

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE CÓMPUTO  
**ESCOM**

*Trabajo Terminal*

**“FLUVI” Simulador de sistema de gestión del  
flujo vehicular en vialidades cercanas a áreas  
académicas de IPN - ESCOM**

2025-B058

*Presentan:*

**Connor Urbano Mendoza**

**Denisse Márquez Morales**

**Luis Gael Molina Figueroa**

*Directores:*

**Dr. Genaro Juárez Martínez**

**M. en C. Idalia Maldonado Castillo**



10 de diciembre del 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE CÓMPUTO  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



No de TT: 2025-B058

10 de diciembre del 2025

**Documento Técnico**

**“FLUVI” Simulador de sistema de gestión del flujo vehicular en vialidades  
cercanas a áreas académicas de IPN - ESCOM**

**Presentan**

Connor Urbano Mendoza  
Denisse Márquez Morales  
Luis Gael Molina Figueroa

**Directores**

*Dr. Genaro Juárez Martínez*  
*M. en C. Idalia Maldonado Castillo*

**RESUMEN**

Este proyecto se enfoca a modelar y simular el tráfico vehicular en las áreas cercanas al IPN-ESCOM, utilizando sistemas dinámicos discretos como herramienta principal. A través de este enfoque, se busca comprender y entender el comportamiento de un sistema vehicular caracterizado por la interacción de múltiples agentes, lo que resulta en patrones de flujo y congestión. El sistema permitirá la generación de múltiples escenarios de flujo vehicular y la obtención de métricas estadísticas sobre el flujo y densidad en vialidades cercanas a áreas académicas del Instituto Politécnico Nacional (IPN), proporcionando información sobre la aplicación de autómatas celulares en el tráfico vehicular.

**Palabras clave:** Sistemas complejos, dinámica espacial, simulación de tráfico, autómatas celulares.



## CARTA RESPONSIVA

Que otorga visto bueno y avala la conclusión de documentación del Trabajo Terminal bajo los lineamientos establecidos por la Comisión Académica de Trabajos Terminales (CATT)

CDMX, a 17 de Diciembre de 2025

M. EN C. IVÁN GIOVANNY MOSSO GARCÍA  
PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DE TRABAJOS TERMINALES  
P R E S E N T E

EN ATENCIÓN A:  
LIC, MILDRED SANDOVAL GARCÍA  
SECRETARIA EJECUTIVA

Por medio de la presente, se informa que el Trabajo Terminal Núm. 2025-B058

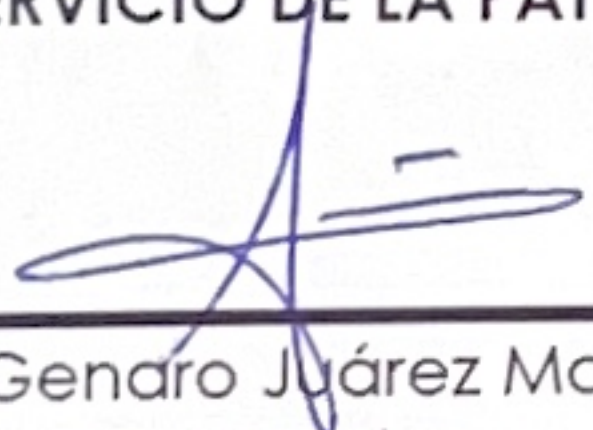
Que lleva por Título: "FLUVI" Simulador de sistema de gestión del flujo vehicular en  
vialidades cercanas a áreas académicas de IPN - ESCOM


Fue concluido satisfactoriamente por:

Connor Urbano Mendoza  
Denisse Márquez Morales  
Luis Gael Molina Figueroa

Se avala que la documentación entregada mediante discos en formato DVD fue **revisada de manera precisa y exhaustiva** con el propósito de asegurar que los avances desarrollados bajo la supervisión de quien o quienes suscriben, hayan cumplido con lo planteado en el protocolo original, así como en lo establecido por el Documento Rector de Operación y Evaluación para los Trabajos Terminales de la ESCOM.

ATENTAMENTE  
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

  
Dr. Genaro Juárez Martínez  
Director

  
M. en C. Idalia Maldonado Castillo  
Directora



## Advertencia

*“Este documento contiene información desarrollada por la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional, a partir de datos y documentos con derecho de propiedad y por lo tanto, su uso quedará restringido a las aplicaciones que explícitamente se convengan.”*

La aplicación no convenida exime a la escuela su responsabilidad técnica y da lugar a las consecuencias legales que para tal efecto se determinen.

Información adicional sobre este reporte técnico podrá obtenerse en:

La Subdirección Académica de la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional, situada en Av. Juan de Dios Bátiz s/n Teléfono: 57296000, extensión 52000.

# Agradecimientos

## **Denisse Marquez Morales**

Quiero agradecer a mis directores por habernos orientado durante todo el proceso. Su experiencia, paciencia y consejos fueron esenciales para realizar este trabajo y para mi formación como ingeniera. Agradezco nuestros sinodales por tomarse el tiempo de revisar este documento y por sus valiosas observaciones, las cuales permitieron mejorar sustancialmente la calidad de este trabajo. A mi equipo les agradezco por el esfuerzo que hicimos en conjunto, por las horas de trabajo compartidas y por la dedicación que pusieron en cada etapa del proyecto. Los resultados que presentamos son fruto de nuestro trabajo colaborativo y del compromiso que mantuvimos a lo largo de este tiempo. Finalmente, quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi familia, amigos y novio por el apoyo constante que me han brindado durante todos estos años de educación. Su comprensión, aliento y confianza en mí han sido fundamentales para llegar hasta este momento. Gracias por estar presentes en cada etapa de mi formación académica y por hacer posible que alcanzara esta meta.

## **Connor Urbano Mendoza**

Agradezco profundamente a mis compañeros de equipo, quienes han estado presentes desde el primer día de la carrera. A mi familia, por brindarme su incondicional apoyo económico y moral durante toda mi formación académica. A mis amigos, por ayudarme a levantarme de aquellos momentos difíciles que parecían fracasos, pero que terminaron siendo valiosos aprendizajes.

De igual manera, expreso mi gratitud a mis directores y sinodales por su guía experta para llevar este Trabajo Terminal al mejor nivel posible. Finalmente, agradezco a mi novia por su compañía y por ayudarme a encontrar bienestar y confianza en mi día a día.

## **Luis Gael Molina Figueroa**

Quiero agradecer a mis compañeros por hacer un trabajo que superó mis expectativas y por ser buenos amigos de la carrera.

A mi familia le agradezco su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y a Mitten y Logan por su amor y felicidad.

También a mis amigos les agradezco que me hayan apoyado en la carrera, se aprende mucho mejor con buena compañía y las maruchan saben más ricas.

A Mizi por haberme mostrado un lado distinto de la vida y compartir conmigo tantos momentos, tanto amor.

Finalmente agradezco a mis profesores, principalmente a mis directores y sinodales, así como aquellos que transmitieron su pasión por la enseñanza a través de mi vida, por haberme dado tanto gusto por las ciencias y por la computación.





## CARTA DE AUTORIZACIÓN DE DIFUSIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE TESIS

90 Años de la Creación del Consejo Técnico de la Escuela Politécnica Nacional  
90 Aniversario del CECyT 9 "Juan de Dios Bátiz"  
50 Aniversario del CICS, Unidad Milpa Alta  
25 Aniversario del CICS, Unidad Santo Tomás y del CICATA, Unidad Altamira  
20 Aniversario de la Defensoría de los Derechos Politécnicos

### I. IDENTIFICACIÓN DEL AUTOR E INVESTIGACIÓN

<b>Nombre del autor (es)</b> <i>Apellidos, Nombre(s)</i>	Márquez Morales Denisse, Molina Figueroa Luis Gael, Urbano Mendoza Connor
<b>Correo electrónico</b>	simuladordetrafficoescomipn@gmail.com

<b>Unidad Académica</b>	
Escuela Superior De Cómputo	
<b>Nivel Educativo</b>	
Nivel Superior	<input type="checkbox"/>
<b>Programa Académico</b>	
Ingeniería en Sistemas Computacionales Plan 2020	
<b>Título de la investigación</b>	
"FLUVI" Simulador De Sistema De Gestión Del Flujo Vehicular En Vialidades Cercanas A Áreas Académicas Del IPN-ESCOM	
<b>Modalidad de la investigación</b>	
Tesis	( <input type="checkbox"/> )
Seminario de titulación <i>Tesina o trabajo final del seminario cursado</i>	( <input type="checkbox"/> )
Memoria de experiencia profesional <i>Informe escrito de las actividades profesionales realizadas</i>	( <input type="checkbox"/> )
Proyecto de investigación <i>Informe técnico de la propuesta o desarrollo de un nuevo material, equipo, prototipo, proceso o sistema</i>	( <input type="checkbox"/> )
Curricular <i>Informe de cursos o actividades correspondientes a esta modalidad de titulación</i>	( <input checked="" type="checkbox"/> )
Práctica profesional <i>Informe escrito avalado por la empresa u organismo donde se desarrolló la práctica</i>	( <input type="checkbox"/> )
Programa especial <i>Informe de asignaturas tecnológicas propias de la rama cursada previamente</i>	( <input type="checkbox"/> )
Otro <i>Resumen o versión alterna autorizada por el autor</i>	( <input type="checkbox"/> )

### II. ESPECIFICACIONES DEL DOCUMENTO (FORMATO DIGITAL)

<b>Formato del archivo "versión pública de la investigación"</b>	PDF ( <input checked="" type="checkbox"/> )
<b>Número de páginas</b> <i>Incluyendo anexos. Excluyendo portada.</i>	244 _____ páginas
<b>Formato del archivo "documentos de soporte"</b>	PDF ( <input checked="" type="checkbox"/> )
<b>Número de páginas</b> <i>Incluye: autorización de difusión y formatos institucionales</i>	242 _____ páginas







## CARTA DE AUTORIZACIÓN DE DIFUSIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE TESIS

90 Años de la Creación del Consejo Técnico de la Escuela Politécnica Nacional  
90 Aniversario del CECyT 9 "Juan de Dios Bátiz"  
50 Aniversario del CICS, Unidad Milpa Alta  
25 Aniversario del CICS, Unidad Santo Tomás y del CICATA, Unidad Altamira  
20 Aniversario de la Defensoría de los Derechos Politécnicos

### III. AUTORIZACIÓN DE DIFUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El (los) que suscribe(n) Márquez Morales Denisse, Molina Figueroa Luis Gael, Urbano Mendoza Connor, con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor; así como lo dispuesto en los artículos 5, 7 fracción IV, 9 y 11, fracción XXI de la Ley General en materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación, como titular(es) de los derechos moral y patrimonial de la investigación titulada: "FLUVI" Simulador De Sistema De Gestión Del Flujo Vehicular En Vialidades Cercanas A Áreas Académicas Del IPN-ESCOM, consiento (consentimos) al Instituto Politécnico Nacional (IPN), a través de la Escuela Superior De Cómputo, así como a la Dirección de Bibliotecas y Publicaciones (DBP), para que publiquen por tiempo indefinido de forma gratuita y no exclusiva, en el Repositorio Institucional de Tesis, los contenidos de mi investigación, autorizándolo a:

- A. Almacenar la obra en el citado repositorio para efectos de seguridad y preservación;
- B. Publicar la obra con fines académicos y de investigación;
- C. Transformar o convertir la obra a distintos formatos o soportes electrónicos, para su accesibilidad, preservación y seguridad.

Al tenor de lo previamente expuesto, manifiesto que la obra es original y no infringe los derechos de la propiedad intelectual de otras personas o entidades, por lo que excluyo al Instituto Politécnico Nacional de todo tipo de responsabilidad, ya sea civil, administrativa o penal en virtud de su contenido.

La obra se pondrá a disposición en el Repositorio Institucional de Tesis (<https://tesis.ipn.mx>), respetando los derechos de autor considerando como requisito la licencia de uso Creative Commons BY-NC-ND 4.0 © ⓘ ⓘ ⓘ.

El autor entiende que, de no autorizar la publicación de su tesis, ésta será catalogada de manera interna en la biblioteca de la Escuela Superior De Cómputo, únicamente a nivel referencial para efectos de control. El autor podrá solicitar por escrito el retiro de su obra del Repositorio Institucional de Tesis, ante su Unidad Académica si lo considera conveniente; por su parte, el Instituto Politécnico Nacional podrá en cualquier momento retirar la publicación si existieran reclamaciones de terceros que afirmen ser titulares.

Así mismo, manifiesto bajo protesta de decir verdad que he leído y conozco el Aviso de Privacidad disponible en la página electrónica de la Dirección de Bibliotecas y Publicaciones, <https://www.ipn.mx/bibliotecas-publicaciones/>

Ciudad de México, a 10 de Diciembre de 2025

Denisse Márquez Morales

Connor Urbano Mendoza Molina Figueroa Luis Gael

Nombre(s) completo y firma del autor(es)





# Índice general

<b>1. Capítulo 1</b>	<b>11</b>
1.1. Introducción . . . . .	11
1.1.1. Organización del documento . . . . .	12
1.2. Estado del arte . . . . .	12
1.3. Problemática . . . . .	16
1.4. Objetivos . . . . .	16
1.4.1. Objetivo general . . . . .	16
1.5. Justificación . . . . .	17
1.6. Solución Propuesta . . . . .	17
1.7. Alcance del proyecto . . . . .	18
1.8. Metodología . . . . .	18
1.8.1. Implementación . . . . .	20
1.8.2. Iteraciones . . . . .	20
<b>2. Capítulo 2</b>	<b>21</b>
2.1. Marco Teórico . . . . .	21
2.1.1. Modelado Matemático de Sistemas de Tráfico . . . . .	21
2.1.2. Sistemas Dinámicos Discretos . . . . .	22
2.1.3. Sistemas Complejos . . . . .	24
2.1.4. Autómatas Celulares . . . . .	26
2.1.5. Sistemas de gestión de tráfico . . . . .	27
2.1.6. Tipos de sistemas de gestión de tráfico . . . . .	27
2.1.7. Sistemas Inteligentes de Transporte Sistemas inteligentes de transporte (ITS) . . . . .	28
2.1.8. Simulación de tráfico vehicular . . . . .	28
2.1.9. Modelos de simulación de tráfico . . . . .	29
2.1.10. Software de simulación de tráfico . . . . .	31
2.1.11. Vialidades cercanas al IPN-ESCOM . . . . .	31
2.1.12. Descripción de la zona de estudio . . . . .	32
<b>3. Capítulo 3</b>	<b>33</b>
3.1. Análisis . . . . .	33
3.1.1. Requerimientos Funcionales . . . . .	33
3.1.2. Requerimientos No Funcionales . . . . .	34
3.1.3. Diagramas de casos de uso . . . . .	36
3.1.4. Detalle de casos de uso . . . . .	37
3.1.5. Reglas del Proyecto . . . . .	43
3.1.6. Actores . . . . .	44
3.1.7. Herramientas a utilizar . . . . .	44
3.1.8. Algoritmos analizados . . . . .	46
3.1.9. Planificación del Proyecto . . . . .	47
3.1.10. Análisis de Riesgos del Proyecto . . . . .	64
3.1.11. Estudio de Factibilidad . . . . .	68

<b>4. Capitulo 4</b>	<b>77</b>
4.1. Diseño . . . . .	77
4.1.1. Arquitectura del Sistema . . . . .	77
4.1.2. Planificación del mapa . . . . .	78
4.1.3. Diseño de Interfaces . . . . .	87
<b>5. Capitulo 5</b>	<b>102</b>
5.1. Desarrollo . . . . .	102
5.1.1. Construccion del modelo de simulacion . . . . .	102
5.1.2. Implementacion de la solucion . . . . .	104
5.1.3. Reglas de transición . . . . .	116
5.1.4. Implementación de las Reglas Elementary Cellular Automaton (ECA) 184	116
5.1.5. Estructura de Calles . . . . .	116
5.1.6. Conexión de Calles . . . . .	117
5.1.7. Sistema de Configuración de Escenarios . . . . .	118
5.1.8. Constructor de Mapas . . . . .	120
5.1.9. Sistema de Métricas de Simulación . . . . .	124
5.1.10. Sistema de Tiempo Virtual . . . . .	128
5.1.11. Barra de Control del Simulador . . . . .	129
5.1.12. Barra de Información . . . . .	132
5.1.13. Actualización del Estado . . . . .	134
5.1.14. Visualización . . . . .	134
5.1.15. Inicialización de la Simulación . . . . .	135
<b>6. Capitulo 6</b>	<b>137</b>
6.1. Pruebas . . . . .	137
6.1.1. Pruebas Funcionales Básicas . . . . .	137
6.1.2. Pruebas de Interfaz de Usuario . . . . .	152
6.1.3. Pruebas de Métricas y Análisis . . . . .	167
6.1.4. Pruebas de Escenarios Especiales . . . . .	178
6.1.5. Pruebas de Larga Duración . . . . .	189
6.1.6. Pruebas de Constructor de Mapas . . . . .	200
6.1.7. Pruebas de Diferentes Escenarios . . . . .	207
6.1.8. Resumen de Resultados . . . . .	231
6.1.9. Conclusiones de las Pruebas . . . . .	232
<b>7. Conclusiones</b>	<b>234</b>
<b>8. Trabajo a Futuro</b>	<b>236</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>239</b>
Glosario . . . . .	242
Acrónimos . . . . .	244

