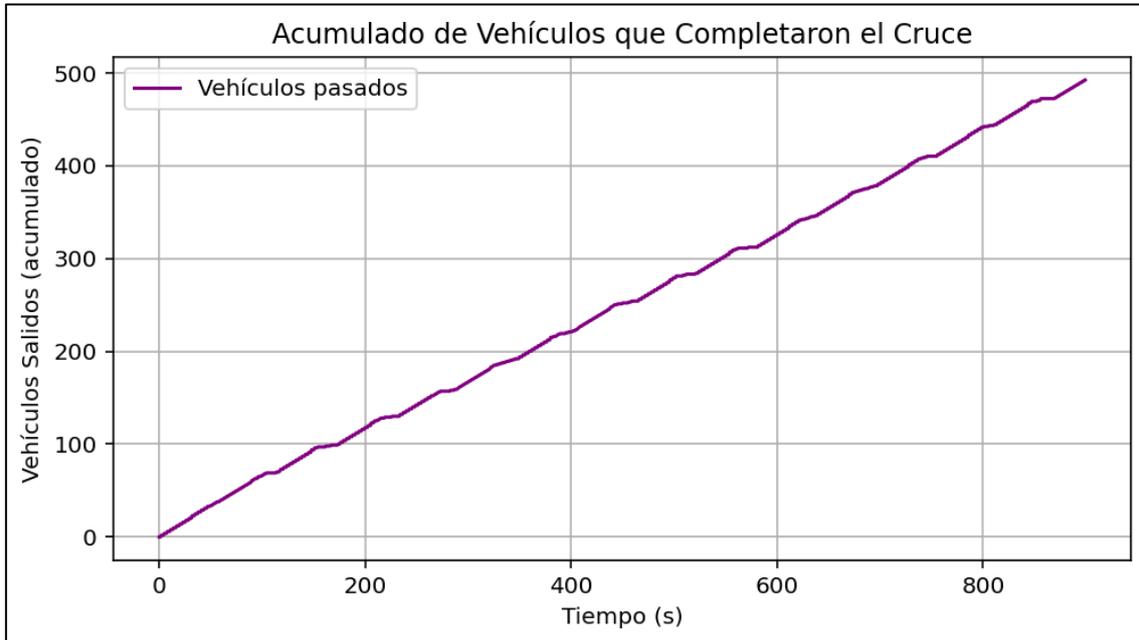


Fuente: El autor.

En la Figura 64 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 492 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 13:00 a 13:15.

Figura 64

Vehículos que completaron el cruce de 13:00 a 13:15 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (13:15 – 13:30)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 10 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 350

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 167

Total, de vehículos que completaron el cruce: 517

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 40.43 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 20.63 s

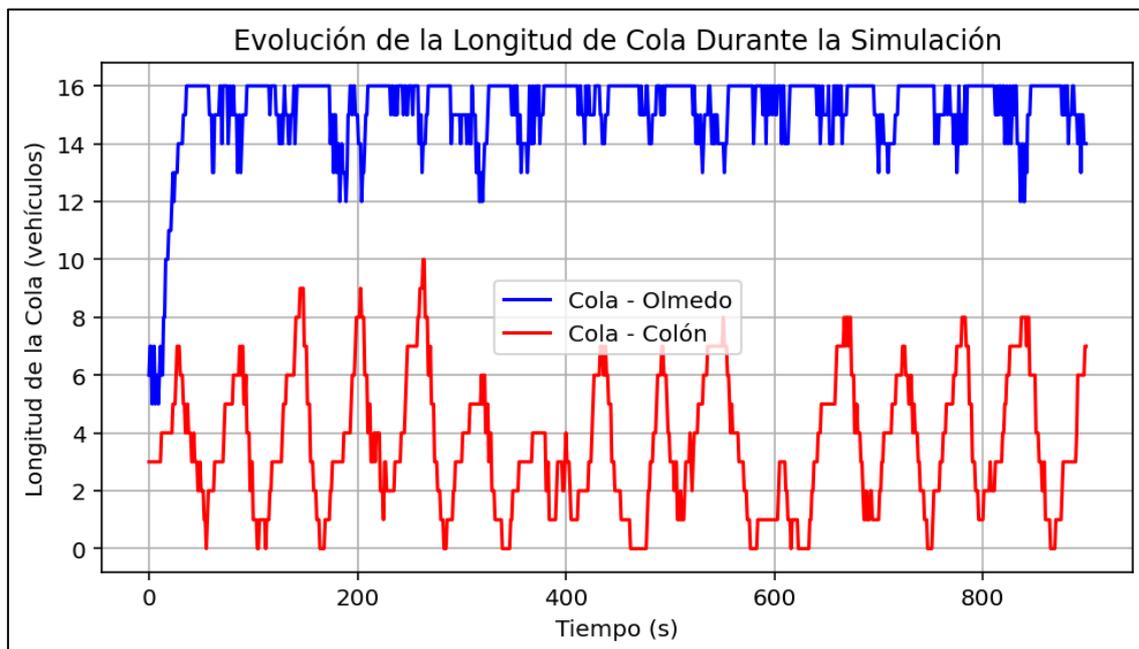
Velocidad media promedio (global): 0.29 celdas/seg (15.01 km/h)

Tasa de cruce: 0.96

La Figura 65 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 13:15 a 13:30 dentro de cinco años.

Figura 65

Longitud de la Cola de automóviles de 13:15 a 13:30 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

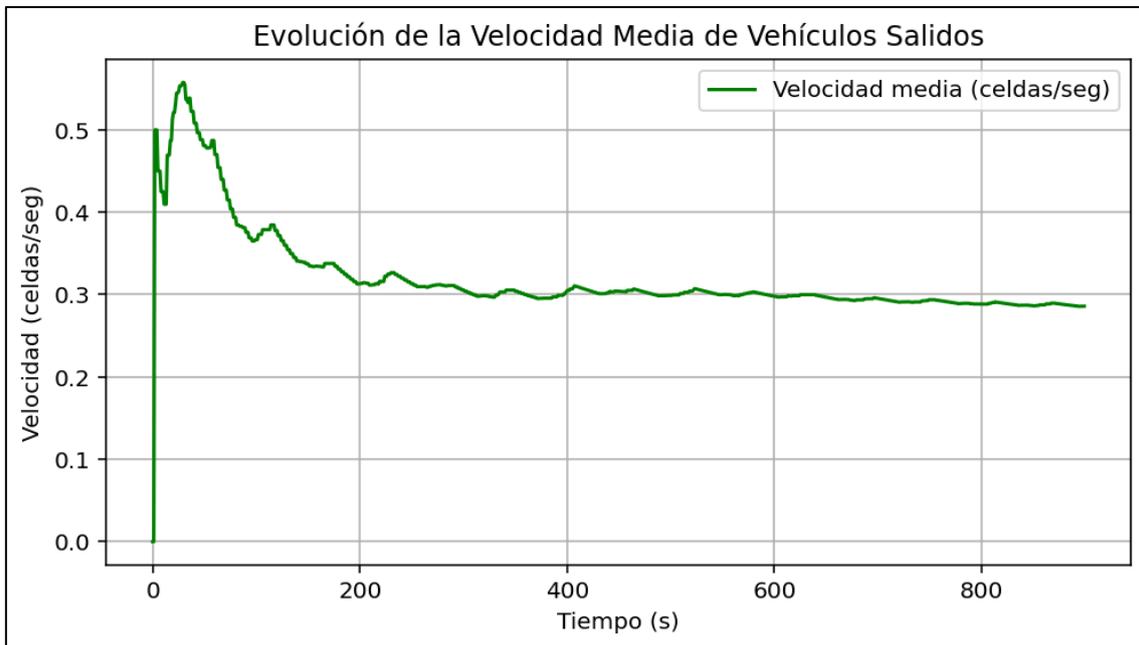


Fuente: El autor.