# Índice de figuras

2.1. Figura ECA 184 . . . . .	26
2.2. Diferentes modelos de transporte. . . . .	30
3.1. Diagrama de casos de uso del actor usuario . . . . .	36
3.2. Cronograma de meses de trabajo estimados para la realización de este trabajo terminal. . . . .	48
3.3. Red del trabajo terminal Simulador de sistema de gestión del flujo vehicular en vialidades cercanas a áreas académicas del IPN - ESCOM (FLUVI). . . . .	52
3.4. Sección 1 de la Red PERT del trabajo terminal FLUVI. . . . .	53
3.5. Sección 2 de la Red Program Evaluation and Review Technique (PERT) del trabajo terminal FLUVI. . . . .	54
3.6. Sección 2 de PERT simple del trabajo terminal FLUVI. . . . .	55
3.7. Sección 1 del diagrama de Pert Simple del trabajo terminal FLUVI. . . . .	56
3.8. Sección 2 del diagrama de Pert Simple del trabajo terminal FLUVI. . . . .	57
3.9. Imagen de la Tabla consultada de la Distribución Normal (Tabla Z) consultada en el repositorio virtual de la Universidad de Murcia[1]. . . . .	62
3.10. Matriz de probabilidad e Impacto[2]. . . . .	64
4.1. Diagrama de arquitectura general del sistema FLUVI . . . . .	77
4.2. Mapa completo del modelo . . . . .	79
4.3. Mapa completo en Google Maps del modelo . . . . .	79
4.4. Avenida Miguel Othón de Mendizábal desde Google Maps. . . . .	80
4.5. Avenida Miguel Bernard desde Google Maps. . . . .	80
4.6. Avenida IPN desde Google Maps. . . . .	81
4.7. Avenida Juan de Dios Bátiz desde Google Maps. . . . .	81
4.8. Calle Sierravista desde Google Maps. . . . .	82
4.9. Calle Lindavista desde Google Maps. . . . .	82
4.10. Calle Buenavista desde Google Maps. . . . .	83
4.11. Calle Otavalo desde Google Maps. . . . .	83
4.12. Calle Montevideo desde Google Maps. . . . .	84
4.13. Calle Guanajuato desde Google Maps. . . . .	84
4.14. 17 de mayo desde Google Maps. . . . .	85
4.15. Avenida Wilfrido Massieu desde Google Maps. . . . .	85
4.16. Avenida Luis Enrique Erro desde Google Maps. . . . .	86
4.17. Avenida Cien Metros desde Google Maps. . . . .	86
4.18. Miguel de Anda y Barredo desde Google Maps. . . . .	87
4.19. Pantalla de inicio del simulador FLUVI . . . . .	88
4.20. Panel de control lateral con todas las secciones disponibles . . . . .	88
4.21. Guía interactiva del simulador de tráfico FLUVI . . . . .	89
4.22. Interfaz de configuración de calles con selección activa . . . . .	90
4.23. Interfaz de configuración de escenarios especiales . . . . .	91
4.24. Constructor de mapas con herramientas de edición . . . . .	92
4.25. Panel de métricas con interpretación del sistema (Parte 1) . . . . .	93
4.26. Panel de métricas con gráficas y exportación (Parte 2) . . . . .	93
4.27. Sección informativa sobre FLUVI y sus algoritmos . . . . .	95
6.1. Prueba PF-01: Generación de tráfico con probabilidad 0 % . . . . .	138
6.2. Prueba PF-02: Generación de tráfico con probabilidad 100 % . . . . .	139



6.3. Prueba PF-03: Conexión lineal entre calles . . . . .	140
6.4. Prueba PF-04: Conexión de incorporación múltiple a uno . . . . .	141
6.5. Prueba PF-05: Distribución probabilística en intersecciones . . . . .	142
6.6. Prueba PF-06: Sistema de cambio de carril ante obstáculos . . . . .	144
6.7. Prueba PF-07: Generación de 6 tipos diferentes de vehículos con texturas diferenciadas . . . . .	145
6.8. Prueba PF-08: Generación continua de vehículos en calle tipo GENERADOR . .	147
6.9. Prueba PF-09: Creación de calle tipo DEVORADOR . . . . .	149
6.10. Prueba PF-09: Absorción de vehículos en calle tipo DEVORADOR . . . . .	149
6.11. Prueba PF-10: Aplicación correcta de reglas del autómata celular Paso 1. . . . .	151
6.12. Prueba PF-10: Aplicación correcta de reglas del autómata celular Paso 2. . . . .	151
6.13. Prueba PUI-01: Control de pausa y reanudación . . . . .	152
6.14. Prueba PUI-02: Avance frame por frame . . . . .	154
6.15. Prueba PUI-03a: Velocidad mínima de simulación 1 % . . . . .	155
6.16. Prueba PUI-03b: Velocidad máxima de simulación (5x) . . . . .	156
6.17. Prueba PUI-04: Panel de configuración de propiedades de calles . . . . .	157
6.18. Prueba PUI-05: Controles de zoom y desplazamiento del canvas . . . . .	158
6.19. Prueba PUI-06: Toggle entre modo oscuro y modo claro . . . . .	159
6.20. Prueba PUI-07: Funcionalidad de sidebar colapsable . . . . .	160
6.21. Prueba PUI-08: Toggle de visualización de conexiones . . . . .	161
6.22. Prueba PUI-09: Toggle de visualización de vértices . . . . .	162
6.23. Prueba PUI-10: Toggle de visualización de etiquetas . . . . .	163
6.24. Prueba PUI-11: Toggle de minimapa . . . . .	164
6.25. Prueba PUI-12: Reloj virtual de simulación . . . . .	165
6.26. Prueba PUI-13: Switch Activador de Celdas y tooltips informativos . . . . .	166
6.27. Prueba PM-01: Identificación de estado sub-utilizado . . . . .	167
6.28. Prueba PM-02: Identificación de estado de flujo óptimo . . . . .	168
6.29. Prueba PM-03: Identificación de estado congestionado . . . . .	169
6.30. Prueba PM-04: Identificación de estado de colapso . . . . .	170
6.31. Prueba PM-05: Visualización de gráficas de métricas temporales . . . . .	171
6.32. Prueba PM-06: Exportación de métricas en formato CSV . . . . .	172
6.33. Prueba PM-07: Exportación de métricas en formato JSON . . . . .	173
6.34. Prueba PM-08: Funcionalidad de limpieza de métricas . . . . .	174
6.35. Prueba PM-09: Cálculo y visualización de entropía de Shannon . . . . .	175
6.36. Prueba PM-10: Configuración de calles para cálculo de métricas . . . . .	176
6.37. Prueba PM-11: Selección visual de calles desde el mapa para métricas . . . . .	177
6.38. Prueba PES-01: Bloqueo selectivo de carriles . . . . .	178
6.39. Prueba PES-02: Escenario de inundación con reducción de velocidad . . . . .	179
6.40. Prueba PES-03: Sistema de colocación de obstáculos dinámicos . . . . .	180
6.41. Prueba PES-04: Sistema de persistencia de escenarios . . . . .	181
6.42. Prueba PES-05: Modo pintura para aplicación continua de bloqueos . . . . .	182
6.43. Prueba PES-06: Limpieza completa de bloqueos del mapa . . . . .	183
6.44. Prueba PES-07: Escenario predeterminado de Inundación Masiva . . . . .	184
6.45. Prueba PES-08: Escenario predeterminado de Baches Aleatorios . . . . .	185
6.46. Prueba PES-09: Exportación de escenarios en formato JSON . . . . .	186
6.47. Prueba PES-09: Archivo correctamente descargado. . . . .	187
6.48. Prueba PES-10: Validación de compatibilidad de escenarios . . . . .	188
6.49. PLD-01a: Patrón de tráfico durante hora pico matutina (Lunes 08:00) . . . . .	190
6.50. PLD-01b: Tráfico durante hora de comida (Lunes 14:00) . . . . .	190
6.51. PLD-01c: Pico máximo de tráfico vespertino (Lunes 18:00) . . . . .	191
6.52. PLD-01d: Tráfico nocturno reducido (Lunes 23:00) . . . . .	192

6.53. PLD-01e: Patrón de tráfico en fin de semana (Sábado 14:00) . . . . .	193
6.54. PLD-01f: Mapa de calor de densidad por hora y día de la semana . . . . .	194
6.55. PLD-01g: Comparación de patrones de tráfico Lunes vs Sábado . . . . .	195
6.56. Prueba PLD-02a: Multiplicadores durante hora pico de la mañana . . . . .	197
6.57. Prueba PLD-02b: Multiplicadores durante hora valle nocturna . . . . .	198
6.58. Prueba PLD-02c: Multiplicadores durante fin de semana . . . . .	199
6.59. Prueba PCM-01: Sistema de calles curvas con vértices editables . . . . .	200
6.60. Prueba PCM-02: Creación de nueva calle con constructor de mapas. . . . .	202
6.61. Prueba PCM-02: Calle creada. . . . .	202
6.62. Prueba PV-01: Ciclo día/noche con cambios de color de fondo. (Claro) . . . . .	203
6.63. Prueba PV-01: Ciclo día/noche con cambios de color de fondo. (Oscuro) . . . . .	204
6.64. Prueba PV-02: Efecto de lluvia con partículas animadas y relámpagos . . . . .	205
6.65. Prueba PV-03: Rotación automática de vehículos en calles curvas . . . . .	206
6.66. Distribuciones de Densidad y Flujo durante paro <i>IPN</i> . . . . .	208
6.67. Diagrama Fundamental del Tráfico durante paro <i>IPN</i> . . . . .	209
6.68. Análisis Temporal de Métricas durante paro <i>IPN</i> . . . . .	210
6.69. Distribuciones de Densidad y Flujo con inundación intermitente . . . . .	213
6.70. Diagrama Fundamental del Tráfico con inundación intermitente . . . . .	214
6.71. Análisis Temporal de Métricas con inundación intermitente . . . . .	215
6.72. Distribuciones de Densidad y Flujo en escenario normal . . . . .	218
6.73. Diagrama Fundamental del Tráfico y Mapa de Calor Semanal . . . . .	219
6.74. Análisis Temporal de Métricas de Tráfico durante una semana . . . . .	219
6.75. Distribuciones de Densidad y Flujo con baches en Erro y Barredo . . . . .	222
6.76. Diagrama Fundamental del Tráfico y Mapas de Calor con baches . . . . .	223
6.77. Análisis Temporal de Métricas con baches durante una semana . . . . .	223
6.78. Prueba PSE-05: Escenario con construcción permanente en Av. Juan de Dios Batiz - análisis temporal . . . . .	226
6.79. Prueba PSE-05: Escenario con construcción permanente en Av. Juan de Dios Batiz - diagrama fundamental . . . . .	226
6.80. Prueba PSE-05: Escenario con construcción permanente en Av. Juan de Dios Batiz - correlaciones . . . . .	227
6.81. Prueba PSE-06: Escenario de saturación por incremento de alumnos - análisis temporal . . . . .	228
6.82. Prueba PSE-06: Escenario de saturación por incremento de alumnos - diagrama fundamental . . . . .	229
6.83. Prueba PSE-06: Escenario de saturación por incremento de alumnos - correlaciones	230

# Índice de Tablas

1.1. Comparativa de trabajos de investigación similares a FLUVI . . . . .	14
1.2. Comparativa de sistemas en el mercado similares a FLUVI. . . . .	15
1.3. Comparación de metodologías ágiles. . . . .	19
2.1. Tabla Regla ECA 184. . . . .	27
3.1. Resumen de atributos del Caso de Uso CU1: Simular Tráfico (Parte 1) . . . . .	37
3.2. Resumen de atributos del Caso de Uso CU1: Simular Tráfico (Parte 2) . . . . .	37
3.3. Matriz de precedencia del trabajo terminal FLUVI. . . . .	51
3.4. Tabla de Holguras y Tiempos: . . . . .	58
3.12. Equipo de cómputo ideal . . . . .	68
3.13. Herramientas de software a utilizar . . . . .	68
3.14. Equipo de cómputo 1 . . . . .	69
3.15. Equipo de cómputo 2 . . . . .	69
3.16. Equipo de cómputo 3 . . . . .	69
3.17. Relación de horas de trabajo estimadas para la realización de este trabajo terminal	69
3.5. Tabla de Tiempos de Tres Puntos del trabajo terminal FLUVI. . . . .	71
3.6. Tabla de Parámetros de las actividades del proyecto. . . . .	71
3.7. Tabla de Tiempos del trabajo terminal FLUVI. . . . .	72
3.8. Tabla comparativa de costos y tiempos del trabajo terminal FLUVI. . . . .	72
3.9. Justificación de costos de tiempo normal e intensificado para las actividades del proyecto. . . . .	75
3.10. Riesgos identificados en el proyecto. . . . .	75
3.11. Análisis de Riesgos del Proyecto . . . . .	76
5.1. Parámetros configurables del sistema FLUVI . . . . .	113
5.2. Campos del formulario de creación de calles . . . . .	122
5.3. Tipos de transiciones del autómata celular . . . . .	128
5.4. Relación entre la barra deslizante de velocidad y tiempo simulado . . . . .	129
5.5. Perfiles dinámicos de tráfico por hora del día . . . . .	129
6.1. Métricas promedio por día de la semana . . . . .	195
6.2. Resumen ejecutivo de pruebas realizadas . . . . .	231

# Capítulo 1

## 1.1. Introducción

La modelización y simulación de Sistemas Complejos ha sido un área de interés creciente en diversas disciplinas, desde la física y la biología hasta la economía y las ciencias sociales. En este contexto, los Autómatas Celulares han emergido como una herramienta poderosa para comprender y predecir el comportamiento de sistemas que exhiben patrones emergentes a partir de interacciones locales simples [3, 4].

El presente trabajo se enfoca en la aplicación de Autómatas Celulares a la simulación de tráfico vehicular, un sistema complejo por excelencia caracterizado por la interacción de múltiples agentes autónomos y la generación de patrones de congestión y flujo. Desde los primeros modelos de Autómatas Celulares aplicados al tráfico, como el icónico modelo desarrollado por el científico alemán Kai Nagel [5], esta metodología ha demostrado su capacidad para capturar la dinámica del tráfico y predecir su evolución bajo diferentes condiciones.

La simulación de sistemas complejos ha cobrado relevancia en diversas disciplinas. En este trabajo se explora el uso de autómatas celulares como herramienta para modelar el tráfico vehicular, tomando como base la regla ECA 184 de autómatas celulares propuesta por Wolfram[4] debido a su capacidad para capturar la dinámica del tráfico. Los simuladores permiten generar escenarios específicos y un análisis estadístico de los mismos.

Además de los trabajos seminales mencionados, esta investigación se basa en una revisión exhaustiva de la literatura reciente sobre Autómatas Celulares y su aplicación a la simulación de tráfico [6]. Se explorarán modelos avanzados que incorporan elementos como diferentes tipos de vehículos, intersecciones, semáforos y comportamiento de los conductores, con el objetivo de desarrollar un simulador de tráfico realista y flexible. La incorporación de estos elementos permitirá analizar el impacto de diferentes estrategias de gestión del tráfico y evaluar su efectividad en la reducción de la congestión y la mejora de la fluidez vehicular.

### 1.1.1. Organización del documento

Para dar inicio a este trabajo terminal, presentamos de manera breve la estructura de este reporte, con el objetivo de que el lector pueda tener un mejor entendimiento del trabajo.

## Capítulo 2. Marco Teórico

En esta parte del documento, se describen puntos esenciales de nuestro trabajo, como definiciones, técnicas, herramientas, servicios, así como investigación realizada para llevar a cabo la implementación dentro del trabajo.

## Capítulo 3. Análisis

En este capítulo se describe el estudio que se hizo para el análisis detallado del problema de tráfico en la zona cercana al IPN-ESCOM. Se detallan las razones y fundamentos de lo que conlleva la aglomeración de calles y se establecen los requerimientos y limitaciones del sistema. También se explica el fundamento detrás de FLUVI y del por qué se eligió método Scrumban como manera de manejar el proyecto.

## Capítulo 4. Diseño

En este capítulo, se detalla el diseño del simulador "FLUVI". Se especifican los componentes del sistema, la arquitectura, las interfaces de usuario y los algoritmos utilizados para la simulación del tráfico[cite: 174, 175, 176, 178, 179, 180, 181]. Se describen los diagramas de casos de uso y otros modelos que representan la interacción entre el usuario y el sistema.

## Capítulo 5. Desarrollo

En este capítulo, se describe el proceso de desarrollo del simulador "FLUVI". Se detallan las tecnologías y herramientas utilizadas, la implementación de los algoritmos de simulación y la construcción de la interfaz de usuario. Se presentan los resultados de las pruebas realizadas para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

## Capítulo 6. Conclusiones

En este capítulo, se presentan las conclusiones del trabajo realizado. Se resumen los logros alcanzados, se evalúa el cumplimiento de los objetivos planteados y se discuten las implicaciones de los resultados obtenidos.

## 1.2. Estado del arte

Actualmente se han desarrollado trabajos de investigación de tres sistemas con una funcionalidad similar a la propuesta en el presente Trabajo Terminal:

- Modelo realista para simulación de tráfico vehicular mixto con Autómatas Celulares [7].
- Modelo para el análisis del tráfico vehicular en convergencias mediante Autómatas Celulares [8].
- Un modelo de Autómatas Celulares para el tránsito vehicular en carreteras [9].

<b>Característica</b>	<b>Modelo realista para simulación de tráfico vehicular mixto con Autómatas Celulares [7]</b>	<b>Modelo para el análisis del tráfico vehicular en convergencias mediante Autómatas Celulares [8]</b>	<b>Un modelo de Autómatas Celulares para el tránsito vehicular en carreteras [9]</b>
<b>Enfoque de simulación</b>	Microscópico (modelado individual de vehículos).	Microscópico (modelado individual de vehículos).	Microscópico (modelado individual de vehículos). Aunque el título menciona carreteras, el modelo es microscópico, no macroscópico.
<b>Modos de transporte</b>	Vehículos en redes de tráfico mixto (autopistas y redes urbanas). Vehículos heterogéneos, incluyendo automóviles y camiones.	Tráfico en redes vehiculares, considerando rampas de acceso en autopistas con vehículos automotores convencionales. No menciona explícitamente vehículos conectados y automatizados (CAVs).	Vehículos en redes de tráfico mixto, incluyendo sistemas manuales, automatizados y mixtos. También se aborda la aplicación en autopistas (como México-Cuernavaca).
<b>Nivel de detalle de la red</b>	Alto (el modelo simula interacciones locales y dinámicas de cada vehículo de forma individual, con un enfoque en el comportamiento detallado de los conductores y vehículos).	Alto (el uso de Autómatas Celulares permite capturar dinámicas detalladas de vehículos y conductores individuales).	Medio (aunque es un modelo microscópico, simplifica ciertas características para mantener eficiencia computacional).
<b>Asignación de tráfico</b>	Basada en reglas de evolución simples derivadas de observaciones reales. Incluye cálculos de aceleración, frenado y distancias de seguimiento basados en parámetros observados y movimientos uniformemente acelerados.	Basada en reglas locales derivadas de Autómatas Celulares, que incluyen decisiones como cambios de carril y velocidades según el contexto del tráfico.	Basada en el modelo de Nagel-Schreckenberg, con modificaciones que incorporan un parámetro de anticipación para reflejar diferentes estrategias de conducción.
<b>Análisis de escenarios</b>	Capacidad para evaluar fenómenos como congestión espontánea, cambios de carril y la interacción entre vehículos de diferentes tipos (automóviles y camiones). Se enfoca en reproducir fenómenos reales observados en tráfico vehicular.	Permite evaluar estrategias de control en rampas de acceso, como semáforos de tiempo fijo y sin mecanismos de control.	Capaz de evaluar condiciones de tráfico como flujo libre, mixto y congestionado, además de fenómenos como congestión en casetas y transiciones entre estados.