La Figura 66 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,28–0,29 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 13:15 a 13:30 dentro de cinco años.

Figura 66

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 13:15 a 13:30, simulación 5 años

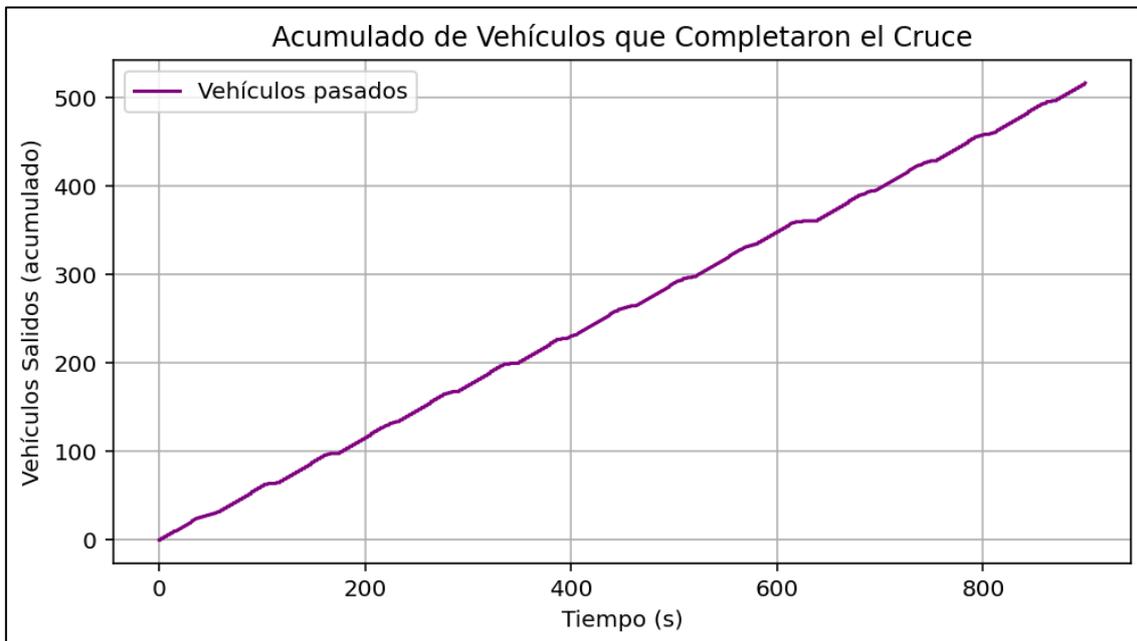


Fuente: El autor.

En la Figura 67 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 517 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 13:15 a 13:30.

Figura 67

Vehículos que completaron el cruce de 13:15 a 13:30 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo Y Colón (16:30 – 16:45)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 12 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 349

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 185

Total, de vehículos que completaron el cruce: 534

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 39.54 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 21.66 s

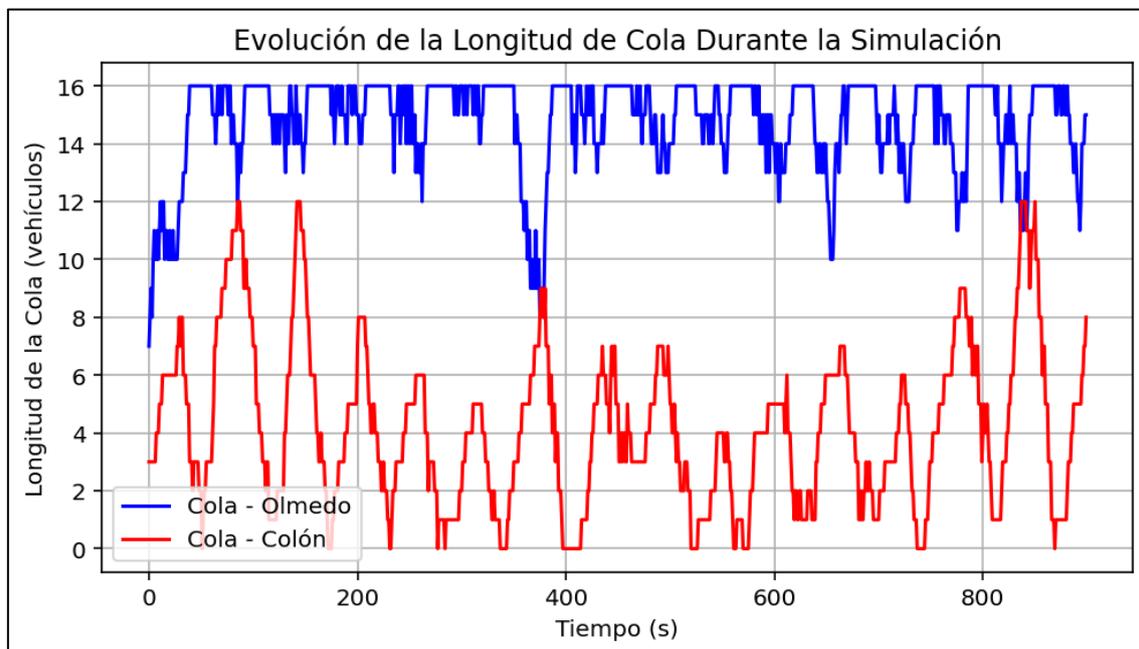
Velocidad media promedio (global): 0.28 celdas/seg (14.53 km/h)

Tasa de cruce: 0.96

La Figura 68 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 16:30 a 16:45 dentro de cinco años.

Figura 68

Longitud de la Cola de automóviles de 16:30 a 16:45 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

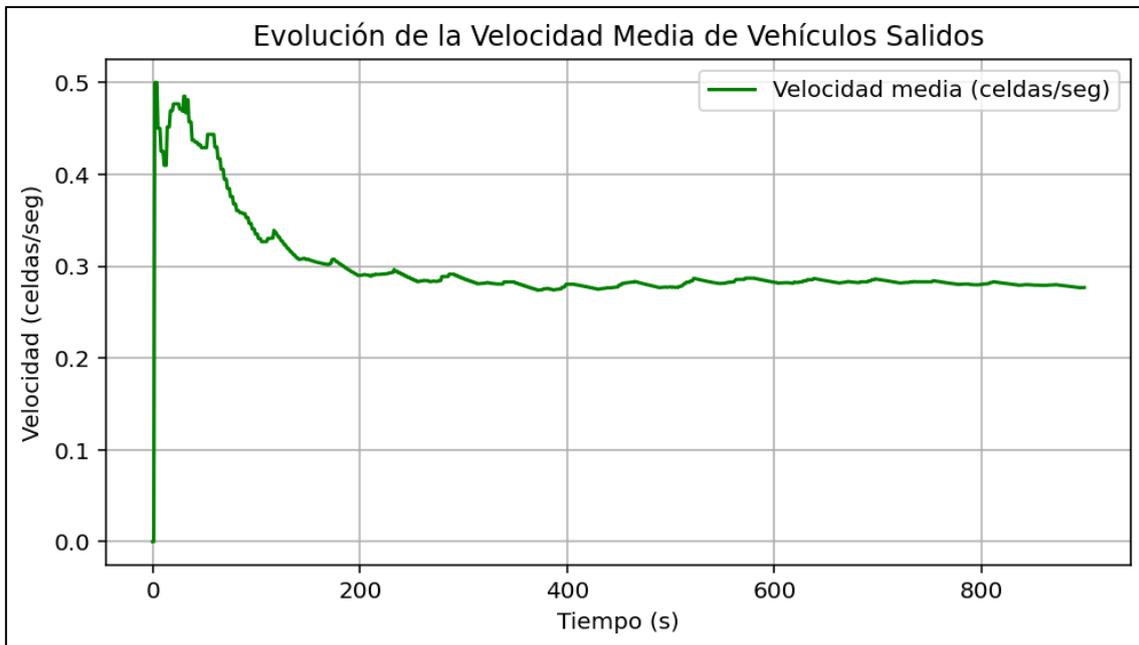


Fuente: El autor.