<b>Característica</b>	<b>Modelo realista para simulación de tráfico vehicular mixto con Autómatas Celulares [7]</b>	<b>Modelo para el análisis del tráfico vehicular en convergencias mediante Autómatas Celulares [8]</b>	<b>Un modelo de Autómatas Celulares para el tránsito vehicular en carreteras [9]</b>
<b>Visualización</b>	Representaciones basadas en simulación computacional que muestran resultados como circuitos cerrados de un carril, condiciones de frontera abiertas, y escenarios multicarril.	Representaciones de rejillas donde cada celda representa el estado de un vehículo o una parte de la vía.	Representación en topología de anillo para simulaciones básicas y en segmentos para escenarios específicos (e.g., autopista México-Cuernavaca).
<b>Aplicaciones principales</b>	Diseño de estrategias para mejorar el desempeño del tráfico vehicular. Uso en la planeación y control de tráfico en México, donde estudios microscópicos son poco comunes.	Evaluar y mejorar el desempeño de estrategias de control de tráfico en rampas de acceso, evitando congestionamientos y accidentes.	Análisis de estrategias de conducción (manual, automatizada, mixta). Estudio del impacto de parámetros de anticipación en la seguridad vial. Identificación de problemas estructurales en carreteras (e.g., casetas de cobro).
<b>Facilidad de uso</b>	Aunque no se especifica directamente, los modelos basados en Autómatas Celulares se destacan por su simplicidad computacional y la facilidad para derivar parámetros intuitivos.	El modelo propuesto está diseñado para facilitar su implementación en simulaciones computacionales, gracias a las reglas claras y bien definidas de los Autómatas Celulares.	El modelo está diseñado para ser implementado en entornos computacionales eficientes debido a la simplicidad de los Autómatas Celulares. Esto permite realizar simulaciones rápidas, incluso con un gran número de vehículos y escenarios variados, como topologías de anillo o carreteras abiertas.
<b>Costo</b>	No está especificado explícitamente en el artículo, pero al ser un desarrollo académico, puede estar disponible bajo licencia abierta para investigación y desarrollo.	No está especificado explícitamente en el artículo, pero al ser un desarrollo académico, puede estar disponible bajo licencia abierta para investigación y desarrollo.	No está especificado explícitamente en el artículo, pero al ser un desarrollo académico, puede estar disponible bajo licencia abierta para investigación y desarrollo.

Tabla 1.1: Comparativa de trabajos de investigación similares a FLUVI

Actualmente, se encuentran 2 sistemas publicados en IEEE como artículos de investigación que tienen una funcionalidad similar a la propuesta del sistema FLUVI, que son:

- A Macroscopic Traffic Flow Model for Integrated Control of Freeway and Urban Traffic Networks[10].
- CAVSim[11].

Característica	A Macroscopic Traffic Flow Model for Integrated Control of Freeway and Urban Traffic Networks[10]	CAVSim[11]
<b>Enfoque de simulación</b>	Macroscópico (modelado del flujo de tráfico en grandes redes viales, tanto urbanas como de autopistas).	Microscópico (modelado individual de vehículos conectados y automatizados - CAVs).
<b>Modos de transporte</b>	Vehículos en redes de tráfico mixto (autopistas y redes urbanas).	Vehículos conectados y automatizados (CAVs).
<b>Nivel de detalle de la red</b>	Medio (modelo macroscópico que se enfoca en la densidad del tráfico, velocidad y Flujo Vehicular en segmentos de carretera).	Medio (modelado detallado de escenarios típicos de tráfico, incluyendo intersecciones sin semáforo y redes viales urbanas).
<b>Asignación de tráfico</b>	Basada en modelos macroscópicos como METANET para autopistas y un modelo extendido de Kashani para redes urbanas.	Basada en algoritmos de cooperación y planificación en modo de feed-forward (decisión anticipada).
<b>Análisis de escenarios</b>	Evaluación de medidas de control dinámico en redes viales mixtas (urbanas y autopistas).	Evaluación de estrategias de conducción cooperativa en intersecciones sin semáforo, zonas de incorporación y trenes de vehículos CAV.
<b>Visualización</b>	Representación gráfica de densidad del tráfico, velocidad y flujo en segmentos de red.	Visualización de trayectorias y comportamientos de los vehículos en diferentes escenarios.
<b>Aplicaciones principales</b>	Control predictivo del tráfico (MPC), coordinación entre redes urbanas y de autopistas, reducción de congestión, ramp metering y límites de velocidad variables.	Evaluación y comparación de métodos de decisión, planificación y control de vehículos CAV, análisis de estabilidad y eficiencia.
<b>Facilidad de uso</b>	Modelo integrado que permite simulación rápida y en tiempo virtual, adecuado para control en línea y aplicaciones de predicción.	Interfaces estándar para facilitar la incorporación de nuevas metodologías por investigadores.
<b>Costo</b>	No especificado explícitamente, puede estar disponible bajo licencia académica.	No especificado explícitamente, disponible bajo licencia abierta para investigación y desarrollo.

Tabla 1.2: Comparativa de sistemas en el mercado similares a FLUVI.



### 1.3. Problemática

La limitada disponibilidad de herramientas para el modelado del tráfico vehicular mediante autómatas celulares implica un considerable potencial inexplorado en este dominio. El enfoque basado en autómatas celulares es poco usual en la práctica a pesar de su capacidad para modelar la complejidad del tráfico eficientemente. Esta falta de herramientas obstaculiza el desarrollo de soluciones innovadoras para la gestión del tráfico, especialmente en entornos urbanos complejos como la Ciudad de México, la metrópoli con mayor congestión a nivel mundial.[12]

Si bien la gestión del tráfico en áreas urbanas densas, como las vialidades cercanas a la Escuela Superior de Cómputo (ESCOM) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), presenta desafíos significativos debido a la alta densidad vehicular y la constante interacción entre diferentes medios de transporte, la problemática central de este proyecto reside en la necesidad de mejorar las herramientas de modelado disponibles. La infraestructura vial en esta área debe soportar el flujo vehicular diario de estudiantes, docentes y personal administrativo, así como la circulación de transporte público y privado, lo que genera puntos críticos de congestión, especialmente en horarios pico. La Secretaría de Movilidad (SEMOVI) reconoce estos desafíos y la continua necesidad de optimizar la movilidad urbana en la Ciudad de México, a pesar de los esfuerzos realizados [13].

### 1.4. Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un simulador de tráfico vehicular denominado "FLUVI", aplicando Autómatas Celulares en una representación dinámica y discreta. Este simulador permitirá la generación de múltiples escenarios de flujo vehicular y la obtención de métricas estadísticas sobre el flujo y densidad en vialidades cercanas a áreas académicas del *IPN*, y proporcionará información sobre la aplicación de Autómatas Celulares en el tráfico vehicular en un circuito construido.

#### Objetivos específicos

- Desarrollar e implementar un simulador de tráfico vehicular aplicando la regla 184 de Autómatas Celulares.
- Desarrollar al menos 3 funcionalidades para tener la capacidad de generar diferentes escenarios al gusto del usuario mediante un gestor de escenarios y un constructor de mapas en el simulador. Las 3 funcionalidades serán el "Constructor de mapas", "Gestor de escenarios" y "Configuración de calles".
- Implementar una funcionalidad para mostrar la información de métricas y estadísticas en tiempo virtual e histórico para analizar diferentes escenarios y condiciones de tráfico con distintas densidades, flujos vehiculares, velocidad de células, entropía y distribuciones de probabilidad de densidad y flujo.
- Generar un manual de usuario que documente el funcionamiento del sistema y facilite el conocimiento sobre su uso. También se elaborará un reporte técnico que detalle el desarrollo e implementación del simulador.
- Construir el circuito aproximado de las vialidades cercanas al *IPN*-Escuela Superior de Cómputo (ESCOM), específicamente las vialidades:
  - Av. Juan de Dios Batiz →

- Av. Juan de Dios Batiz ←
- Calle Luis Enrique Erro →
- Calle Luis Enrique Erro ←
- Calle Miguel Anda y Barredo →
- Calle Miguel Anda y Barredo ←
- Calle Interior IPN →
- Calle Interior IPN ←
- Av. Wilfrido Massieu →
- Av. Wilfrido Massieu ←
- Av. IPN ←
- Av. Miguel Bernard →
- Av. Cien Metros ←
- Av. Miguel Othon de Mendizabal →
- Calle M. Luisa Estampa Ort. →
- Calle M. Luisa Estampa Ort. ←

## 1.5. Justificación

La gestión del Flujo Vehicular en áreas cercanas a instituciones académicas como ESCOM es un desafío constante debido a la alta concentración de vehículos durante ciertas horas del día. La Congestión Vehicular no solo afecta la movilidad y la eficiencia del transporte, sino que también puede tener impactos negativos en la calidad del aire y la seguridad vial. El desarrollo de un simulador de gestión del Flujo Vehicular, denominado “**FLUVI**”, es relevante porque permitirá la observación y análisis detallado del tráfico actual, identificando cuellos de botella, zonas de congestión y patrones de circulación. Esto proporcionará datos esenciales para proponer y evaluar soluciones antes de su implementación, evitando costos y riesgos asociados con cambios no probados. Además, el simulador permitirá evaluar diferentes escenarios, como el rediseño de la distribución de los espacios de estacionamiento y el cambio de sentido de calles, lo que puede resultar en una mejora significativa en la capacidad y eficiencia del estacionamiento. Estos análisis preliminares son cruciales para tomar decisiones informadas y efectivas. A largo plazo, la implementación de este tipo de herramientas de simulación puede escalar para beneficiar no solo a la comunidad de IPN-Zacatenco, sino también a otras áreas urbanas, contribuyendo a una mejor planificación y gestión del tráfico en toda la ciudad. Este proyecto tiene el potencial de ser un primer paso hacia soluciones más amplias que mejoren la infraestructura vial y la calidad de vida en México.

## 1.6. Solución Propuesta

Nuestra solución es un simulador de tráfico basado en Autómatas Celulares, diseñado para modelar y analizar el comportamiento del tráfico en las avenidas y calles del Instituto Politécnico Nacional (IPN) [14]. El simulador utiliza un enfoque discreto y dinámico, donde cada calle se representa como un arreglo unidimensional, y cada vehículo se modela como un “1” en el arreglo, mientras que los espacios vacíos se representan como “0”[15]. A continuación, se detalla el funcionamiento y los componentes clave de nuestra solución.

## 1.7. Alcance del proyecto

En un entorno cada vez más congestionado, la optimización del Flujo Vehicular se vuelve crucial para la eficiencia del transporte y la calidad de vida. Sin embargo, la planificación urbana se enfrenta a la problemática de predecir y mitigar el impacto de las modificaciones viales en el tráfico. Los métodos tradicionales de análisis, basados en observaciones en terreno y modelos estáticos, suelen ser costosos, lentos e incapaces de capturar la dinámica compleja del tráfico.

La problemática a solucionar radica en la necesidad de una herramienta que permita simular y analizar el Flujo Vehicular. Actualmente, la evaluación de cambios en la red vial, como la implementación de nuevas rutas o la modificación de sentidos de circulación, se basa en estimaciones que no siempre reflejan la realidad, lo que puede resultar en decisiones ineficaces e incluso contraproducentes. Imaginemos, por ejemplo, que se decide cambiar el sentido de una calle para mejorar la fluidez del tráfico, pero sin una simulación previa, esta modificación podría generar un nuevo punto de congestión en una intersección cercana.

Por lo cual, el objetivo de este proyecto es desarrollar un simulador de tráfico vehicular denominado "FLUVI", aplicando Autómatas Celulares en una representación dinámica y discreta. Este simulador permitirá la generación de múltiples escenarios de flujo vehicular y la obtención de métricas estadísticas sobre el flujo y densidad en vialidades cercanas a áreas académicas del IPN, y proporcionar información sobre la aplicación de Autómatas Celulares en el tráfico vehicular. "FLUVI" permitirá a los usuarios:

- Visualizar el flujo de tráfico: Observar la dinámica del tráfico en tiempo virtual de la simulación bajo diferentes condiciones estocásticas.
- Analizar el impacto de modificaciones viales: Evaluar el efecto de cambios en la red vial, como el agregar/eliminar calles, así como la configuración de diferentes escenarios que podrá construir el usuario según su referencia visual en el simulador.
- Identificar puntos críticos de la simulación: Detectar mediante una gráfica de calor los tiempos (día/hora) de alta/baja densidad durante la simulación.

Si bien el alcance inicial del proyecto se centra en las áreas cercanas al IPN-ESCOM, "FLUVI" tiene el potencial de ser escalado y adaptado a otras zonas urbanas, contribuyendo a una mejor planificación y gestión del tráfico en IPN-ESCOM. A través de la simulación y el análisis, se espera que facilite o complemente la toma de decisiones informadas para mejorar la movilidad urbana y proporcionar una herramienta para analizar la congestión del Flujo Vehicular.

## 1.8. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo terminal se utilizará la metodología ágil Scrumban, que combina elementos de las metodologías Scrum y Kanban. Esta elección se debe a que Scrumban es un proceso de gestión que reduce la complejidad en el desarrollo de productos, satisfaciendo las necesidades de los clientes de manera eficiente y colaborativa. Scrumban permite a los equipos trabajar de manera ágil, combinando la estructura y agilidad de Scrum con la eficiencia y simplicidad de Lean, sin requerir actualizaciones de roles y siendo más sencillo de adoptar.

	SCRUMBAN	KANBAN	SCRUM
<b>Procesos</b>	Iterativo e incremental de forma continua desarrollando iteraciones	Continuo con enfoque en la eliminación de desperdicios y mejora continua	Iterativo e incremental desarrollando sprints
<b>Personas</b>	Equipo motivado con personas como pilar y en el centro	Las personas son el pilar y se empodera a los equipos para tomar decisiones	Las personas son el centro
<b>Producto</b>	Balance entre efectividad y eficiencia	Foco en la eficiencia, entrega rápida de valor y eliminación de desperdicios	Foco en la efectividad
<b>Organización</b>	Mejora continua del producto y del proceso	Mejora continua del proceso y del flujo de trabajo	Mejora continua del producto
<b>Equipo</b>	El equipo no requiere de un número específico de integrantes	No hay limitaciones específicas en el tamaño del equipo	De 3 a 9 personas
<b>Roles</b>	SCRUM master (opcional), Product owner, SCRUM team	Pueden incluir especialistas o integrantes generalizados	SCRUM master, Product owner, SCRUM team

Tabla 1.3: Comparación de metodologías ágiles.

Scrumban utiliza iteraciones y se monitorea con la ayuda de un tablero visual. Las reuniones para planificar se llevan a cabo cuando son necesarias para determinar las tareas a implementar hasta la próxima iteración. Para que estas iteraciones se mantengan cortas, se utiliza un límite de trabajo en progreso (por sus siglas en inglés Work in Progress). Cuando cae por debajo del nivel predeterminado, se establece un activador de planificación bajo demanda para que el equipo sepa cuándo planificar a continuación.

- **Iteración:** En Scrumban, las iteraciones son cortas para garantizar que el equipo pueda adaptarse al entorno cambiante durante el proyecto. La duración de estas iteraciones en este proyecto se medirán como máximo en lapsos de dos semanas.
- **Priorización:** La priorización se da de tal forma que las tareas más importantes se colocan en la parte superior de la tabla de planificación seguidas por las tareas menos importantes. Antes de llegar al tablero, las tareas deben pasar por 3 etapas donde se van depurando las tareas a realizar para largo plazo (1 año), medio plazo (6 meses) y corto plazo (3 meses), siendo de esta última de donde salen las tareas más claras que se pueden completar y que ganan mayor prioridad para la próxima iteración.
- **Principio de Elección:** Cada miembro del equipo elige solo qué tarea de la sección “Tareas Pendientes” va a completar a continuación.
- **Congelación de Funciones:** Se utiliza en Scrumban cuando se acerca la fecha límite del proyecto, significando que solo pueden trabajar sobre las tareas previamente pensadas sin cabida para implementar nuevas características.
- **Triaje:** Ocurre después de la congelación de funciones, y es el punto donde el gerente del proyecto decide cuáles de las características en desarrollo se completarán y cuáles quedarán sin terminar.

### 1.8.1. Implementación

### 1.8.2. Iteraciones

Dado lo anterior, se decidió usar **Scrumban** como metodología y se pretenden desarrollar en total 8 iteraciones:

#### Trabajo Terminal 1

##### ■ Iteración 1:

- Desarrollo de documentación.
- Investigación:Autómatas Celulares.
- Elaboración del estado del arte.
- Generación de Reporte Técnico.

##### ■ Iteración 2:

- Definición de objetivos, alcance y requerimientos.
- Formulación de la solución.
- Selección de las tecnologías y herramientas a utilizar para el desarrollo del prototipo del sistema.
- Desarrollo de Reporte Técnico.
- Diseño de la arquitectura del sistema.

##### ■ Iteración 3:

- Análisis de la factibilidad del proyecto.
- Análisis y selección de los entornos de trabajo y evaluación de costes.
- Desarrollo de Reporte Técnico.

##### ■ Iteración 4:

- Desarrollo de casos de uso y especificación de requisitos funcionales.
- Desarrollo de un prototipo básico del simulador.
- Desarrollo de Reporte Técnico.
- Evaluación de TT 1.

#### Trabajo Terminal 2

##### ■ Iteración 6:

- Desarrollo de la interfaz de usuario.
- Desarrollo de algoritmos para la generación de escenarios de tráfico realistas y diversos.
- Implementación de métricas y estadísticas para evaluar el rendimiento del tráfico.
- Desarrollo de Reporte Técnico.

##### ■ Iteración 7:

- Ejecución de pruebas unitarias de las implementaciones desarrolladas.
- Desarrollo de Manual de Usuario y Reporte Técnico.
- Despliegue del sistema.
- Evaluación de TT 2.