La Figura 69 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,27–0,28 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 16:30 a 16:45 dentro de cinco años.

Figura 69

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 16:30 a 16:45, simulación 5 años

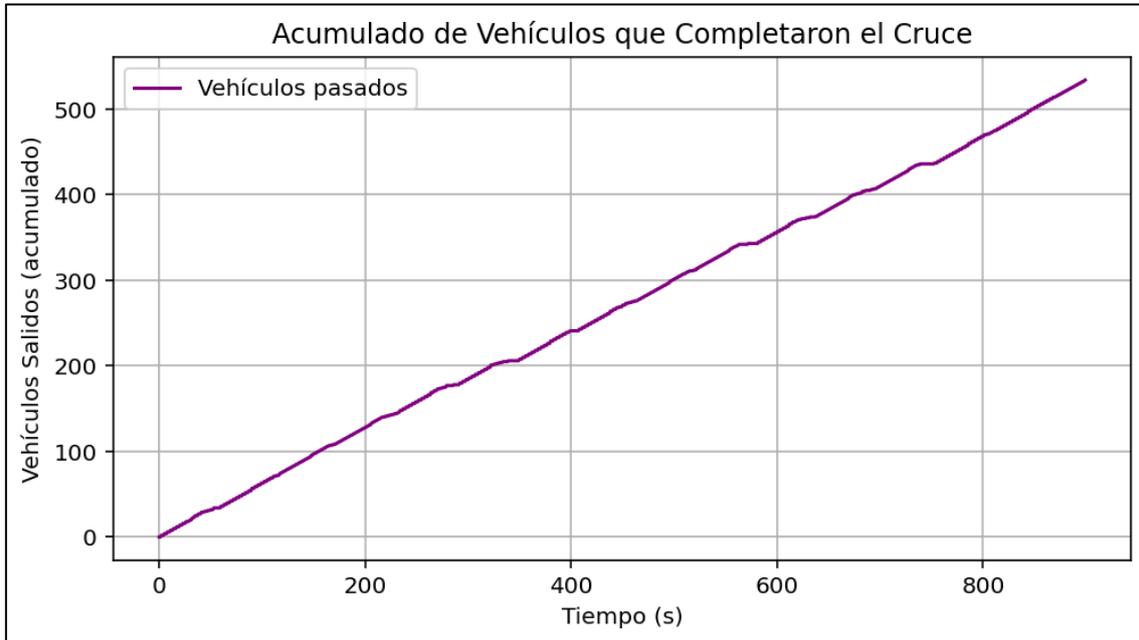


Fuente: El autor.

En la Figura 70 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 534 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 16:30 a 16:45.

Figura 70

Vehículos que completaron el cruce de 16:30 a 16:45 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (16:45 – 17:00)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 11 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 350

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 200

Total, de vehículos que completaron el cruce: 550

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 39.04 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 22.38 s

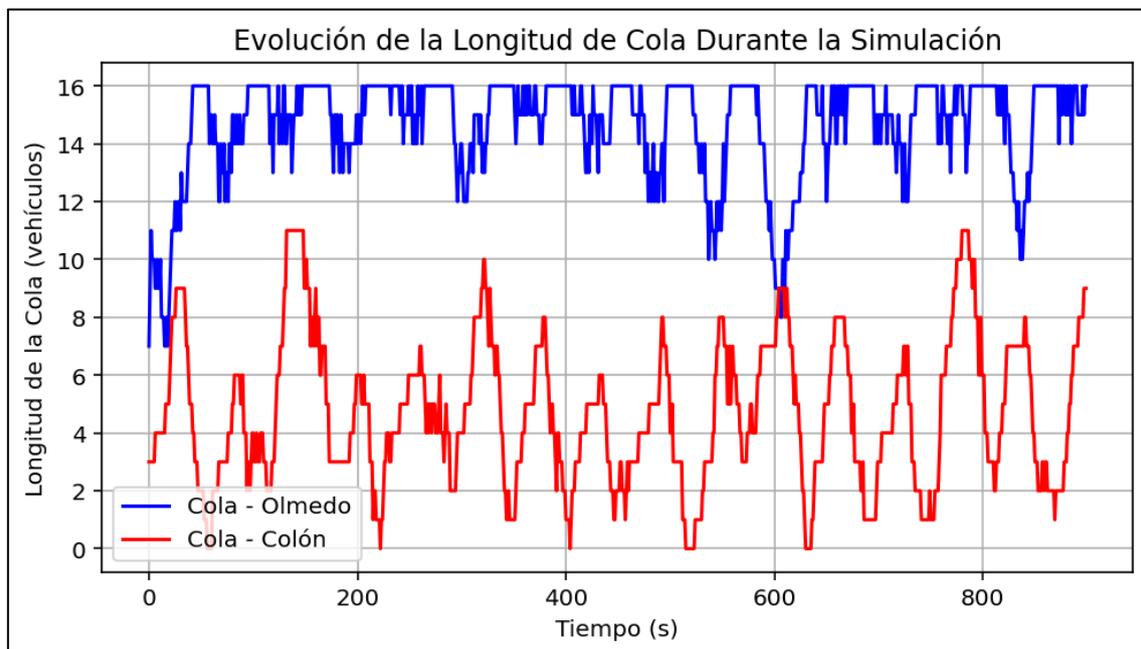
Velocidad media promedio (global): 0.28 celdas/seg (14.82 km/h)

Tasa de cruce: 0.96

La Figura 71 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 16:45 a 17:00 dentro de cinco años.

Figura 71

Longitud de la Cola de automóviles de 16:45 a 17:00 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