# Capítulo 2

## 2.1. Marco Teórico

### 2.1.1. Modelado Matemático de Sistemas de Tráfico

Los modelos para tránsito vehicular basados en AC han llegado a ser un método bien establecido para modelar, analizar, entender e incluso para pronosticar el desempeño del tránsito vehicular real [16, 17, 18, 19]. Su característica principal, la cual los hace muy atractivos para la simulación del tráfico vehicular es que se basan en reglas locales, lo que permite tomar en cuenta en la modelación aspectos complejos del comportamiento tanto de los vehículos como de los conductores, de una manera natural y eficiente [7]

A continuación se describen modelos matemáticos usados en sistemas de tráfico, como lo es el Nagel-Schreckenberg y Sistemas Dinámicos Discretos siendo este último el adoptado en el desarrollo de FLUVI.

#### Modelado matemático Nagel-Schreckenberg

El modelo de Nagel-Schreckenberg (Nagel-Schreckenberg) es uno de los enfoques más representativos del uso de Autómatas Celulares en la simulación del Flujo Vehicular. Propuesto por Kai Nagel y Michael Schreckenberg en 1992, este modelo discreto combina principios de la física estadística con reglas simples de actualización para representar el comportamiento dinámico del tráfico en autopistas unidireccionales [5]. Cada vehículo se modela como una partícula que ocupa una celda en una retícula unidimensional, y su dinámica se rige por reglas estocásticas que consideran factores como la velocidad deseada, la distancia al vehículo precedente y una probabilidad de desaceleración aleatoria, lo que introduce efectos de congestión espontánea y transiciones de fase en el Flujo Vehicular.

Este enfoque forma parte de una línea de investigación más amplia que aplica métodos de la física estadística al análisis del tráfico y otros sistemas fuera del equilibrio [19, 6, 18]. El modelo Nagel-Schreckenberg ha demostrado ser capaz de reproducir fenómenos reales como el "stop-and-go" y los embotellamientos sin necesidad de introducir reglas de conducción complejas, lo que lo convierte en una herramienta poderosa para la comprensión del comportamiento emergente en sistemas de transporte [6, 18].

Además, este modelo ha servido de base para extensiones que incorporan aspectos adicionales como carriles múltiples, vehículos heterogéneos, y reglas de adelantamiento, enriqueciendo aún más su aplicabilidad en estudios de tráfico [7]. Su simplicidad estructural y su capacidad para modelar fenómenos no triviales también lo hacen relevante en el contexto más general del estudio de Sistemas Complejos [19, 5]

#### Definición del modelo Nagel-Schreckenberg

El modelo de Nagel-Schreckenberg (Nagel-Schreckenberg) es un modelo discreto basado en Autómatas Celulares que describe el Flujo Vehicular en autopistas unidireccionales. A nivel matemático, el modelo utiliza una retícula unidimensional de celdas donde cada vehículo ocupa una celda y se mueve a lo largo de esta red. El modelo se basa en la simulación del movimiento de los vehículos mediante reglas simples y estocásticas, que permiten representar de manera eficiente los fenómenos emergentes del tráfico, como el embotellamiento y el comportamiento de "stop-and-go".

La dinámica de cada vehículo está regida por las siguientes reglas fundamentales:

- **Movimiento de los vehículos:** Cada vehículo en el modelo tiene una velocidad deseada  $v_{\text{des}}$ , que está limitada por la distancia al vehículo de adelante  $d_i$ . La velocidad de cada vehículo  $v_i$  está determinada por la ecuación [5]:

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t) + 1, v_{\text{des}}, d_i)$$

Aquí,  $v_i(t)$  es la velocidad del vehículo  $i$  en el tiempo  $t$ , y  $d_i$  es la distancia a la celda ocupada por el vehículo de adelante.

- **Desaceleración estocástica:** Para simular el comportamiento de congestión y el fenómeno de "stop-and-go", el modelo introduce una probabilidad de desaceleración aleatoria. Esta probabilidad es determinada por un valor  $p$  y se aplica con una probabilidad  $p$  para disminuir la velocidad del vehículo a [5]

$$v_i(t+1) = \max(v_i(t) - 1, 0)$$

en cada paso de tiempo.

- **Condiciones de actualización:** La actualización del modelo se lleva a cabo de forma simultánea para todos los vehículos en la red. Después de que se actualiza la velocidad de cada vehículo, los vehículos avanzan en la retícula unitaria de acuerdo con su velocidad calculada en el paso anterior.

El modelo NaSch ha sido ampliamente utilizado para estudiar fenómenos emergentes en sistemas de tráfico sin necesidad de introducir reglas de conducción complejas. Ha demostrado ser efectivo para replicar el comportamiento observado en las autopistas, como la propagación de las ondas de congestión y los patrones de "stop-and-go"[5], que surgen de la interacción de vehículos que siguen estas reglas simples pero eficaces.

A través de la dinámica estocástica de la desaceleración, el modelo no solo reproduce patrones de tráfico, sino que también modela transiciones de fase en el Flujo Vehicular, desde condiciones libres de congestión hasta situaciones de embotellamientos, en función de los parámetros del sistema como la densidad de tráfico y la probabilidad de desaceleración [17].

El modelo de Nagel-Schreckenberg es fundamental en el estudio de los sistemas de tráfico, ya que ofrece una descripción matemática simple pero poderosa de los fenómenos complejos que surgen de las interacciones de los vehículos en una autopista, proporcionando una base teórica para la investigación en modelos más avanzados de Flujo Vehicular [18].

Además, las extensiones del modelo NaSch, como la incorporación de carriles múltiples o vehículos heterogéneos, siguen siendo objeto de estudio y ampliación, lo que permite que el modelo se adapte a diversas configuraciones y situaciones reales de tráfico [7].

### 2.1.2. Sistemas Dinámicos Discretos

Un sistema dinámico discreto es un modelo matemático que describe la evolución de un estado en el tiempo a través de un conjunto de reglas determinísticas o estocásticas aplicadas en pasos de tiempo discretos. Estos sistemas son particularmente útiles para modelar fenómenos que evolucionan en el tiempo de manera secuencial y pueden ser representados mediante Autómatas Celulares, como en el caso del modelo Nagel-Schreckenberg [5], que describe el Flujo Vehicular en una autopista.

Matemáticamente, un sistema dinámico discreto se describe por una función de transición  $f$  que actualiza el estado del sistema en función de su estado actual y, posiblemente, de algún parámetro de control. Si denotamos por  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  el estado del sistema en el tiempo  $t$ , el sistema evolucionará de acuerdo con la siguiente ecuación de recurrencia [3]:

$$x(t+1) = f(x(t), u(t))$$

donde  $u(t)$  es un vector de control que puede influir en la evolución del sistema, y  $f$  es una función que determina cómo el estado cambia de un paso de tiempo al siguiente. Esta ecuación describe cómo un sistema de  $n$  dimensiones avanza a través de sus estados a medida que el tiempo se desplaza de  $t$  a  $t+1$ .

En el caso específico de los modelos basados en Autómatas Celulares, como el modelo NaSch, la función  $f$  puede ser representada como un conjunto de reglas locales que describen cómo cada celda (que puede representar un vehículo, por ejemplo) actualiza su estado en función de su propio estado y el de sus vecinos inmediatos. Esto introduce un componente estocástico en el modelo, especialmente cuando se considera la desaceleración aleatoria, lo cual refleja el comportamiento de congestión o de "stop-and-go"[17].

## Evolución Estocástica y Determinística

En un sistema dinámico discreto, la evolución puede ser tanto determinista como estocástica. Los sistemas deterministas siguen reglas precisas y previsibles en cada paso de tiempo. Un ejemplo de ello es el modelo de Nagel-Schreckenberg, donde la evolución del estado de cada vehículo está determinada completamente por su velocidad y la distancia a los vehículos adelante, sin ningún tipo de azar involucrado en la transición de un estado a otro en las reglas fundamentales [5]. Por otro lado, los sistemas estocásticos incorporan probabilidades en sus transiciones de estado, como es el caso de la desaceleración aleatoria en el modelo NaSch, donde se aplica una probabilidad  $p$  de disminuir la velocidad del vehículo con un valor aleatorio entre 0 y 1 [17].

Para representar esta estocasticidad, podemos definir la función de transición de un sistema estocástico como [3]:

$$x(t+1) = f(x(t)) + \epsilon(t)$$

donde  $\epsilon(t)$  es un término aleatorio que representa las fluctuaciones en el sistema. Este término puede ser, por ejemplo, una variable aleatoria que influye en el valor del estado del sistema de manera impredecible, lo que introduce la incertidumbre característica de los sistemas estocásticos.

## Aplicaciones y Estudio de Fenómenos Emergentes

Los sistemas dinámicos discretos, especialmente aquellos que involucran interacciones locales entre los elementos de un sistema, como los Autómatas Celulares, son fundamentales para estudiar fenómenos emergentes. En particular, el modelo NaSch ha sido clave para replicar el comportamiento observado en el tráfico vehicular, como la propagación de ondas de congestión y patrones de "stop-and-go"[5]. Estos fenómenos emergen de las interacciones locales entre los vehículos que siguen reglas simples pero efectivas, lo que hace que el sistema global sea mucho más complejo que la suma de las partes.

Matemáticamente, los sistemas dinámicos discretos permiten estudiar estos fenómenos mediante la simulación de la evolución del sistema bajo diferentes condiciones y parámetros. En el caso del tráfico vehicular, la densidad de vehículos, la probabilidad de desaceleración y la velocidad máxima de los vehículos son algunos de los parámetros clave que influyen en el comportamiento emergente del sistema [18].



A través de simulaciones basadas en Autómatas Celulares, se ha observado que pequeñas modificaciones en las condiciones locales del sistema, como una ligera reducción en la velocidad de algunos vehículos o un pequeño cambio en la distancia entre ellos, pueden provocar grandes cambios en el comportamiento global, como la aparición de congestiones o el flujo libre de tráfico. Estos resultados subrayan la importancia de los sistemas dinámicos discretos para modelar y comprender fenómenos complejos en áreas como la teoría del tráfico, la biología y la economía.

## Extensiones y Mejoras en los Modelos de Tráfico

Además de la versión básica del modelo NaSch, existen diversas extensiones que permiten estudiar escenarios más complejos. Por ejemplo, se han incorporado carriles múltiples o vehículos heterogéneos para modelar situaciones más realistas en las autopistas [7]. Estas mejoras permiten representar de manera más precisa la dinámica del tráfico en condiciones reales, como la presencia de vehículos de diferentes tamaños, velocidades y comportamientos, y la interacción entre ellos en un entorno de múltiples carriles.

El estudio de estos sistemas dinámicos extendidos ha permitido un mejor entendimiento de cómo se producen fenómenos como la formación de atascos en autopistas y cómo se pueden mitigar utilizando estrategias de control o infraestructuras mejoradas.

### 2.1.3. Sistemas Complejos

Un sistema complejo es un tipo de sistema que está compuesto por múltiples elementos interrelacionados, cuya interacción local da lugar a comportamientos emergentes de las propiedades individuales de los elementos que conforman al sistema global [7, 18]. Los Sistemas Complejos son una parte fundamental de la teoría de sistemas dinámicos, ya que sus comportamientos pueden ser tanto deterministas como estocásticos, y en muchos casos, son sensibles a las condiciones iniciales y presentan propiedades no lineales [17].

Matemáticamente, un sistema complejo puede ser modelado utilizando ecuaciones que describen la evolución del estado del sistema en el tiempo. Estos sistemas son típicamente representados por un conjunto de ecuaciones diferenciales o de recurrencia, dependiendo de si son continuos o discretos. Sin embargo, cuando el sistema está compuesto por una red de agentes o elementos interconectados localmente, como en el caso de los Autómatas Celulares, la representación matemática se puede simplificar a través de una función de transición que describe cómo cambia el estado de cada elemento a lo largo del tiempo [7].

## Emergencia en Sistemas Complejos

La característica más distintiva de los Sistemas Complejos es la emergencia, que es el fenómeno mediante el cual el comportamiento global del sistema surge de las interacciones locales entre sus componentes. Este fenómeno puede ser descrito mediante modelos matemáticos basados en reglas locales que, aunque simples en su formulación, generan patrones globales complejos. Un ejemplo clásico de esto es el modelo de Nagel-Schreckenberg (NaSch), que simula el tráfico vehicular en autopistas. Aunque cada vehículo sigue una regla simple de movimiento y desaceleración estocástica, el sistema global exhibe patrones emergentes de congestión, como las ondas de tráfico y el comportamiento de "stop-and-go" [5], [17].

Matemáticamente, la emergencia puede ser modelada como la aparición de estructuras o patrones en el sistema que no estaban presentes en los componentes individuales. Si denotamos el estado global del sistema como  $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ , donde  $x_i(t)$  es el estado del  $i$ -ésimo componente del sistema en el tiempo  $t$ , la dinámica de un sistema complejo puede ser representada mediante una ecuación de recurrencia que describe la interacción de los elementos a lo largo del tiempo. La forma general de esta ecuación es [3]:

$$X(t+1) = f(X(t), u(t))$$

donde  $f$  es una función que depende tanto del estado del sistema como de los controles externos  $u(t)$ , y el comportamiento emergente surge de las interacciones entre los  $x_i(t)$ .

## Interacciones Locales y Efectos Globales

Uno de los aspectos más importantes de los Sistemas Complejos es la forma en que las interacciones locales entre los componentes del sistema pueden generar efectos globales significativos. En sistemas como el tráfico vehicular, las interacciones entre vehículos individuales, a través de reglas locales simples, pueden dar lugar a congestiones que afectan a todo el sistema. Esto es un claro ejemplo de cómo las interacciones locales pueden ser responsables de la aparición de patrones a gran escala.

La propagación de estos efectos globales puede ser modelada a través de ecuaciones de difusión o propagación de ondas. En el caso de los modelos de tráfico como el NaSch, las ondas de congestión pueden ser modeladas mediante ecuaciones de tipo de onda, en las que las variaciones en la densidad de vehículos en una región de la autopista se propagan hacia otras regiones en función de las reglas locales de movimiento y desaceleración [17]. En términos matemáticos, este tipo de propagación se puede representar mediante ecuaciones diferenciales parciales (PDEs) que describen cómo la densidad de vehículos,  $d(x, t)$ , cambia en el tiempo y el espacio [3]:

$$\frac{\partial d(x, t)}{\partial t} = -v(d(x, t)) \frac{\partial d(x, t)}{\partial x}$$

donde  $v(d(x, t))$  es la velocidad dependiente de la densidad de vehículos en el punto  $x$  en el tiempo  $t$ , y describe cómo las interacciones locales afectan a la propagación de las ondas de congestión a lo largo de la autopista.

## Redes y Conectividad en Sistemas Complejos

Los Sistemas Complejos suelen involucrar redes de interacciones entre sus componentes. La topología de estas redes juega un papel crucial en la dinámica global del sistema. En el contexto del tráfico vehicular, la topología de la red (representada por la conexión de vehículos o carriles) puede influir en el comportamiento emergente del sistema. Por ejemplo, la existencia de cuellos de botella o cambios en la estructura de la red puede provocar efectos no lineales en el Flujo Vehicular, lo que lleva a la aparición de congestiones o flujos no óptimos [18, 7].

En matemáticas, las redes pueden ser representadas como grafos, donde los nodos representan los componentes del sistema (como los vehículos) y los bordes representan las interacciones entre ellos (como la proximidad en la carretera). Los modelos de redes complejas utilizan la teoría de grafos para estudiar cómo la conectividad de los componentes influye en el comportamiento global del sistema. Las ecuaciones que describen la dinámica de una red de interacciones se basan en matrices de adyacencia que representan las conexiones entre los nodos, y el comportamiento global del sistema se puede modelar mediante sistemas de ecuaciones diferenciales que tienen en cuenta las interacciones entre los nodos de la red [18].

Los Sistemas Complejos son una clase de sistemas que presentan comportamientos emergentes derivados de interacciones locales entre sus componentes. El estudio de estos sistemas ha sido fundamental en áreas como la teoría del tráfico, la biología, y la física, donde se observa que incluso reglas simples pueden generar patrones complejos a gran escala. Modelos como el de Nagel-Schreckenberg han demostrado ser útiles para entender los fenómenos emergentes en sistemas dinámicos discretos, como las congestiones en el tráfico vehicular. A través de la teoría de redes y las ecuaciones de propagación, es posible modelar y comprender cómo las interacciones locales pueden dar lugar a efectos globales significativos en Sistemas Complejos [18], [7].

#### 2.1.4. Autómatas Celulares

Un autómatas celular (CA) es una versión idealizada de un sistema complejo, pero tiene una estructura distinta [3]. Se pueden definir como un modelo matemático y computacional usados para sistemas dinámicos que evolucionan en pasos discretos. Los CA tienen un conjunto de unidades dispuestas en un espacio, las cuales representan estados. Estos estados cambiarán en el tiempo al aplicarles una regla de transformación, checando el estado de cada celda y el de sus vecinos, lo que define el nuevo estado de cada celda. Este comportamiento permite crear lo que es la Vida Artificial y emular varias propiedades de sistemas biológicos[4].

Los Autómatas Celulares pueden ser distintos en el número de estados y de dimensiones que tengan. Por ejemplo, los Autómatas Celulares Elementales (ECA) son de una dimensión y únicamente pueden tener dos estados (ceros y unos), lo que los hace los Autómatas Celulares más pequeños en cuestión de dimensiones y estados. Por otro lado, uno de los Autómatas Celulares más conocidos es The Game of Life, hecho por John Conway en 1970. Este autómatas celular también tiene únicamente dos estados, pero es de dos dimensiones y funciona de una manera distinta, donde en vez de checar cada regla posible como son las Reglas Totales, se usan Reglas Basadas en Patrones, haciendo una cuenta de los vecinos sin importar sus posiciones y, si bien se podría definir una regla para cada configuración de vecinos, es más fácil definiéndolo con Reglas Basadas en Patrones. En el caso del Juego de la Vida, su regla es B3S23 indicando que si hay 3 celdas vivas alrededor de la que se esté checando (B3), nacerá una celda nueva en caso de estar muerta actualmente y, que las celdas vivas solo sobreviven si hay 2 o 3 celdas vivas alrededor de ellas (S23), siendo que cualquier otra cantidad indica que no nacerá y/o morirá una celda.