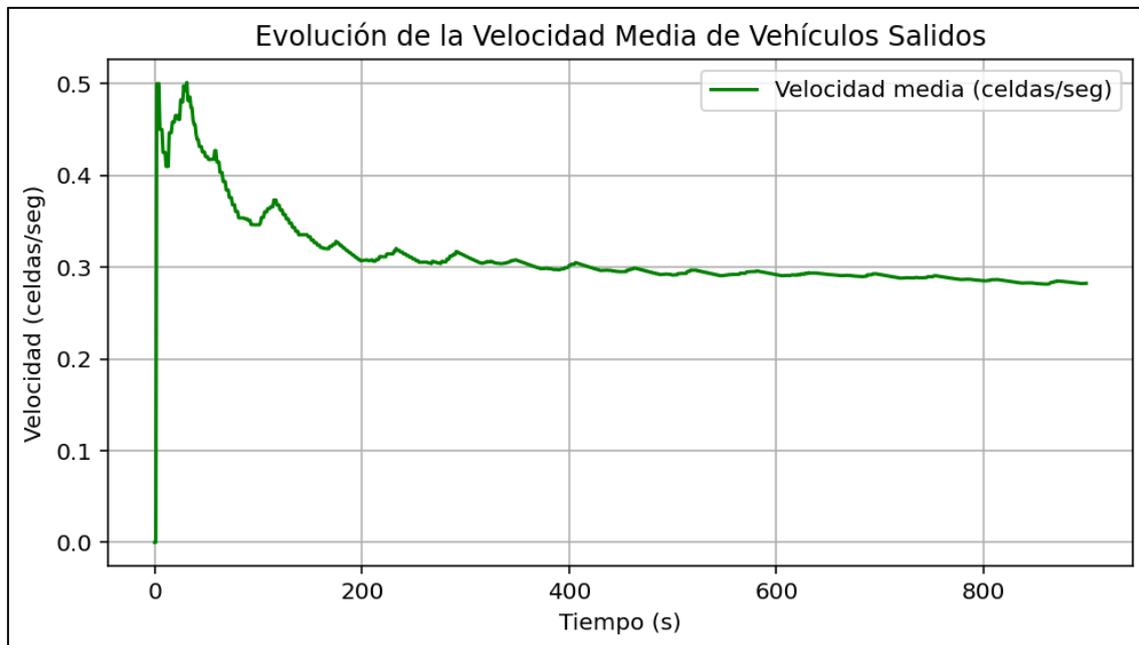


Fuente: El autor.

La Figura 72 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,27–0,28 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 16:45 a 17:00 dentro de cinco años.

Figura 72

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 16:45 a 17:00, simulación 5 años

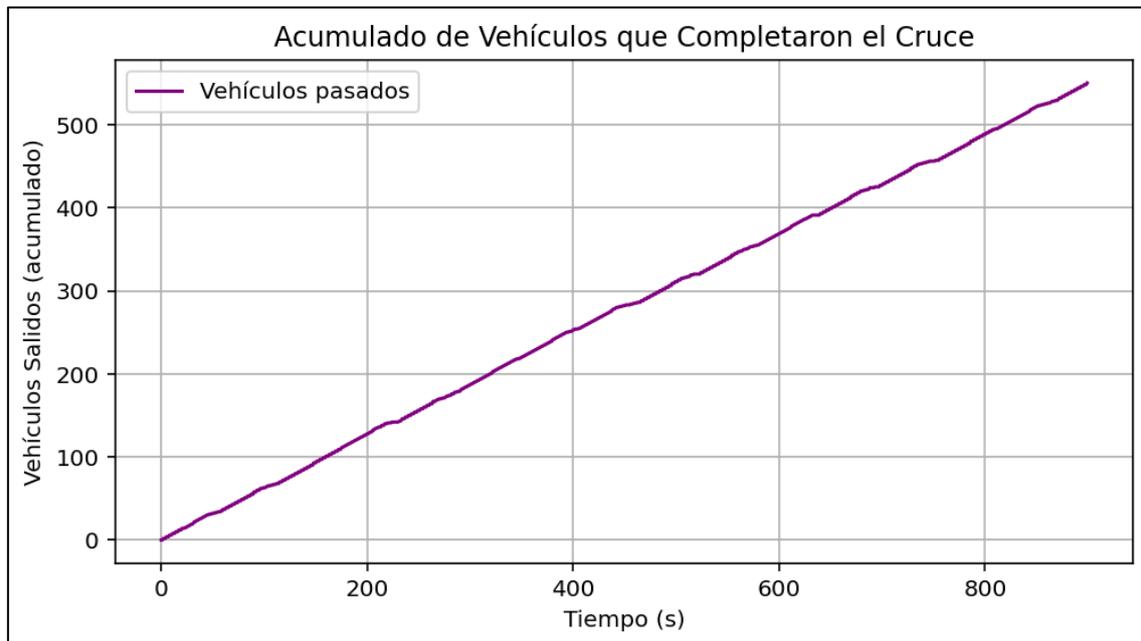


Fuente: El autor.

En la Figura 73 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 550 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 16:45 a 17:00.

Figura 73

Vehículos que completaron el cruce de 16:45 a 17:00 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (17:00 – 17:15)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 12 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 350

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 193

Total, de vehículos que completaron el cruce: 543

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 39.40 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 23.84 s

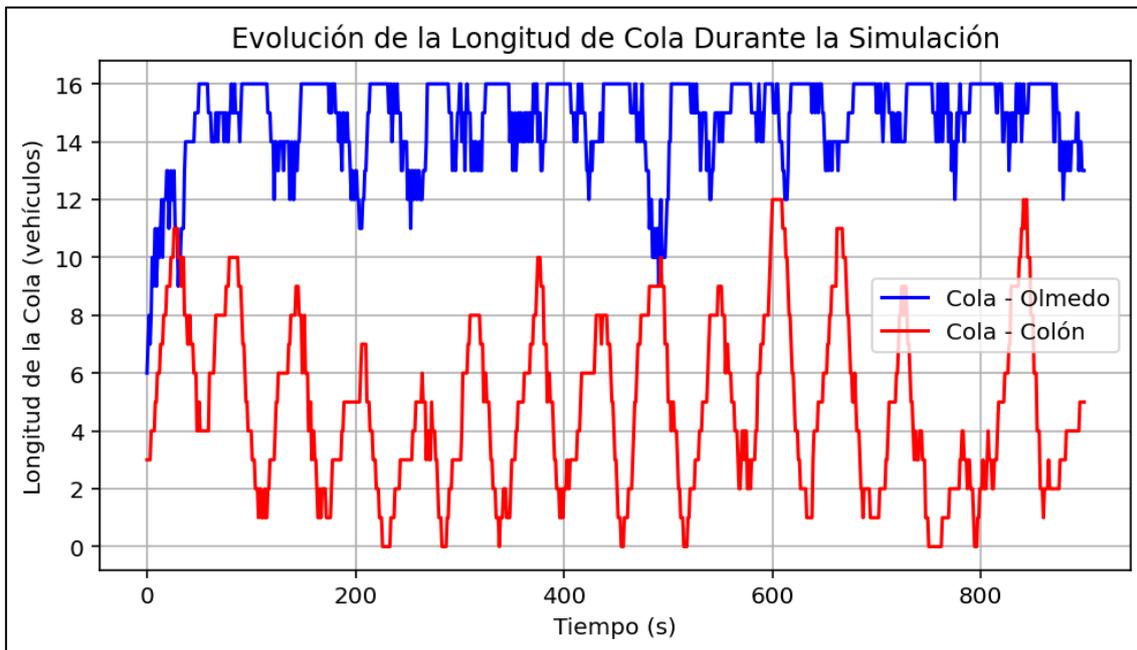
Velocidad media promedio (global): 0.27 celdas/seg (14.16 km/h)

Tasa de cruce: 0.97

La Figura 74 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 17:00 a 17:15 dentro de cinco años.