Los CA tienen las siguientes características:

- Evolucionan de manera discreta en el tiempo (generaciones).
- Las reglas se aplican simultáneamente a todas las celdas. Esto permite que puedan ser paralelizadas.
- A partir de reglas simples pueden surgir patrones y comportamientos complejos.

Varios problemas pueden ser analizados con el uso de CA, como lo pueden ser la simulación de sistemas naturales como la propagación de incendios, hongos, hidrodinámica, así como el comportamiento de colonias de hormigas. También se les puede dar usos más complejos como en el Juego de la Vida se han investigado varios patrones con los que se puede emular la computación misma. Como último ejemplo, los CA pueden ser usados en el campo de criptografía para el diseño de algoritmos de cifrado.

En este proyecto se usará el ECA 184 para simular el comportamiento del flujo vial. Dada la siguiente tabla e ilustración, podemos definir la regla (Un cuadro rojo o un “1” representa un carro y un cuadro negro o un “0” representa un espacio vacío) [4]:

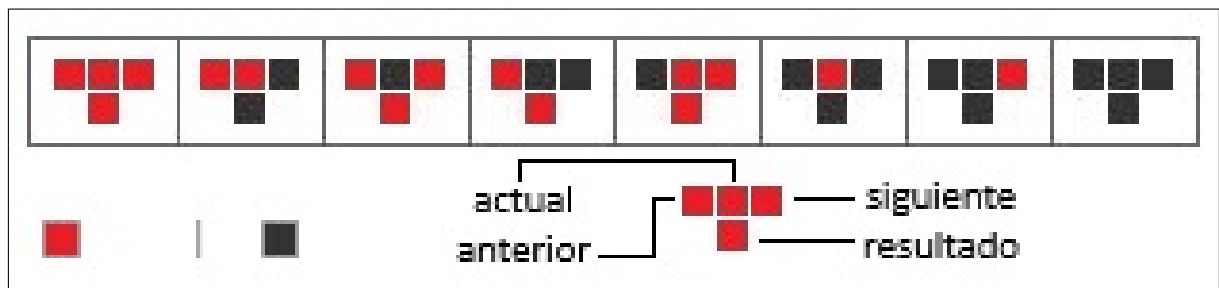


Figura 2.1: Figura ECA 184

Celda 1 (anterior)	Celda 2 (actual)	Celda 3 (siguiente)	Resultado	Interpretación de celda actual (Celda 2)
1	1	1	1	El carro no puede avanzar
1	1	0	0	El carro puede avanzar
1	0	1	1	Llega un carro
1	0	0	1	Llega un carro
0	1	1	1	El carro no puede avanzar
0	1	0	0	El carro puede avanzar
0	0	1	0	No hay ningún carro
0	0	0	0	No hay ningún carro

Tabla 2.1: Tabla Regla ECA 184.

### 2.1.5. Sistemas de gestión de tráfico

Los sistemas de gestión de tráfico (SGT) son conjuntos de tecnologías y estrategias que buscan monitorear, controlar y optimizar el Flujo Vehicular en una red de transporte. Estos sistemas utilizan información en tiempo virtual sobre las condiciones del tráfico, como la velocidad, el volumen y la densidad de vehículos, para ajustar la operación de semáforos, señalización variable, rampas de acceso y otros elementos de control. El objetivo principal de los SGT es mejorar la eficiencia del sistema de transporte, reducir la congestión, minimizar los tiempos de viaje y aumentar la seguridad vial. Los SGT modernos incorporan una variedad de tecnologías, incluyendo sensores de tráfico, cámaras de vigilancia, sistemas de comunicación, sistemas de información geográfica (SIG) y algoritmos de control. Los sensores de tráfico recopilan datos sobre el Flujo Vehicular, que se transmiten a un centro de control donde se procesan y analizan. Los algoritmos de control utilizan esta información para ajustar la operación de los semáforos y otros dispositivos de control en tiempo virtual, adaptándose a las condiciones cambiantes del tráfico. Los SGT pueden tener un impacto significativo en la movilidad urbana, reduciendo la congestión, los tiempos de viaje y las emisiones contaminantes. Además, pueden contribuir a mejorar la seguridad vial, al proporcionar información en tiempo virtual sobre las condiciones del tráfico y alertar a los conductores sobre posibles peligros. Los SGT son una herramienta esencial para la gestión del tráfico en las ciudades modernas, y su desarrollo e implementación son cruciales para crear sistemas de transporte más eficientes, sostenibles y seguros.

### 2.1.6. Tipos de sistemas de gestión de tráfico

Los sistemas de gestión de tráfico se pueden clasificar en cuatro tipos, según su función principal y la tecnología que utilizan [20].

- **Sistemas de control de tráfico:** Estos sistemas se usan para regular el Flujo Vehicular en tiempo virtual con el propósito de optimizar la circulación y reducir la congestión. Algunos ejemplos son Sistemas de semaforización inteligente, Sistemas de gestión de carriles y Sistemas de información al usuario.
- **Sistemas de monitorización del tráfico:** Estos sistemas se usan para obtener y analizar datos sobre el tráfico para analizar su comportamiento y detectar problemas. Algunos ejemplos son Sensores de tráfico y Sistemas de análisis de datos.
- **Sistemas de gestión de accidentes:** Estos sistemas se encargan de detectar incidentes que puedan afectar al tráfico y gestionarlos. Algunos ejemplos son Sistemas de detección automática de incidentes y Sistemas de gestión de desvíos.

- Sistemas de tarificación vial: Estos sistemas se encargan de cobrar a los conductores por el uso de determinadas vías. Algunos ejemplos son Sistemas de telepeaje y Sistemas de tarificación por congestión.

### 2.1.1.7. Sistemas Inteligentes de Transporte ITS

Los Sistemas Inteligentes de Transporte ITS son tecnologías avanzadas que integran sensores, algoritmos y telecomunicaciones para mejorar la gestión de tráfico. Su implementación en ciudades permite la optimización del Flujo Vehicular, la reducción de congestión y la mejora en la movilidad mediante la implementación de algoritmos avanzados y análisis de datos en tiempo virtual [3].

Dentro de los ITS, se incluyen diversas soluciones como la gestión dinámica de semáforos, sistemas de detección de congestión, control de velocidad basado en inteligencia artificial y la simulación del Flujo Vehicular con modelos matemáticos avanzados. La combinación de estas tecnologías permite mejorar la fluidez del tráfico y reducir el impacto ambiental derivado de tiempos de espera prolongados y frenado constante [6].

El uso de Autómatas Celulares ha sido una herramienta clave dentro de los ITS para representar la dinámica del tráfico. Este enfoque ha sido ampliamente estudiado y aplicado en la simulación de autopistas y entornos urbanos, demostrando su capacidad para reproducir fenómenos de congestión y su resolución mediante estrategias de control eficientes [5]. Nagel y Schreckenberg propusieron un modelo de tráfico vehicular que ha sido referencia en múltiples estudios debido a su capacidad de modelar el comportamiento de los conductores de manera realista [6]. El simulador FLUVI aprovechará las capacidades de los ITS para evaluar el tráfico en áreas cercanas al IPN-ESCOM. Mediante la simulación de escenarios viales y la integración de datos en tiempo virtual, se podrán probar estrategias de mitigación de congestión y analizar su impacto en la movilidad urbana. Además, la implementación de algoritmos de optimización permitirá encontrar configuraciones óptimas para mejorar la circulación y reducir tiempos de viaje [21].

El impacto de los ITS no solo se limita a la mejora del tráfico, sino que también tiene efectos positivos en la sostenibilidad. La reducción del consumo de combustible y la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> han sido objetivos clave en el desarrollo de tecnologías de transporte inteligentes. Se ha demostrado que una sincronización semafórica eficiente puede reducir el consumo de combustible hasta en un 15 por ciento, contribuyendo así a la disminución de la contaminación ambiental [22].

### 2.1.1.8. Simulación de tráfico vehicular

La simulación de tráfico vehicular es una herramienta fundamental en la planificación y gestión del transporte, que permite modelar y analizar el comportamiento del tráfico en diferentes escenarios. A través de la simulación, es posible recrear virtualmente las condiciones del tráfico, incluyendo la interacción de vehículos, peatones, semáforos y otros elementos de la infraestructura vial. Esto permite a los investigadores, planificadores y autoridades de tráfico comprender mejor el funcionamiento del sistema de transporte, identificar problemas y evaluar el impacto de diferentes estrategias de gestión del tráfico. Los simuladores de tráfico utilizan modelos matemáticos y algoritmos para representar el comportamiento de los vehículos y su interacción con el entorno. Estos modelos pueden ser macroscópicos, mesoscópicos o microscópicos, dependiendo del nivel de detalle que se requiera. Los modelos macroscópicos representan el tráfico como un flujo continuo, mientras que los modelos microscópicos simulan el movimiento individual de cada vehículo. Los modelos mesoscópicos se sitúan en un punto intermedio, representando el tráfico como un conjunto de grupos de vehículos. La simulación de tráfico vehicular tiene diversas aplicaciones, como la evaluación de la capacidad de las carreteras, el diseño de intersecciones, la optimización de la sincronización de semáforos, la planificación de rutas de transporte público

y la evaluación del impacto de nuevas infraestructuras viales. Los resultados de las simulaciones pueden ayudar a tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia del sistema de transporte, reducir la congestión, mejorar la seguridad vial y minimizar el impacto ambiental del tráfico.

### **2.1.9. Modelos de simulación de tráfico**

Los modelos de simulación de tráfico se utilizan para representar y analizar el comportamiento del tráfico en diferentes escenarios. Estos modelos se clasifican en diferentes niveles de detalle y escala, desde regiones enteras hasta cruces individuales[21].

#### **Tipos de Modelos de Simulación de Tráfico**

Existen cuatro tipos principales de modelos de simulación de tráfico: macroscópicos, mesoscópicos, microscópicos y de área local o diseño de cruces [22].

- Modelos macroscópicos (modelos estratégicos): Estos modelos abarcan zonas extensas y modelan el equilibrio de los viajes entre los modos disponibles. La red de carreteras se modela a un nivel de detalle agregado para gestionar los tiempos de ejecución de la simulación. La demanda de los viajeros se define en los viajes personales y se deriva de datos censales (datos sintéticos) y del comportamiento observado en los viajes a partir de encuestas, telefonía móvil o trabajos de campo específicos (datos observados) [23].
- Modelos mesoscópicos: Estos modelos se utilizan para apoyar los principales planes de desarrollo. Están diseñados para predecir el impacto de la desviación de los viajes por carretera en toda la zona y la elección de la ruta [15].
- Modelos microscópicos: Estos modelos reproducen con gran detalle el entorno de simulación y pueden simular el movimiento de vehículos individuales (también conocidos como modelos basados en agentes). Simulan el movimiento de los vehículos dentro de una red de carreteras mediante la réplica exacta del comportamiento del conductor. A diferencia de los modelos macroscópicos, mesoscópicos o de área local, donde todos los vehículos muestran un comportamiento común y uniforme, la microsimulación se basa en la caracterización de los conductores y puede reproducir el efecto que ejercen los obstáculos o semáforos sobre los conductores que transitan por la infraestructura vial. También pueden representar problemas de tráfico complejos, como el impacto de los aparcamientos o de los incidentes en la red, mostrando así modelos muy parecidos al comportamiento real[15].
- Modelos de área local o diseño de cruces: Estos modelos tienen en cuenta el tráfico que se mueve a través de una red localizada, desde un solo cruce a múltiples cruces. Se centran en detalle en la capacidad de los enlaces y cruces individuales, y en la interacción entre ellos. Requieren un alto nivel de precisión, pero no pueden predecir el impacto de la desviación de la conducción o los cambios en el modo de viaje[24].

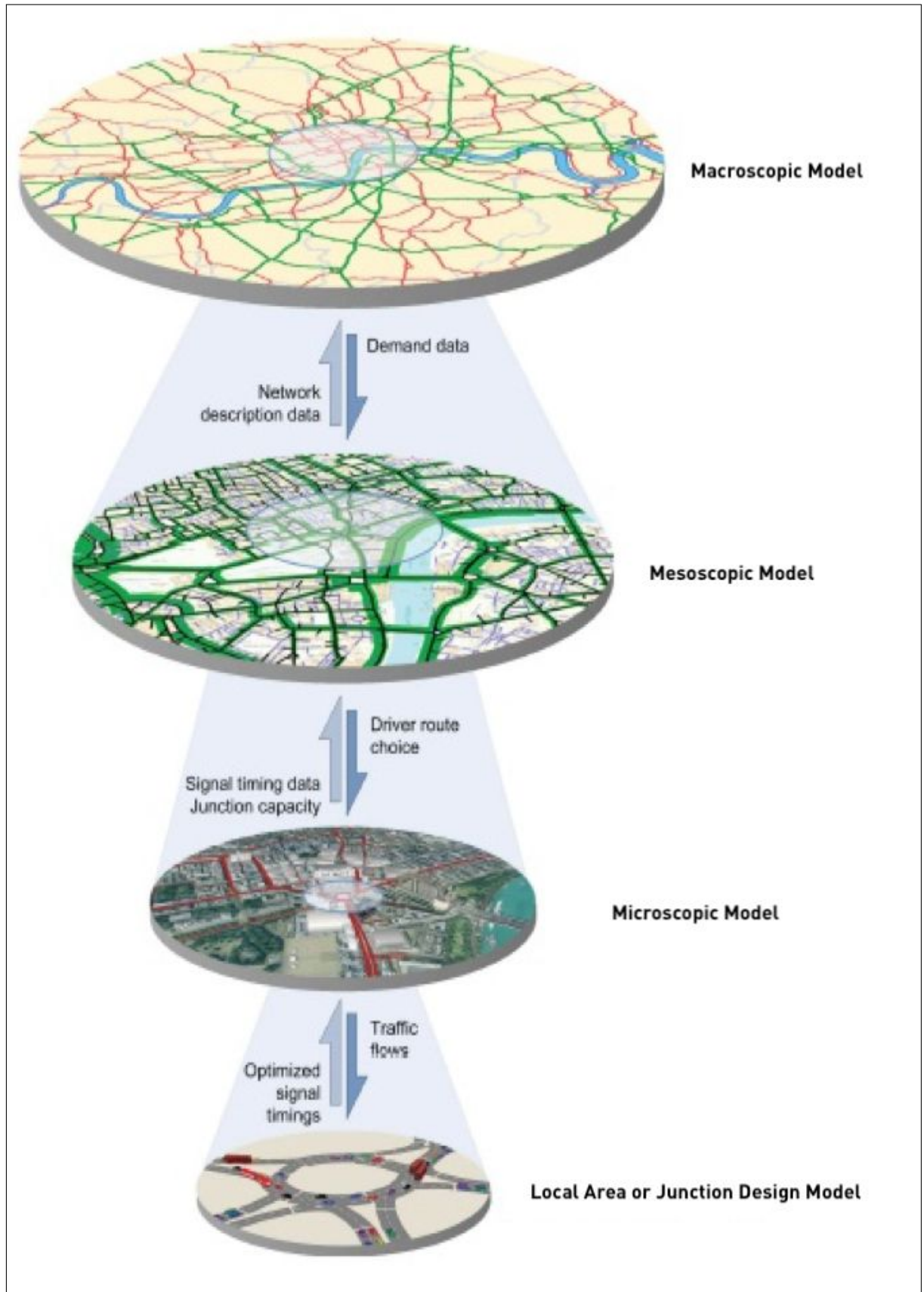


Figura 2.2: Diferentes modelos de transporte.

## Importancia de la Calidad de los Datos

La calidad de los datos es crucial para la fiabilidad y utilidad de los modelos de simulación de tráfico. Para obtener modelos que representen la realidad, la corrección y precisión de los datos recogidos son fundamentales[25].

La precisión de los datos permite al modelador tener una visión clara de la situación actual del tráfico, el entorno circundante y el funcionamiento de la red en términos de comportamiento del tráfico, capacidad y variabilidad[26].

El proceso de recogida de datos puede requerir recursos, pero una adecuada planificación de los trabajos de campo permite obtener datos útiles para la toma de decisiones y la creación de modelos. Por otro lado, la obtención de datos incorrectos puede generar resultados erróneos y dificultar los procesos de calibración y validación del modelo[27].

## Validación del Modelo

Una vez que se ha obtenido una base de datos de calidad, es importante que el modelo reproduzca con exactitud la información obtenida. Uno de los test estadísticos más utilizados para validar un modelo es el  $R^2$  (coeficiente de correlación múltiple al cuadrado)[28].

Un  $R^2$  cercano a 1 indica que las diferencias entre los datos observados en el trabajo de campo y los resultados obtenidos en el modelo son mínimas, lo que significa que el modelo es consistente. Un  $R^2$  menor a 0.8 no se considera aceptable, ya que una buena recogida de información debería arrojar un resultado de al menos 0.9[29].

### 2.1.10. Software de simulación de tráfico

Los software de simulación de tráfico (SST) son herramientas computacionales que permiten modelar y analizar el comportamiento del tráfico vehicular en una red de transporte. Estos programas utilizan modelos matemáticos y algoritmos para simular el flujo de vehículos, la interacción entre diferentes modos de transporte y el impacto de diversas estrategias de gestión de tráfico. Los SST modernos incorporan una variedad de características, incluyendo modelos de comportamiento del conductor, modelos de generación de tráfico, modelos de asignación de rutas y modelos de simulación de semáforos y otros dispositivos de control. Estos programas también pueden incluir herramientas para visualizar los resultados de la simulación, analizar el rendimiento del sistema de transporte y generar informes y estadísticas. Algunos incluso incorporan capacidades de realidad virtual, permitiendo a los usuarios experimentar el tráfico simulado en un entorno inmersivo. El objetivo principal de los SST es la planificación y gestión de sistemas de transporte. Estos programas permiten a los ingenieros y planificadores evaluar el impacto de diferentes escenarios y estrategias antes de implementarlas en el mundo real. Esto puede ayudar a reducir los costos y riesgos asociados con la implementación de nuevas infraestructuras o políticas de transporte. Además pueden utilizarse para capacitar a operadores de sistemas de transporte y para educar al público sobre los desafíos y oportunidades en la gestión del tráfico.

### 2.1.11. Vialidades cercanas al IPN-ESCOM

La zona que rodea al Instituto Politécnico Nacional (*IPN*), particularmente en las inmediaciones de la Escuela Superior de Cómputo (*ESCOM*), cuenta con una infraestructura vial de gran relevancia para la movilidad de estudiantes, docentes y personal administrativo. La infraestructura vial de la zona está compuesta por avenidas principales y calles secundarias, que en conjunto permiten la circulación de transporte público y privado.

Entre estas vialidades de mayor relevancia se incluyen:



- Avenida Instituto Politécnico Nacional (*IPN*): Es la vía principal que atraviesa el campus de norte a sur, conectando diversas unidades académicas y facilitando el tránsito de transporte público y privado.
- Eje Central Lázaro Cárdenas: Una de las arterias más importantes de la Ciudad de México, que bordea la zona del *IPN* y sirve como una de las principales rutas de acceso.
- Avenida Wilfrido Massieu: Conecta la Avenida *IPN* con la Avenida Cien Metros, permitiendo el desplazamiento entre distintas facultades y áreas del *IPN*.
- Avenida Juan de Dios Bátiz: Es una vialidad clave para la movilidad interna dentro del campus, conectando con otras avenidas importantes.
- Avenida Montevideo: Marca el límite sur del *IPN* y conecta con vialidades estratégicas como la Avenida Cien Metros y Avenida 17 de Mayo.

Dado el volumen de tránsito vehicular y peatonal que estas vialidades soportan diariamente, resulta fundamental analizar su funcionamiento a través de herramientas de simulación. La implementación de modelos de simulación permitirá evaluar estrategias para mejorar la movilidad y optimizar el uso de la infraestructura vial existente.

#### **2.1.12. Descripción de la zona de estudio**

La zona de estudio se ubica en las inmediaciones de la Escuela Superior de Cómputo (ES-COM) del Instituto Politécnico Nacional (*IPN*), dentro de la Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", en la Ciudad de México. Esta área es un punto de gran afluencia debido a la concentración de estudiantes, docentes, personal administrativo y visitantes, lo que genera una constante interacción entre peatones, vehículos particulares y transporte público. El entorno presenta una infraestructura vial caracterizada por avenidas principales de alto Flujo Vehicular y calles secundarias que permiten la conexión con diversas instalaciones del *IPN*. La cercanía con vialidades de gran importancia, como el Eje Central Lázaro Cárdenas y la Avenida Instituto Politécnico Nacional, influye en la dinámica del tránsito, especialmente en los horarios de mayor actividad académica. Durante estos periodos, la Congestión Vehicular se intensifica debido al elevado número de automóviles y unidades de transporte público que circulan por la zona, generando tiempos de traslado prolongados y dificultades en la movilidad. Otro aspecto relevante es la coexistencia de diferentes medios de transporte, incluyendo autobuses, taxis, Metrobús y ciclovías, lo que contribuye a la complejidad del tráfico. Además, el acceso al campus está regulado mediante entradas controladas y estacionamientos con capacidad limitada, lo que obliga a muchos conductores a buscar alternativas de estacionamiento en calles aledañas, afectando la fluidez vehicular. El análisis de esta zona es fundamental para comprender los factores que influyen en la movilidad y la distribución del tráfico, permitiendo la identificación de problemáticas y posibles estrategias de optimización que mejoren el Flujo Vehicular y la accesibilidad a las instalaciones del *IPN*.

## Capítulo 3

### 3.1. Análisis

#### ¿Por qué utilizar Autómatas Celulares?

Los Autómatas Celulares son una herramienta muy poderosa para este simulador debido a que su complejidad computacional es de  $O(n)$  temporal y  $O(n)$  espacial donde  $n$  es el número de celdas. Esto permite una simulación efectiva del flujo vial [14], siendo que únicamente debemos de aplicar las reglas de transición para su evolución en el tiempo.

#### ¿Por qué utilizar ECA 184?

La regla ECA 184 es ampliamente utilizada para modelar el flujo de tráfico unidimensional. Esta regla es particularmente adecuada porque garantiza que los vehículos no colisionen y permite simular el movimiento de manera realista, incluyendo la formación de embotellamientos y la liberación de tráfico. La regla ECA 184 es simple pero poderosa: solo considera tres celdas consecutivas (izquierda, actual y derecha) para determinar el siguiente estado, lo que la hace computacionalmente eficiente. Además, su comportamiento ha sido ampliamente estudiado y validado en la literatura, lo que la convierte en una opción confiable para nuestro simulador.

#### ¿Por qué utilizar javascript?

Javascript fue elegido como lenguaje de programación para este proyecto debido a su versatilidad y amplia adopción en el desarrollo web. Al ser un lenguaje interpretado y ejecutado en el navegador, javascript permite crear simulaciones interactivas que pueden ser accesibles desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, sin necesidad de instalación adicional. Además, javascript cuenta con una gran cantidad de bibliotecas y frameworks que facilitan la implementación de interfaces gráficas y la manipulación del Document Object Model, estructura que representa documentos HTML y XML como nodos y objetos (DOM), lo que es esencial para la visualización del tráfico en tiempo virtual. Su naturaleza asíncrona también permite manejar eficientemente la actualización continua del estado del tráfico sin bloquear la Interfaz de Usuario (UI).

#### ¿Por qué utilizar un enfoque basado en probabilidades para la generación de vehículos?

El uso de probabilidades ajustables para la generación de vehículos en las calles permite modelar de manera más realista el flujo de tráfico en diferentes condiciones. En lugar de generar vehículos de manera fija o predecible, este enfoque introduce variabilidad en la simulación, lo que es crucial para analizar escenarios dinámicos y caóticos, como horas pico o eventos especiales. Además, las probabilidades pueden ajustarse para simular diferentes niveles de densidad vehicular, lo que proporciona una mayor flexibilidad en el análisis de la movilidad. Este enfoque también permite estudiar cómo pequeños cambios en la generación de tráfico pueden afectar el comportamiento global del sistema, lo que es útil para la toma de decisiones.

#### 3.1.1. Requerimientos Funcionales

Los requerimientos funcionales del simulador FLUVI detallan las características y funcionalidades específicas que el sistema debe poseer para cumplir con su propósito principal. Estos

requerimientos describen las operaciones que el sistema debe realizar, definiendo así el comportamiento observable del simulador.

### **Simulación del flujo de tráfico**

- **Modelado de la red vial:** El sistema debe representar aproximadamente las calles, intersecciones y elementos relevantes del área cercana al IPN-ESCOM, modelando cada calle como un arreglo unidimensional donde los vehículos se representan con “1” y los espacios vacíos con “0”.
- **Generación de vehículos:** El sistema debe crear vehículos con diferentes comportamientos que interactúen entre sí y con la red vial, utilizando un enfoque basado en probabilidades ajustables para simular la variabilidad del flujo de tráfico en diferentes condiciones.
- **Simulación de movimiento:** El sistema debe modelar el movimiento de los vehículos en la red vial, teniendo en cuenta las reglas de tráfico y las interacciones entre vehículos, aplicando la regla ECA 184 para garantizar que los vehículos no colisionen y simular el movimiento.
- **Visualización del tráfico:** El sistema debe mostrar la simulación del tráfico de forma gráfica. Utilizando JavaScript para crear una interfaz interactiva que permita visualizar el estado del tráfico en tiempo virtual.

### **Análisis del tráfico**

- Métricas de rendimiento: Calcular y mostrar métricas como el Flujo Vehicular, la densidad del tráfico, tasa de cambio y la entropía de shannon.
- Identificación de puntos críticos: Detectar mediante una gráfica de calor los tiempos (día/hora) de alta/baja densidad durante la simulación.
- Evaluación de escenarios: Permitir a los usuarios modificar la red vial (cambiar conexiones, añadir carriles, etc.) y simular el impacto de estos cambios en el tráfico.

### **Interfaz de usuario**

- Controles de simulación: Proporcionar controles para iniciar, detener, pausar y reiniciar la simulación, así como para editar escenarios.
- Configuración de parámetros: Permitir a los usuarios configurar parámetros de la simulación, como la densidad del tráfico, la velocidad máxima, etc.
- Visualización de resultados: Mostrar los resultados de la simulación en un Analizador de Métricas, utilizando gráficos, tablas y/o mapas.

### **Manual de usuario**

- Documentación clara: Proporcionar un manual de usuario que explique cómo utilizar el simulador.
- Ejemplos de uso: Incluir ejemplos de uso del simulador para diferentes escenarios y análisis.

#### **3.1.2. Requerimientos No Funcionales**

Los requerimientos no funcionales establecen las características clave que debe cumplir el simulador FLUVI más allá de su funcionalidad principal. Estos aspectos definen su comportamiento operacional, experiencia de usuario y estructura de desarrollo.

## Rendimiento

- El simulador procesa y actualiza múltiples vehículos durante cada ciclo de simulación en el tiempo virtual del sistema. El motor de autómatas celulares actualiza las posiciones vehiculares aplicando más de 8 casos de transición de estados por cada iteración del ciclo de simulación.
- El sistema de renderizado utiliza PixiJS con aceleración por GPU mediante WebGL, con respaldo automático a Canvas 2D cuando WebGL no está disponible.
- FLUVI implementa técnicas de optimización de renderizado que incluyen:
  - Reutilización de objetos gráficos para vehículos (máximo 1000 objetos reutilizables)
  - Actualización selectiva de únicamente los elementos visuales que han cambiado
  - Eliminación de renderizado de elementos fuera de pantalla en dispositivos móviles
  - Almacenamiento temporal de texturas mediante el cargador de recursos
  - Procesamiento por lotes de PixiJS que combina objetos similares en una sola llamada de dibujo
- El sistema soporta simulaciones con configuraciones variables: desde intersecciones simples con pocos vehículos hasta redes viales complejas. Durante las pruebas se han procesado simulaciones con más de 2000 vehículos simultáneos en escritorio.
- La arquitectura celular del motor de tráfico divide cada calle en células de 5 píxeles, permitiendo cálculos discretos utilizando la regla 184 que se procesan de forma secuencial por calle y por carril, reduciendo la complejidad computacional respecto a simulaciones basadas en física continua.

## Mantenibilidad

- El código del sistema se organiza en una arquitectura modular de tres capas: Capa Visual (42 módulos de interfaz y renderizado), Capa Lógica (7 módulos principales incluyendo el motor de tráfico) y Capa de Datos (almacenamiento local del navegador, memoria de sesión y archivos JSON). Esta separación permite modificar componentes individuales sin afectar otras partes del sistema.
- El sistema de conexiones entre calles utiliza un patrón de estrategia con tres tipos (LINEAL, INCORPORACION, PROBABILISTICA), lo que permite agregar nuevos tipos de conexión sin modificar el código existente del motor de tráfico.
- El proyecto utiliza Git para control de versiones con despliegue automático a red de distribución de contenidos desde la rama principal, permitiendo rastrear cambios y revertir modificaciones si es necesario.
- El código utiliza estándares modernos de JavaScript (ES6+) incluyendo declaraciones de constantes y variables con ámbito de bloque, funciones flecha, clases y módulos. Sin embargo, utiliza variables globales que podrían beneficiarse de una migración a un patrón de módulos o espacio de nombres para reducir acoplamiento.
- El tamaño del archivo principal de lógica (trafico.js) concentra múltiples responsabilidades que podrían dividirse en submódulos más específicos para mejorar la localización de funciones durante mantenimiento futuro.

### 3.1.3. Diagramas de casos de uso

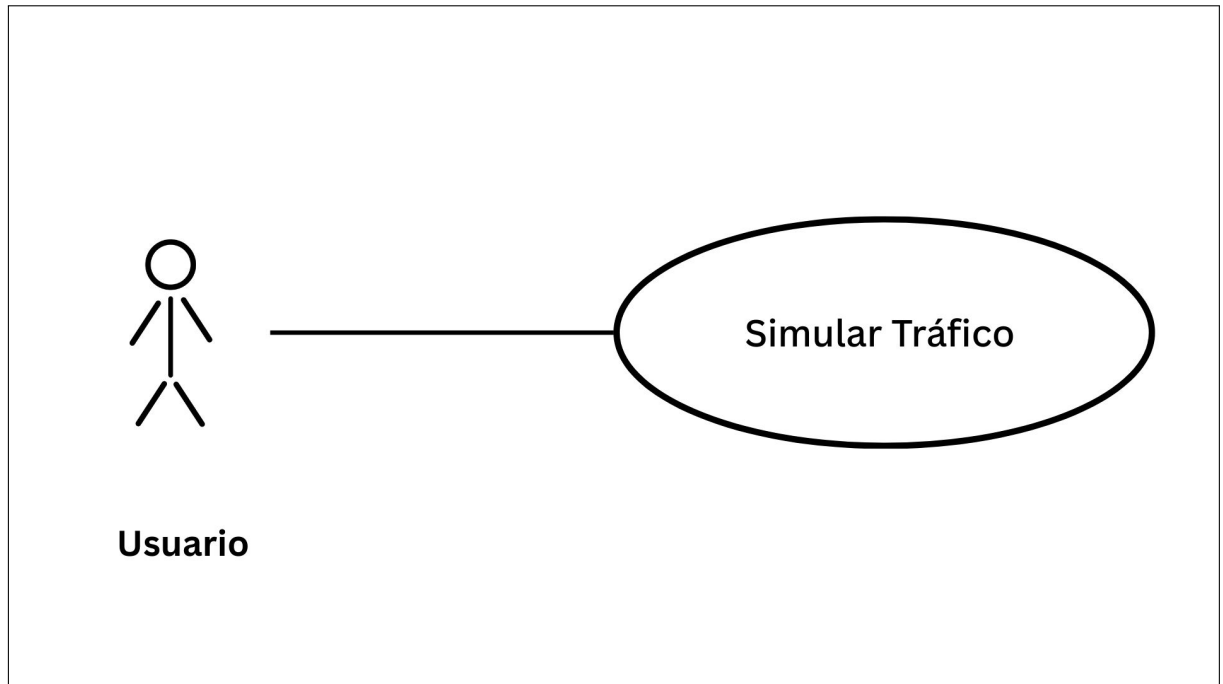


Figura 3.1: Diagrama de casos de uso del actor usuario

### 3.1.4. Detalle de casos de uso

#### CU1 Simular Tráfico

##### Resumen

##### Descripción

Tabla 3.1: Resumen de atributos del Caso de Uso CU1: Simular Tráfico (Parte 1)







<b>Caso de Uso: CU1 Simular Tráfico</b>	
<b>Resumen de atributos</b>	
<b>Actor:</b>	Usuario
<b>Propósito:</b>	Permitir al usuario visualizar y modificar el comportamiento del tráfico sobre un mapa de calles, ajustando parámetros por calle como la probabilidad de generación de vehículos y la probabilidad de salto de carril.
<b>Entradas:</b>	- Botones de control de simulación (inicio, pausa, detener, velocidad) - Selección de calle desde menú desplegable - Valores numéricos de probabilidades (generación, salto de carril, arranque) - Valores de límite de velocidad y velocidad máxima - Valores de población y capacidad de edificios - Selección de tipo de edificio - Ajustes de clima (lluvia, niebla) - Opciones de visualización (intersecciones, edificios, personas, nombres de calles, mapas de calor) - Valores de modificadores globales (número de carros, ciclo de semáforo, tiempo de aceleración)
<b>Salidas:</b>	- Visualización gráfica del tráfico simulado en tiempo virtual - Estadísticas de tráfico actualizadas (carros en circulación, carros estacionados, personas caminando) - Mapas de calor de velocidad y densidad - Visualización de edificios con información (capacidad, población) - Efectos visuales de clima (lluvia, niebla) - Información de velocidad y densidad por calle

Tabla 3.2: Resumen de atributos del Caso de Uso CU1: Simular Tráfico (Parte 2)

<b>Caso de Uso: CU1 Simular Tráfico (continuación)</b>	
<b>Precondiciones:</b>	- La aplicación debe estar cargada correctamente. - Debe haber una red de calles definida. - Debe haber una calle seleccionable.
<b>Postcondiciones:</b>	- Se actualiza la simulación visual de tráfico con los nuevos valores ingresados. - Se observa en tiempo virtual el impacto de las modificaciones.
<b>Errores:</b>	- No seleccionar una calle antes de actualizar puede generar errores. - Ingresar valores inválidos (e.g., texto en campos numéricos).
<b>Tipo:</b>	Primario – Interacción directa del usuario con el sistema

## Trayectorias del caso de uso







### Trayectoria principal

-  El usuario hace click en el botón de inicio de la simulación.
-  El sistema inicia la simulación con los valores predeterminados del mismo.
-  El usuario hace click en el botón de mostrar intersecciones.
-  El sistema muestra las intersecciones en la simulación.
-  El usuario hace click en el botón de pausa de la simulación.
-  El sistema pausa la simulación.

→ Fin del caso de uso.