Figura 74

Longitud de la Cola de automóviles de 17:00 a 17:15 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

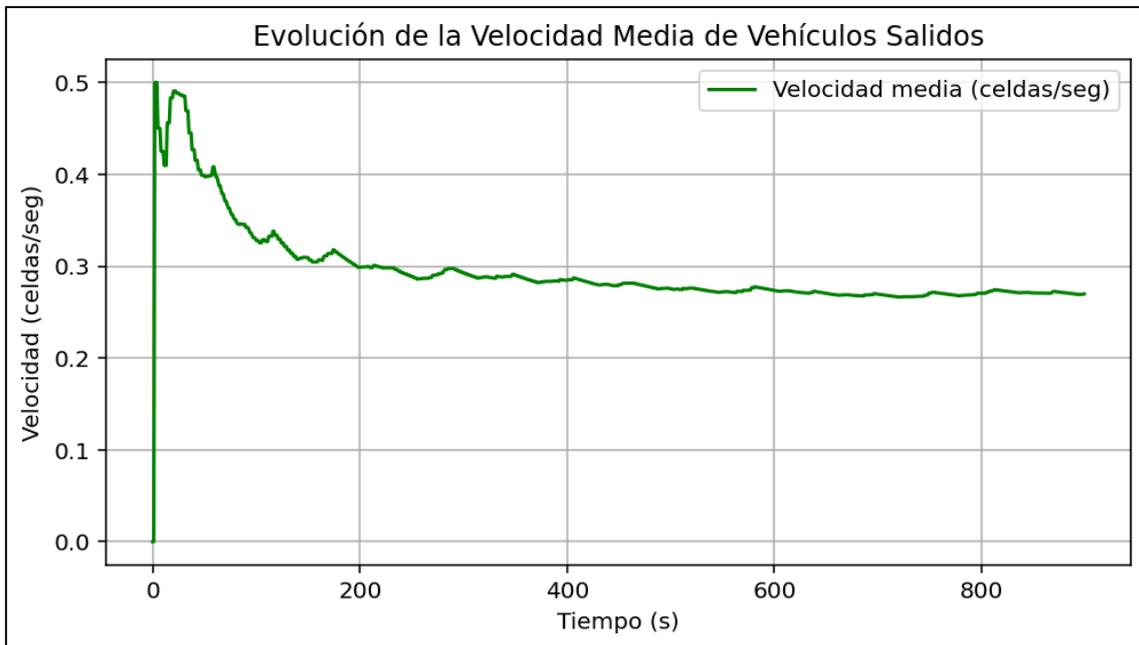


Fuente: El autor.

La Figura 75 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,26–0,27 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 17:00 a 17:15 dentro de cinco años.

Figura 75

Velocidad Media en las calles Olmedo y Colón de 17:00 a 17:15, simulación 5 años

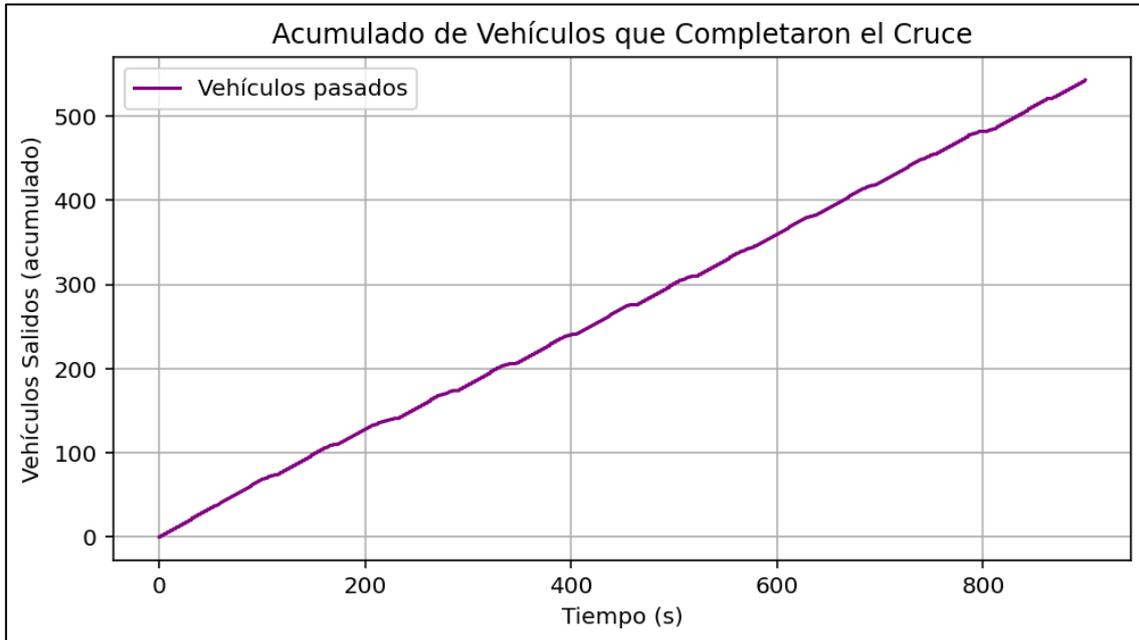


Fuente: El autor.

En la Figura 76 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 543 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 17:00 a 17:15.

Figura 76

Vehículos que completaron el cruce de 17:00 a 17:15 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

Resultados Simulación: 15 minutos – Calle Olmedo y Colón (17:15 – 17:30)

Cola máxima en Calle Olmedo: 16 vehículos

Cola máxima en Calle Colón: 12 vehículos

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Olmedo: 349

Vehículos que completaron el cruce desde Calle Colón: 230

Total, de vehículos que completaron el cruce: 579

Tiempo de espera promedio Calle Olmedo: 37.90 s

Tiempo de espera promedio Calle Colón: 27.48 s

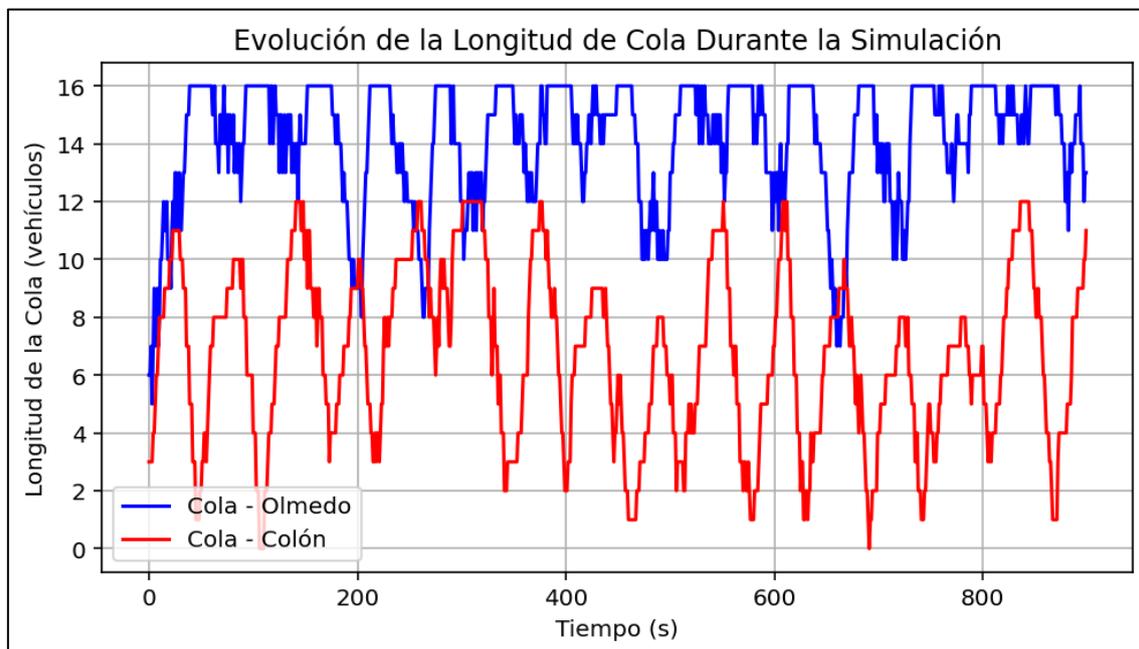
Velocidad media promedio (global): 0.27 celdas/seg (14.00 km/h)

Tasa de cruce: 0.96

La Figura 77 muestra cómo varía en el tiempo la cantidad de vehículos en cola durante la simulación (900 s). La calle Olmedo (línea azul) permanece en valores cercanos a su capacidad máxima, mientras que la calle Colón (línea roja) presenta colas menores y puntuales en el horario de 17:15 a 17:30 dentro de cinco años.