### Trayectoria Alternativa A: Acceder a las instrucciones







**CONDICIÓN:** Se desea acceder a las instrucciones del sistema

1.  El usuario selecciona la opción de bienvenida en el menú superior
2.  El sistema muestra el menú desplegable de bienvenida con una descripción del simulador
3.  El usuario hace clic en el botón de instrucciones
4.  El sistema muestra una ventana emergente con las instrucciones detalladas del sistema
5.  El usuario hace clic en el botón de cerrar ventana emergente
6.  El sistema cierra la ventana y regresa a la vista principal

*Fin de trayectoria*

### Trayectoria Alternativa B: Modificar parámetros generales del simulador










**CONDICIÓN:** Se desea modificar parámetros globales de la simulación

1.  El usuario selecciona el icono del menú de modificadores del simulador
2.  El sistema muestra el menú desplegable con dos opciones: Modificadores generales y Modificadores por calle
3.  El usuario selecciona el menú de Modificadores generales
4.  El sistema despliega controles para:
  - Número de carros (slider de 0 a 200)
  - Ciclo de semáforo en segundos (slider de 2 a 15)
  - Tiempo de aceleración en segundos (slider de 0.5 a 10)
5.  El usuario ajusta los valores deseados mediante los sliders
6.  El sistema actualiza la simulación en tiempo virtual con los nuevos valores

*Fin de trayectoria*

### Trayectoria Alternativa C: Modificar parámetros por calle





**CONDICIÓN:** Se desea modificar parámetros específicos de una calle

1.  El usuario selecciona el icono del menú de modificadores del simulador
2.  El sistema muestra el menú desplegable con las opciones disponibles
3.  El usuario selecciona el menú de Modificadores por calle
4.  El sistema despliega un selector de calles y controles para:
  - Probabilidad de generación (0 a 100 %)
  - Probabilidad de salto de carril (0 a 100 %)
  - Probabilidad de arranque (0 a 100 %)
  - Límite de velocidad (10 a 200 km/h)
  - Velocidad máxima (10 a 200 km/h)
5.  El usuario selecciona una calle del dropdown
6.  El sistema carga los valores actuales de esa calle en los controles
7.  El usuario modifica los valores deseados
8.  El usuario presiona el botón “Actualizar”
9.  El sistema aplica los cambios a la calle seleccionada y actualiza la simulación

*Fin de trayectoria*

### Trayectoria Alternativa D: Visualizar estadísticas de tráfico

**CONDICIÓN:** Se desea consultar las estadísticas actuales de la simulación







1.  El usuario selecciona el icono de estadísticas en el menú superior
2.  El sistema muestra el panel de estadísticas con:
  - Número de carros en circulación
  - Número de carros estacionados
  - Número de personas caminando
3.  El sistema actualiza estos valores en tiempo virtual mientras la simulación está activa
4.  El usuario puede cerrar el panel haciendo clic fuera de él o en el icono nuevamente

*Fin de trayectoria*



### Trayectoria Alternativa E: Activar y visualizar mapas de calor








**CONDICIÓN:** Se desea visualizar mapas de calor de velocidad o densidad

1.  El usuario selecciona el icono de mapas de calor en el menú superior
2.  El sistema muestra el panel de mapas de calor con dos opciones:
  - Mapa de calor de velocidad
  - Mapa de calor de densidad
3.  El usuario selecciona el tipo de mapa deseado (velocidad o densidad)
4.  El sistema activa la visualización del mapa de calor sobre las calles:
  - Velocidad: muestra gradiente de colores según velocidad promedio (verde=rápido, rojo=lento)
  - Densidad: muestra gradiente según cantidad de vehículos (verde=poco denso, rojo=muy denso)
5.  El usuario puede desactivar el mapa haciendo clic nuevamente en la opción
6.  El sistema oculta la visualización del mapa de calor

*Fin de trayectoria*

### Trayectoria Alternativa F: Modificar condiciones climáticas







**CONDICIÓN:** Se desea cambiar las condiciones climáticas de la simulación

1.  El usuario selecciona el icono de clima en el menú superior
2.  El sistema muestra el panel de clima con controles para:
  - Intensidad de lluvia (slider de 0 a 100 %)
  - Intensidad de niebla (slider de 0 a 100 %)
3.  El usuario ajusta la intensidad de lluvia
4.  El sistema activa el efecto visual de lluvia con partículas y sonido ambiental
5.  El usuario ajusta la intensidad de niebla
6.  El sistema reduce la visibilidad del mapa según la intensidad configurada
7.  El sistema ajusta el comportamiento de los vehículos (reducción de velocidad bajo lluvia)

*Fin de trayectoria*

### **Trayectoria Alternativa G: Gestionar visualización de edificios**









**CONDICIÓN:** Se desea mostrar u ocultar edificios en el mapa

1.  El usuario selecciona el icono de edificios en el menú superior
2.  El sistema muestra el panel de edificios con opciones:
  - Checkbox “Mostrar edificios”
  - Checkbox “Mostrar información de edificios”
3.  El usuario activa “Mostrar edificios”
4.  El sistema renderiza los edificios en el mapa con sus modelos 3D correspondientes
5.  El usuario activa “Mostrar información de edificios”
6.  El sistema muestra etiquetas sobre cada edificio con:
  - Nombre del edificio
  - Población actual
  - Capacidad máxima
  - Porcentaje de ocupación

*Fin de trayectoria*

### **Trayectoria Alternativa H: Agregar y configurar edificios**





**CONDICIÓN:** Se desea agregar un nuevo edificio al mapa

1.  El usuario selecciona el icono de edificios
2.  El sistema muestra el panel de edificios
3.  El usuario selecciona el tipo de edificio del dropdown (casa, torre, tienda, escuela, hospital, etc.)
4.  El usuario ingresa valores para:
  - Capacidad del edificio (número de personas que puede albergar)
  - Población inicial
5.  El usuario hace clic en “Agregar edificio”
6.  El sistema coloca el edificio en una posición disponible cerca de una calle
7.  El sistema genera personas que pueden entrar y salir del edificio
8.  El sistema genera vehículos estacionados asociados al edificio

*Fin de trayectoria*

### **Trayectoria Alternativa I: Visualizar personas caminando**





**CONDICIÓN:** Se desea mostrar u ocultar personas en la simulación

1.  El usuario selecciona el checkbox “Mostrar personas” en el panel de edificios
2.  El sistema activa la visualización de personas caminando por las aceras
3.  El sistema anima el movimiento de personas entre edificios y calles
4.  El usuario puede desactivar la visualización desmarcando el checkbox

*Fin de trayectoria*

### **Trayectoria Alternativa J: Controlar velocidad de la simulación**






**CONDICIÓN:** Se desea ajustar la velocidad de reproducción de la simulación

1.  El usuario hace clic en el botón de velocidad (muestra “1x”, “2x”, “3x”, etc.)
2.  El sistema cicla entre diferentes velocidades:  $1x \rightarrow 2x \rightarrow 3x \rightarrow 0.5x \rightarrow 1x$
3.  El sistema ajusta la velocidad de actualización de la simulación
4.  El botón muestra la velocidad actual

*Fin de trayectoria*

### **Trayectoria Alternativa K: Detener y reiniciar la simulación**




**CONDICIÓN:** Se desea detener completamente la simulación y reiniciarla

1.  El usuario hace clic en el botón de detener
2.  El sistema detiene la simulación y limpia todos los vehículos y personas del mapa
3.  El sistema reinicia los contadores de estadísticas
4.  El usuario hace clic en el botón de inicio
5.  El sistema reinicia la simulación desde cero con los parámetros actuales

*Fin de trayectoria*

### **Trayectoria Alternativa L: Visualizar nombres de calles**



**CONDICIÓN:** Se desea mostrar u ocultar los nombres de las calles

1.  El usuario selecciona el checkbox “Mostrar nombres de calles” en las opciones de visualización
2.  El sistema renderiza etiquetas de texto sobre cada calle mostrando su identificador
3.  El usuario puede desactivar la visualización desmarcando el checkbox

*Fin de trayectoria*

### **Trayectoria Alternativa M: Consultar información de calle específica**




**CONDICIÓN:** Se desea ver información detallada de una calle durante la simulación

1.  El usuario hace clic sobre una calle en el mapa (si está implementada la interacción)
2.  El sistema muestra un tooltip o panel con:
  - Nombre de la calle
  - Velocidad promedio actual
  - Densidad de vehículos
  - Parámetros configurados (límites de velocidad, probabilidades)

*Fin de trayectoria*

### **Trayectoria Alternativa N: Alternar entre vista diurna y nocturna**

**CONDICIÓN:** Se desea cambiar la iluminación del entorno (si está implementado)

1.  El usuario selecciona el control de iluminación en las opciones de visualización
2.  El sistema ajusta la iluminación ambiental y las sombras
3.  El sistema activa luces en vehículos y edificios si es modo nocturno

*Fin de trayectoria*

## **3.1.5. Reglas del Proyecto**

### **RP1 Limitación Geográfica**

El simulador solo mostrará y permitirá la simulación del flujo vehicular en las vialidades cercanas a ESCOM y Zacatenco, excluyendo cualquier zona fuera de los límites establecidos.

### **RP2 Configuración de modificadores por calle**

La probabilidad de generación y la probabilidad de salto de carril son parámetros que el usuario podrá aplicar solo a una calle específica seleccionada.

### **RP3 Selección de calle en modificadores por calle**

En el submenú de modificadores por calle, la selección del campo de calle se restringirá a una única opción.

### **RP4 Ajustes de probabilidad**

Las probabilidades de generación y cambio de carril solo podrán tomar valores enteros en el rango de 1 a 100. Cualquier valor fuera de este rango será rechazado por el sistema.

### **RP5 Configuración de Modificadores Locales**

El sistema permitirá al usuario aplicar modificadores específicos a una calle seleccionada. Los modificadores locales serán: obstrucción por árbol, presencia de baches y vehículo descompuesto. Estos modificadores afectarán exclusivamente el flujo vehicular de la calle seleccionada, sin impactar las demás vialidades del sistema.

## RP6 Configuración de Modificadores Globales

El sistema permitirá la aplicación de modificadores que afecten a toda la red de tráfico de manera simultánea. Los modificadores globales incluirán eventos como el impacto de un meteorito o la ocurrencia de un terremoto, afectando el flujo vehicular en todas las calles del sistema.

## RP7 Configuración de Modificadores Híbridos

El sistema permitirá configuraciones que funcionen tanto a nivel local (calle específica) como global (toda la red). Los modificadores híbridos incluirán la probabilidad de cambio de carril y la generación de vehículos, que podrán aplicarse a una calle específica o a todas las calles del sistema simultáneamente.

### 3.1.6. Actores

Usuario

El Usuario de FLUVI puede ser cualquier persona que interactúe con el simulador, ya sea para analizar el tráfico, evaluar escenarios o simplemente observar la simulación. Este usuario puede ser un planificador urbano, un investigador o cualquier persona interesada en el análisis del tráfico vehicular. Sus funciones se centran en:

Interactuar con la interfaz de usuario: Utilizar los controles de la interfaz para iniciar, detener, pausar y reiniciar la simulación, así como para configurar los parámetros de la simulación.

Visualizar la simulación: Observar la simulación del tráfico en tiempo virtual, analizando el comportamiento de los vehículos y la dinámica del Flujo Vehicular.

Analizar las métricas de rendimiento: Interpretar las métricas de rendimiento del tráfico, como el Flujo Vehicular, la densidad del tráfico y el tiempo promedio de viaje, para evaluar la eficiencia del sistema.

Evaluar diferentes escenarios: Modificar la red vial y simular el impacto de estos cambios en el tráfico, analizando diferentes escenarios y estrategias de gestión del tráfico.

### 3.1.7. Herramientas a utilizar

El desarrollo de FLUVI requiere herramientas adecuadas para garantizar eficiencia, escalabilidad y precisión en la simulación del tráfico vehicular. La elección de herramientas se basó en la experiencia del equipo, el rendimiento del sistema y la facilidad de implementación en entornos web.

#### Software

Para la implementación de FLUVI se ha optado exclusivamente por tecnologías de código abierto (Open Source), garantizando accesibilidad universal, compatibilidad con navegadores modernos y ausencia de costes de licenciamiento. La arquitectura elegida permite ejecutar el simulador directamente en el navegador sin requerir procesos de compilación, instalación de dependencias locales o software propietario adicional.

- **HTML5 y CSS3:** Estructuran y diseñan la interfaz gráfica del simulador. Se utiliza HTML5 Canvas para el renderizado del minimapa y elementos de visualización auxiliares, permitiendo manipulación directa de píxeles y transformaciones geométricas en tiempo virtual.
- **PixiJS 7:** Motor gráfico profesional de alto rendimiento basado en WebGL que constituye el núcleo del sistema de renderizado. PixiJS permite aceleración por hardware (GPU) para

el dibujado eficiente de miles de elementos simultáneos (vehículos, calles, edificios) manteniendo 60 FPS. Incluye un sistema de cámara con zoom y paneo suave, gestión automática de batching y optimización de sprites, y pipeline de renderizado modular mediante clases especializadas (CalleRenderer, CarroRenderer, EdificioRenderer, ConexionRenderer, UIRenderer).

- **JavaScript (ES6+)**: Lenguaje principal de implementación, utilizado para:
  - El motor de simulación basado en autómatas celulares (trafico.js)
  - El sistema de edición visual interactiva (editor.js) con handles de transformación
  - El constructor de mapas y gestor de configuraciones (constructor.js)
  - La lógica de detección de intersecciones y gestión de colisiones
  - Sistema de tiempo simulado con ciclos día/noche y perfiles horarios de tráfico (tiempo.js, DayNightCycle.js)
  - Sistema de efectos climáticos (RainEffect.js)
  - Sistema de gestión de escenarios guardables (escenarios.js, gestionEscenarios.js)
  - Módulos de interfaz de usuario (notifications.js, HeatmapModal.js, darkMode.js, tooltips.js)
  - Sistema de control de cámara y coordenadas (CameraController.js, CoordinateConverter.js)
  - Gestión de estacionamientos y curvas en calles (estacionamientos.js, curvas.js)
- **Bootstrap 5.0.2**: Framework CSS de código abierto empleado para crear una interfaz responsiva y moderna. Proporciona componentes como acordeones, modales, tooltips, barras laterales colapsables y controles de formulario que facilitan la interacción del usuario con la simulación. Incluye sistema de modo oscuro integrado para reducir fatiga visual.
- **Chart.js**: Biblioteca JavaScript de visualización de datos utilizada para generar gráficas interactivas en tiempo virtual de las métricas del tráfico (densidad, flujo vehicular, velocidad promedio, generación neta y entropía del sistema). Permite análisis visual dinámico del comportamiento del autómata celular mediante actualización continua de datasets durante la simulación.
- **Arquitectura sin dependencias externas**: Las bibliotecas necesarias (Bootstrap, Chart.js) se incluyen localmente en el proyecto, mientras que PixiJS se carga desde CDN para aprovechar caché del navegador. No se requieren gestores de paquetes (npm, yarn) ni procesos de transpilación (Webpack, Babel) para la ejecución, favoreciendo la portabilidad y autonomía del simulador.
- **Arquitectura modular**: El código se organiza en módulos funcionales independientes separados en tres categorías principales: **core/** (lógica de simulación), **renderer/** (sistema de visualización), y **ui/** (interfaz de usuario), facilitando el mantenimiento, extensibilidad y comprensión del sistema.

Esta arquitectura sin proceso de compilación (build-free) permite que el simulador sea ejecutado abriendo directamente el archivo `index.html` en cualquier navegador moderno compatible con WebGL, favoreciendo la accesibilidad educativa y la facilidad de distribución sin requerir instalación de herramientas de desarrollo.

## Hardware

Para asegurar un rendimiento óptimo del simulador de tráfico "FLUVI", se recomienda el siguiente hardware:

Especificaciones mínimas

- Procesador: Intel Core i5 de 6ta generación o equivalente AMD.
- Memoria RAM: 8 GB.
- Almacenamiento: 256 GB SSD.
- Tarjeta gráfica: Integrada o dedicada con soporte para aceleración de hardware.
- Sistema operativo: Windows 11 o superior, macOS 10.15 o superior, o una distribución de Linux moderna.
- Navegador web: Google Chrome, Mozilla Firefox o Microsoft Edge (últimas versiones).

Especificaciones recomendadas

- Procesador: Intel Core i7 de 8va generación o superior, o equivalente AMD.
- Memoria RAM: 16 GB o superior.
- Almacenamiento: 512 GB SSD o superior.
- Tarjeta gráfica: Dedicada con al menos 2 GB de VRAM.
- Sistema operativo: Windows 11 o superior, macOS 10.15 o superior, o una distribución de Linux moderna.
- Navegador web: Google Chrome, Mozilla Firefox o Microsoft Edge (últimas versiones).

### 3.1.8. Algoritmos analizados

Los algoritmos analizados para este sistema de tráfico fueron los siguientes:

- Ecuaciones macroscópicas. Este algoritmo trata el tráfico como un fluido continuo, usando ecuaciones diferenciales para describir su comportamiento indicando la densidad, la velocidad y el flujo [Ecuaciones macro]. Sus ventajas son que debido a su simplicidad, se pueden simular grandes zonas, obteniendo una visión general del tráfico. Esta simplicidad no permite capturar el comportamiento individual de los vehículos ni la representación de fenómenos viales. Complejidad temporal:  $O(n)$

Complejidad espacial:  $O(n)$

- Multi-Agentes. En este algoritmo cada vehículo es representado como un agente individual con sus propias características como la velocidad, la aceleración y/o cambios de carril [Agentes]. Sus ventajas son que tiene un mayor nivel de detalle y realismo, puesto que permite ver un comportamiento complejo entre los vehículos, así como también permite la creación de escenarios específicos. Es observable que si bien nos da más detalle, al contrario de las ecuaciones diferenciales, este tiene un costo computacional mayor.

Complejidad temporal:  $O(n \cdot m)$

Complejidad espacial:  $O(n \cdot m)$

$n$  - número de vehículos

$m$  - número de interacciones

- Algoritmos híbridos. Estos algoritmos son usados para combinar elementos de otros algoritmos para utilizar sus distintos enfoques según sea necesario. Permiten tener una visión macroscópica para el flujo general y visión de los agentes para zonas específicas. Con esta aproximación podemos adaptarnos a diferentes niveles de detalle con distintos escenarios aunque puede tener una mayor complejidad de diseño e implementación.

Complejidad temporal:  $O(n * m)$

Complejidad espacial:  $O(n * m)$

n - número de vehículos

m - número de interacciones

- Algoritmos de optimización. Estos algoritmos pueden ser implementados para optimizar ciertos parámetros del sistema, como los cambios de carril o el comportamiento de los semáforos. Con estos algoritmos se pueden analizar soluciones para los escenarios que puedan surgir en el sistema, incluso siendo un sistema complejo. El único problema es que puede incrementar la complejidad computacional según el algoritmo elegido, como los algoritmos genéticos.

### 3.1.9. Planificación del Proyecto

La planificación del proyecto es una etapa crucial para el desarrollo exitoso del simulador de tráfico "FLUVI". En esta sección, se detallan las actividades y metodologías que se llevarán a cabo para establecer un marco de trabajo organizado y eficiente. Inicialmente, se abordará la **estimación de tiempos y costos** para definir los recursos necesarios y la duración del proyecto. Posteriormente, con base en el **del proyecto** se realizará un análisis para visualizar la secuencia de tareas y los hitos clave. Se realizará un **análisis por sus siglas en ingles PERT** para identificar la Ruta Crítica y evaluar la probabilidad de cumplir con los plazos establecidos. Finalmente, se calculará la **Distribución de probabilidad normal**[30] para comprender la variabilidad en la duración del proyecto y gestionar las expectativas de manera realista.

### Cronograma del Proyecto

La siguiente figura ilustra el cronograma establecido para la ejecución del presente proyecto, detallando la secuencia temporal de las actividades a realizar a lo largo de su ciclo de vida, desde la concepción hasta la implementación, evaluación y entrega.