Figura 77

Longitud de la Cola de automóviles de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

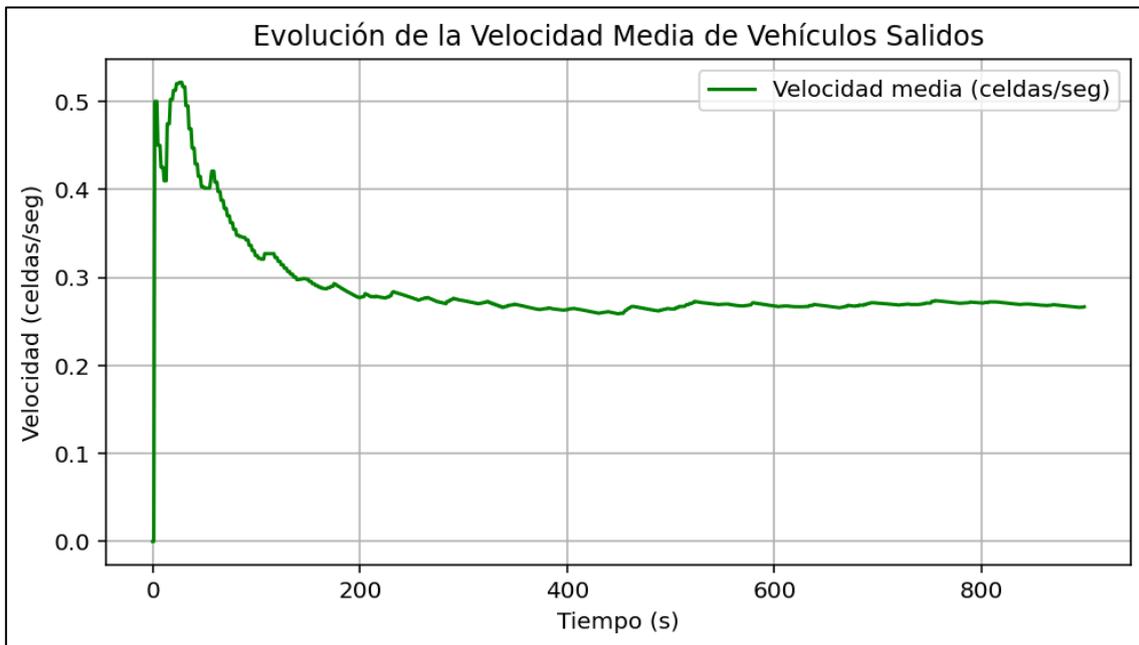


Fuente: El autor.

La Figura 78 muestra la curva de cómo cambia la velocidad promedio (celdas/seg) de los vehículos que completan el cruce a lo largo del tiempo, partiendo de un pico inicial y estabilizándose gradualmente alrededor de 0,26–0,27 celdas/seg hacia el final del experimento en el horario de 17:15 a 17:30 dentro de cinco años.

Figura 78

Longitud de la Cola de automóviles de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón simulación 5 años

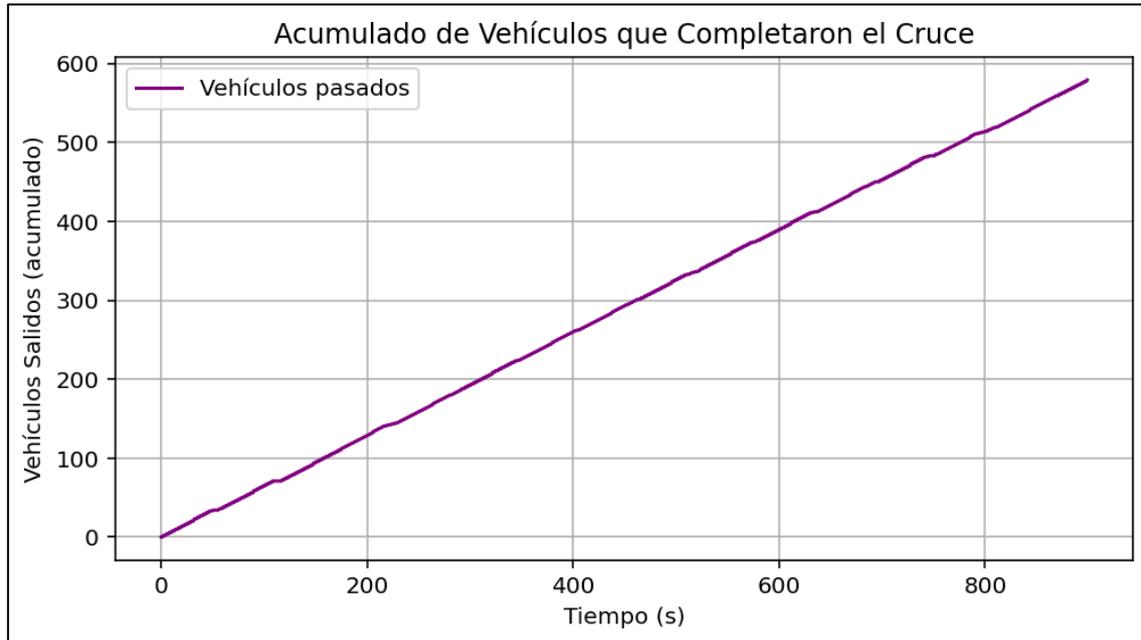


Fuente: El autor.

En la Figura 79 podemos apreciar el conteo total de los vehículos que son 579 que cruzaron la intersección durante la simulación, con lo cual se evidencia una velocidad constante durante toda la simulación para el horario de 17:15 a 17:30.

Figura 79

Vehículos que completaron el cruce de 17:15 a 17:30 en las calles Olmedo y Colón, simulación 5 años



Fuente: El autor.

4.2 Discusión de los Resultados

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los modelos matemáticos y simulaciones propuestas en esta investigación.

Inicialmente, se aborda la proyección del crecimiento poblacional y el incremento del parque automotriz para un horizonte temporal de cinco años (2025–2030), utilizando tasas oficiales y estimadas basadas en datos históricos y censales disponibles. Posteriormente, se exponen los resultados detallados de las simulaciones del tráfico mediante autómatas celulares, tanto para el escenario actual (2025), sustentado en conteos directos, como para el escenario futuro proyectado (2030), considerando el impacto del crecimiento vehicular estimado.

De esta manera, al comprender de forma integral cómo afectará el crecimiento proyectado la movilidad urbana en la intersección crítica de las calles Olmedo y Cristóbal Colón en Riobamba, será posible analizar y discutir de manera comparativa los indicadores obtenidos a partir de las simulaciones.

Crecimiento Poblacional

A partir del dato oficial proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (*INEC, 2022*), la población base de Riobamba en el año 2022 es de 188.891 habitantes. Después de la simulación se proyectó un crecimiento hasta los 248.733 habitantes para el año 2030 esto con una tasa de crecimiento anual estimada en 3,5%. Estos resultados muestran un crecimiento progresivo de la población con un incremento de aproximadamente el 32% respecto al año base.

Este crecimiento poblacional constituye una variable clave para justificar y entender el futuro incremento en la necesidad de movilidad, lo que a su vez explica el incremento en el parque automotriz para los próximos años. Es decir que a mayor población se eleva potencialmente el desplazamiento de las personas que viven en la ciudad teniendo así un impacto directo con la infraestructura vial.

Crecimiento del Parque Automotriz

Al aplicar una tasa de crecimiento del 11,5% se obtuvo para el 2030 una cifra cercana a los 119.276 vehículos, lo que implica un crecimiento de 114% respecto al año base 2023 que contaba con 55.6751 vehículos matriculados estos datos fueron tomados proporcionados por la Dirección de Gestión de Movilidad, Tránsito y Transporte de Riobamba. Según los resultados de las simulaciones presentadas anteriormente, este fenómeno tiene un gran

impacto en la movilidad urbana, especialmente con respecto a la congestión vehicular, el tiempo de espera en intersecciones importantes y la reducción de la velocidad promedio.

Simulación del Tráfico

Escenario Actual (2025)

En el escenario actual, basado en conteos reales obtenidos a través de observaciones directas durante una semana completa, la intersección presenta una congestión significativa en horas punta, manifestada especialmente en la Calle Olmedo. Durante los intervalos simulados de 15 minutos, la cola máxima en la Calle Olmedo alcanzó consistentemente alrededor de 16 vehículos, lo que indica un alto grado de saturación. Por otro lado en la Calle Colón se registró colas máximas de entre cuatro y nueve vehículos lo cual muestra una congestión menor pero relevante.

El número total de vehículos que completaron la intersección en intervalos de 15 minutos se situó entre 260 y 370 automóviles esto refleja que la intersección mantiene una capacidad considerable para manejar el flujo actual de tránsito. Sin embargo, los tiempos de espera promedio en la Calle Olmedo estaban entre 40 y 60 segundos lo cual indica que durante las horas pico se presenta una congestión vehicular notable. Por su parte, en la Calle Colón los tiempos promedio fueron más bajos, generalmente entre 20 y 25 segundos, lo que muestra una congestión moderada dentro del escenario actual.

La velocidad media del tiempo de viaje en este escenario se encuentra entre 0,18 y 0,24 celdas por segundo lo cual es aproximadamente de 12 a 17 km/h. Es decir, se logra una fluidez considerable, pero con un avance limitado por la alta demanda vehicular.

En última instancia al calcular la tasa de cruce en la intersección se tuvieron resultados entre 0,94 y 0.97 lo cual muestra que la mayoría de los vehículos pudieron completar el cruce de la intersección, es decir aunque existe una gran demanda vehicular no se congestiona la intersección ya que conserva una eficiencia con la demanda vehicular actual.

Escenario Futuro (2030)

En la simulación del escenario futuro se consideró un crecimiento automotriz del 114% respecto al año base, con un factor de crecimiento aproximado de 1,72 en cinco años. Para reflejar esta proyección, las tasas de llegada de vehículos se ajustaron proporcionalmente. Esto quiere decir que en la intersección hubo un incremento razonable para la demanda vehicular, esto debido a que en los intervalos de 15 minutos se alcanzaron entre 400 y 580 vehículos.

Al referirnos a la cola máxima en la calle Olmedo observamos que se mantuvo constante en 16 vehículos mientras que en la calle Colón existió un notable aumento llegando hasta los 12 vehículos esto en el periodo de 15 minutos, estos datos ayudan a evidenciar un incremento significativo en las calles dentro de cinco años.

Para el tiempo de espera estaba entre 37 y 50 segundos aproximadamente para la calle Olmedo, mientras que para la calle Colon estaba entre 40 segundos como promedio para ciertas franjas horarias como de 8:15 a 8:30, eso quiere decir que hay un impacto claro en el congestionamiento vehicular en esta intersección

En términos de velocidad media global para el escenario futuro se mostró resultados variables entre 0.16 y 0.29 celdas por segundo lo que corresponde a velocidades entre 11 y

20 km/h. Sin dejar a lado que en ciertos intervalos se registró un incremento puntual en la velocidad media respecto al escenario actual.

Por último, en la tasa de cruce de la intersección se obtuvieron datos entre el 0.94 y 0.97 lo que nos señala que la intersección mantendrá una adecuada fluidez para la demanda vehicular futura, pero con evidentes aumentos en los tiempos de espera para los conductores.

Capítulo 5

Marco Propositivo

5.1 Planificación de la Actividad Preventiva

Este marco propuesto contiene una serie de medidas preventivas y soluciones prácticas que se han diseñado para manejar y disminuir de modo eficaz los problemas de movilidad urbana. Las medidas se apoyan en los conocimientos académicos y la experiencia obtenida a lo largo de la investigación, con el objetivo de intervenir directamente sobre las causas identificadas todo esto sin la necesidad de realizar grandes inversiones en infraestructura.

Los datos obtenidos en las simulaciones de esta investigación muestran que la intersección entre las calles Olmedo y Colón tendrá un incremento considerable para la congestión vehicular dentro de los próximos cinco años. Esto debido al incremento de población con un 32% al año base y la cantidad de vehículos privados en un 114%.

Objetivo General de la Propuesta:

- Reducir un 20% los niveles de congestión en la intersección de las calles Olmedo y Colón durante las horas pico con la aplicación de medidas orientadas al ajuste de la configuración semafórica, la gestión del flujo vehicular y la promoción de una movilidad urbana más sostenible.

Fundamentación de la Propuesta

Esta propuesta se basa en los datos obtenidos después de las simulaciones realizadas, con un crecimiento de la población y de los vehículos se hace necesario aplicar estrategias específicas que permitan manejar la congestión en horas pico como son en la mañana y al

medio día. Estos hallazgos indican que si no se toman las debidas precauciones la congestión podría aumentar.

Medidas Propuestas para la Actividad Preventiva

Medidas a corto plazo:

- **Optimización del ciclo semafórico:** Se propone diseñar algoritmos que permitan adaptar los ciclos actuales de los semáforos de manera acorde con la demanda en franjas horarias críticas.
- **Monitoreo continuo:** Se busca implementar un sistema permanente de recopilación de datos mediante cámaras o radares para evaluar y recalibrar regularmente el modelo de autómata celular u otros modelos relacionados a la simulación del tráfico vehicular para mejorar la toma de decisiones.

Medidas a mediano plazo:

- **Gestión activa del tráfico mediante pico y placa:** Se propone introducir, inicialmente como un piloto focalizado, una restricción vehicular parcial (pico y placa) durante las franjas de mayor congestión detectadas por la simulación.
- **Campañas para la promoción del uso compartido de vehículos:** Implementar iniciativas y campañas de concienciación ciudadana orientadas a fomentar el carpooling o el uso compartido de vehículos, como una medida complementaria para reducir la presión sobre la intersección.

Estrategia de Implementación

Con la finalidad de garantizar la efectividad y sostenibilidad de la propuesta, se recomienda un proceso gradual dividido en fases definidas:

- Fase piloto (primer semestre): Inicialmente ejecutar ajustes semafóricos y monitorear sus efectos inmediatos sobre las colas máximas y tiempos de espera.
- Fase de evaluación y ajuste (segundo semestre): Examinar los resultados obtenidos en la fase piloto para recalibrar la estrategia y realizar modificaciones en la propuesta inicial.
- Implementación escalable (segundo año en adelante): Desplegar progresivamente las medidas de gestión activa del tráfico (pico y placa, promoción del carpooling) evaluando su aceptación y efectividad mediante encuestas ciudadanas y análisis diferenciales con datos reales.

Beneficios de la Propuesta

La implementación de esta propuesta preventiva conlleva beneficios significativos tanto a nivel práctico como académico y social:

- Disminución del impacto ambiental: Reducir el tiempo de espera implica una menor emisión de contaminantes, de esta manera se contribuye al cuidado del medio ambiente en el centro de Riobamba.
- Impacto social positivo: Se mejora la calidad de vida de los habitantes al aumentar la eficiencia en sus desplazamientos diarios, beneficiando directamente la dinámica urbana de Riobamba.

Cierre del Marco Propositivo

En definitiva, la presente planificación de acciones preventivas reúne un conjunto de medidas viables y concretas, diseñadas para enfrentar de manera efectiva los retos derivados del crecimiento poblacional y vehicular de la ciudad. Su implementación no solo busca mitigar los efectos negativos del aumento proyectado del tráfico, sino también consolidar

esta investigación como un referente en la gestión sostenible y eficiente de la movilidad urbana.

Conclusiones

- La investigación confirmó con claridad la hipótesis planteada sobre los efectos negativos del aumento poblacional y vehicular en la movilidad del centro urbano de Riobamba. Las simulaciones proyectadas hacia el año 2030, utilizando el crecimiento poblacional del 31,7% (≈ 248.733 habitantes) y vehicular del 114,3% (≈ 119.276 automóviles), ratifican que la intersección de las calles Olmedo y Cristóbal Colón experimentará niveles significativos de congestión en los próximos cinco años.
- El modelo de autómata celular después de la simulación mostro una notable saturación vehicular en las horas pico delimitadas, por ejemplo en la calle Olmedo se observaron filas constantes de hasta 16 vehículos y por otro lado en la calle colon se observo una cola de 14 vehículos, esto también se vio reflejado en los tiempos de espera que en la calle Olmedo alcanzaron los 60 segundos que es algo crítico, para la calle Colón fue de manera cercana con tiempos de espera entre 45 y 55 segundos dependiendo la hora.
- El flujo vehicular sigue siendo alto con un 93% pero no es del todo correcto ya que hubo una caída en las velocidades entre los 10 y 13 km/h lo cual muestra una degradación en la fluidez de la intersección. Por lo cual se subraya la necesidad de tomar acciones para prevenir el estancamiento de estas calles.
- Finalmente, la proyección de este escenario requiere la implementación de medidas inmediatas, especialmente aquellas orientadas a mejorar la gestión del tráfico y a ajustar la programación semafórica. Dichas alternativas representan soluciones más prácticas y menos costosas en comparación con proyectos de infraestructura de gran magnitud.

Recomendaciones

- Es recomendable establecer un proceso sistemático de seguimiento anual mediante conteos vehiculares actualizados, que permitan ajustar el modelo a las condiciones reales cambiantes del tráfico, asegurando así una herramienta eficaz y precisa para futuras decisiones de planificación.
- Se recomienda estudiar la factibilidad de crear sistemas semafóricos adaptativos, capaces de ajustarse automáticamente a los cambios en los patrones de tráfico para calles y avenidas más concurridas con el fin de mejorar la calidad vial de las personas.
- Para las horas de mayor congestión, se plantea probar planes piloto que puedan restringir de manera temporal la circulación de vehículos. A estas acciones se las puede acompañar con campañas que motiven el uso del transporte público y con estrategias que impulsen el carpooling o uso compartido de automóviles. De este modo se pretende aliviar la carga del tráfico sin que sea necesario realizar cambios en la infraestructura.
- Para los trabajos futuros, sería conveniente considerar más variables dentro del análisis. Entre ellas se encuentran la calidad del servicio de transporte público, las condiciones del clima, la ocurrencia de eventos masivos y también las formas alternativas de movilidad, tales como la bicicleta, la motocicleta o los recorridos a pie. Tomar en cuenta estos factores facilitará el diseño de políticas de movilidad más completas y con un efecto real en la sostenibilidad urbana a largo plazo.

Referencias Bibliográficas

- Carretero Triveño, M. (2024, junio). *Modelo de simulación multimodal de movilidad urbana* [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. E.T.S. de Ingenieros Informáticos (UPM).
<https://oa.upm.es/82655/>
- Clark, C. W. (1976). *Mathematical bioeconomics: The optimal management resources*. John Wiley & Sons.
- Diario Los Andes. (2024, agosto 24). Aprobada ordenanza para regular el tránsito de transporte interprovincial en Riobamba. *Diario Los Andes*.
<https://www.diariolosandes.com.ec/aprobada-ordenanza-para-regular-el-transito-de-transporte-interprovincial-en-riobamba/>
- Dirección de Gestión de Movilidad, Tránsito y Transporte. (2024, junio 20). *Dirección de Gestión de Movilidad, Tránsito y Transporte*. Dirección de Gestión de Movilidad, Tránsito y Transporte. <https://gadmriobamba.gob.ec/index.php/direccion-de-gestion-de-movilidad-transito-y-transporte>
- GAD Municipal del Cantón Riobamba. (2023). *Ordenanzas Municipales*.
<https://www.gadmriobamba.gob.ec/index.php/la-municipalidad/concejo-cantonal/ordenanzas/2023>
- Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 759-770.
- Gómez Suárez, L. E. (2023). *Análisis del Impacto de Vehículos Autónomos y Convencionales Sobre el Tráfico Vehicular Mixto* [PhD Thesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO].
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000842881/3/0842881.pdf>

- Hauser, P. M., & Duncan, O. D. (1959). *The study of population: An inventory and appraisal*. <https://www.sidalc.net/search/Record/cat-unco-ar-1733/Description>
- Heras Quesada, D. (2023). *Herramienta para el modelado y la simulación de movilidad urbana*. <https://gredos.usal.es/handle/10366/158177>
- Hernández Peralta, P. H. (2024). *Modelación, simulación y predicción de los accidentes viales en una intersección mediante autómatas celulares e inteligencia artificial*. <https://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/4342>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (s. f.). Recuperado 19 de abril de 2025, de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>
- Jiménez Gavilanes, D. F. (2023). *Simulación del tráfico vehicular en la ciudad San Francisco de Quito con el software anylogic. Caso estudio: Intercambiador del Condado Shopping [PUCE - Quito]*. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/43292>
- Kreyszig, E. (1993). *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons. INC., Singapore.
- Malthus, T. (2023). An essay on the principle of population. En *British Politics And The Environment In The Long Nineteenth Century* (pp. 77-84). Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003194651-15/essay-principle-population-thomas-malthus>
- Meyer, M. D., & Miller, E. J. (2001). *Urban transportation planning: A decision-oriented approach*. <https://trid.trb.org/View/660406>
- MIDUVI. (2018). *Ley Orgánica De Ordenamiento Territorial. Uso Y Gestión Del Suelo*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/>
- Rao, S. S. (2019). *Engineering optimization: Theory and practice*. John Wiley & Sons.

Vuchic, V. R. (2007). *Urban transit systems and technology*. John Wiley & Sons.

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=zFby0C3ohwQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Vuchic,+V.+R.+\(2007\).+Urban+Transit+Systems+and+Technology.+John+Wiley+%26+Sons.&ots=iS8Con-MdD&sig=ANYCtBaS71lv5ybOynL22C3Q7ks](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=zFby0C3ohwQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Vuchic,+V.+R.+(2007).+Urban+Transit+Systems+and+Technology.+John+Wiley+%26+Sons.&ots=iS8Con-MdD&sig=ANYCtBaS71lv5ybOynL22C3Q7ks)