Actividades	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DEC
Desarrollo de Reporte técnico.											
Elaboración del estado del arte.											
Investigación: Autómatas Celulares.											
Definición de objetivos, alcance y requerimientos.											
Planeación de la solución.											
Selección de las tecnologías y herramientas a utilizar para el desarrollo del prototipo del sistema.											
Diseño de la arquitectura del sistema.											
Análisis de la factibilidad del proyecto.											
Desarrollo de casos de uso y especificación de requisitos funcionales.											
Evaluación de TT 1.											
Desarrollo de la interfaz de usuario.											
Implementación de métricas y estadísticas para evaluar el rendimiento del tráfico.											
Ejecución de pruebas unitarias de las implementaciones desarrolladas.											
Generación de Manual de Usuario y Reporte Técnico.											
Despliegue del sistema.											
Evaluación de TT 2.											

Figura 3.2: Cronograma de meses de trabajo estimados para la realización de este trabajo terminal.

## Estimación de Tiempos y Costos

**Matriz de precedencia:** Tras un análisis exhaustivo, se ha logrado obtener la siguiente matriz-tabla de precedencia. En esta tabla, se presentan las actividades contempladas para este proyecto, junto con sus respectivas duraciones (en meses), las actividades precursoras y una justificación clara y fundamentada del tiempo asignado para cada una de estas actividades.

Actividad	Precursor	Tiempo en meses	Justificación de tiempo
A1	-	1	Consideramos que un mes para la actividad A1 es adecuado para establecer la estructura inicial del Reporte Técnico, definir apartados clave y comenzar la documentación de fundamentos teóricos.
A2	A1	1	Permite la expansión del Reporte Técnico con objetivos, alcance y requerimientos del proyecto, además de formular la solución propuesta.
A3	A2	1	Un mes asignado a la actividad A3 proporciona el tiempo necesario para integrar en el Reporte Técnico la selección de tecnologías y herramientas, el diseño de la arquitectura del sistema y el análisis de factibilidad del proyecto.
A4	A3	1	Se estima que un mes para la actividad A4 es suficiente para documentar en el Reporte Técnico los casos de uso, la especificación de requisitos funcionales y la descripción del prototipo básico del simulador.
A5	A4	1	Un mes para la actividad A5 permite la incorporación en el Reporte Técnico de los avances en el desarrollo de la interfaz de usuario, los algoritmos para la generación de escenarios de tráfico.
A6	A5	4	Se asignan cuatro meses a la actividad A6 debido a la naturaleza iterativa y continua del desarrollo del Reporte Técnico. Durante este periodo, el documento se actualizará y refinará extensivamente para reflejar los resultados de las pruebas unitarias, la generación del Manual de Usuario, el despliegue del sistema y la evolución general del proyecto. Este tiempo permite una documentación exhaustiva y precisa del proceso de desarrollo.
A7	A6	1	Se considera que un mes para la actividad A7 es adecuado para la pre revisión del Reporte Técnico y ajuste de detalles específicos que surjan, asegurando que el documento esté completo, coherente y listo para la entrega final del proyecto.
A8	A7	1	Se considera que un mes para la actividad A8 es adecuado para la finalización y revisión del Reporte Técnico, asegurando la entrega del documento completo, cumpliendo requisitos de coherencia y estando listo para la entrega final del proyecto.

Actividad	Precursor	Tiempo en meses	Justificación de tiempo
B	-	1	Consideramos que un mes para la actividad B es un tiempo adecuado para llevar a cabo una investigación exhaustiva y la documentación del estado del arte relevante para el proyecto, incluyendo la revisión de modelos de autómatas celulares y sistemas de simulación de tráfico existentes.
C	-	1	Consideramos que un mes para la actividad C permite la inmersión profunda en la teoría y aplicaciones de los autómatas celulares, fundamental para la modelización del tráfico en el simulador.
D	A1, B, C	1	Un mes asignado a la actividad D proporciona el tiempo necesario para definir claramente los objetivos del proyecto, establecer su alcance y detallar los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema.
E	A1, B, C	1	Se estima que un mes para la actividad E es suficiente para diseñar la solución propuesta, incluyendo la selección de los algoritmos y las estrategias de simulación que se implementarán.
F	A1, B, C	1	Un mes para la actividad F permite la evaluación y selección de las tecnologías de desarrollo, las bibliotecas y las herramientas de software necesarias para construir el prototipo del simulador.
G1	A1, B, C	1	Consideramos que un mes para la actividad G1 es adecuado para la fase inicial del diseño de la arquitectura del sistema. Esto incluye la definición de la estructura general del sistema.
G2	A2, D, E, F, G1	1	Un mes asignado a la actividad G2 permite la profundización en el diseño de la arquitectura del sistema, detallando la interacción entre los componentes.
H	A2, D, E, F, G1	1	Un mes asignado a la actividad H proporciona el tiempo necesario para analizar la factibilidad técnica, operativa y económica del proyecto, evaluando los recursos disponibles y los posibles riesgos.
I	A3, G2, H	1	Se estima que un mes para la actividad I es suficiente para desarrollar los casos de uso que describen las interacciones del usuario con el sistema y especificar los requisitos funcionales detallados.
J	A4, I	1	Un mes se asigna a la actividad J para la revisión y evaluación del primer Trabajo Terminal, asegurando que se cumplan los objetivos y se establezcan las bases para la siguiente fase del proyecto.

Actividad	Precursor	Tiempo en meses	Justificación de tiempo
K	A5, J	4	Se asignan tres meses a la actividad K para el diseño e implementación de la interfaz de usuario del simulador, permitiendo la creación de una interfaz intuitiva y funcional.
L	A5, J	4	Cuatro meses se destinan a la actividad L para la implementación de las métricas y estadísticas necesarias para evaluar el rendimiento del tráfico en la simulación, incluyendo la recolección, el procesamiento y la visualización de datos.
M	A6, K, L	1	Dos meses se asignan a la actividad M para la ejecución de pruebas unitarias de los diferentes componentes del simulador, asegurando su correcto funcionamiento e integración.
N	A6, K, L	1	Un mes se dedica a la actividad N para la elaboración del Manual de Usuario del simulador y la finalización del Reporte Técnico, documentando el sistema y su uso.
O	A6, K, L	1	Un mes se reserva para la actividad O para el despliegue del simulador, incluyendo la instalación, configuración y puesta en marcha del sistema.
P	A7, M, N, O	1	Finalmente, un mes se asigna a la actividad P para la revisión y evaluación del segundo Trabajo Terminal, asegurando la entrega completa y exitosa del proyecto.

Tabla 3.3: Matriz de precedencia del trabajo terminal FLUVI.

La tabla de precedencia ilustra las dependencias lógicas entre las actividades del proyecto FLUVI. Esta representación visual nos permite identificar qué tareas deben completarse antes de que otras puedan comenzar, estableciendo así el orden secuencial del trabajo. Al comprender estas relaciones, podemos optimizar el cronograma, evitar retrasos innecesarios y asegurar un flujo de trabajo eficiente para el desarrollo del simulador.

## Análisis PERT

**Red PERT:** Gracias a la matriz de precedencia se logró calcular pertinente para este proyecto que resultó de la siguiente manera:

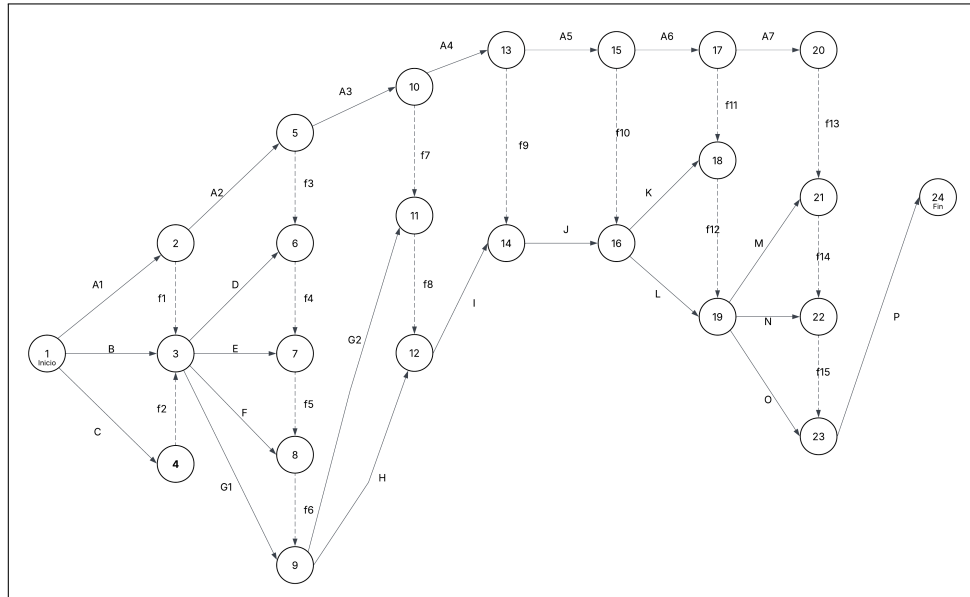


Figura 3.3: Red del trabajo terminal FLUVI.

Para mejorar la claridad y legibilidad del diagrama PERT, debido a su tamaño y complejidad, se ha procedido a su división en dos partes, permitiendo así una representación más detallada de cada sección. A continuación, se presentan las dos secciones resultantes:

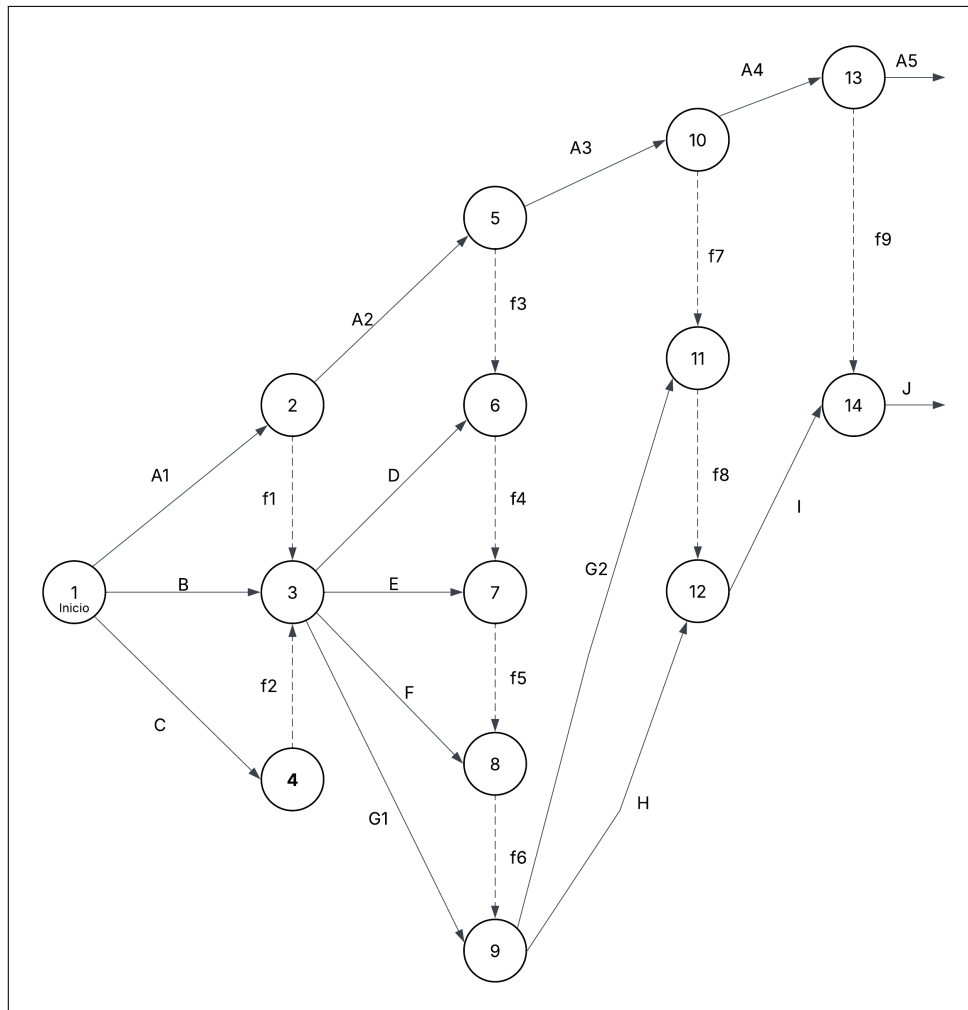


Figura 3.4: Sección 1 de la Red PERT del trabajo terminal FLUVI.

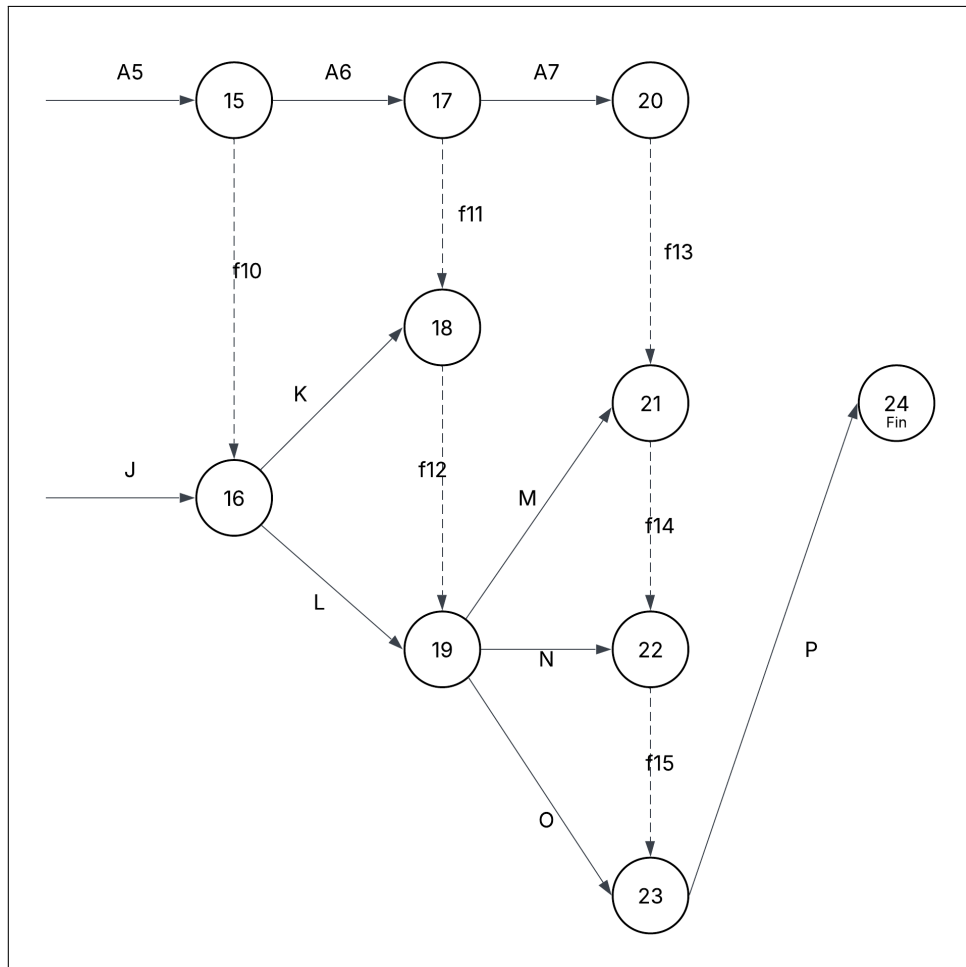


Figura 3.5: Sección 2 de la Red PERT del trabajo terminal FLUVI.

**PERT simple:** Una vez completado el análisis de la Red PERT, se procedió al cálculo del Pert Simple para el proyecto. En este proceso, se determinaron los Tiempo Temprano de Inicio (TTP), Tiempo Temprano de Fin (TTF), Tiempo Tardío de Inicio (TIP) y Tiempo Tardío de Fin (TTL) de cada actividad. Los resultados de estos cálculos se presentan a continuación:

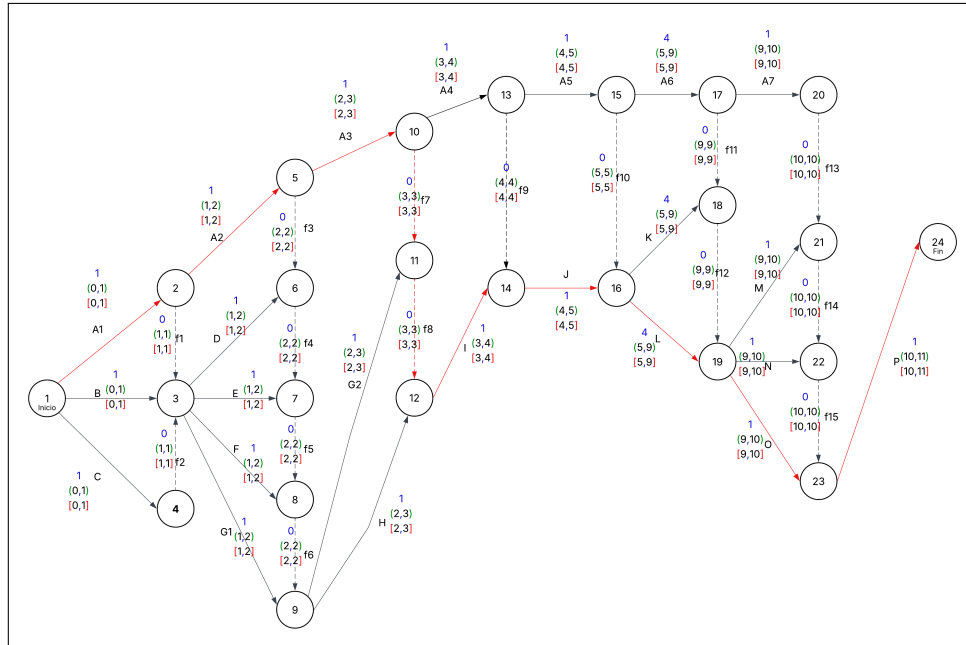


Figura 3.6: Sección 2 de PERT simple del trabajo terminal FLUVI.

Debido a las dimensiones del diagrama de Pert Simple, y con el objetivo de facilitar su visualización y análisis, se ha optado por dividirlo en dos secciones equitativas. Además, la Ruta Crítica se encuentra resaltada en rojo en ambas secciones.



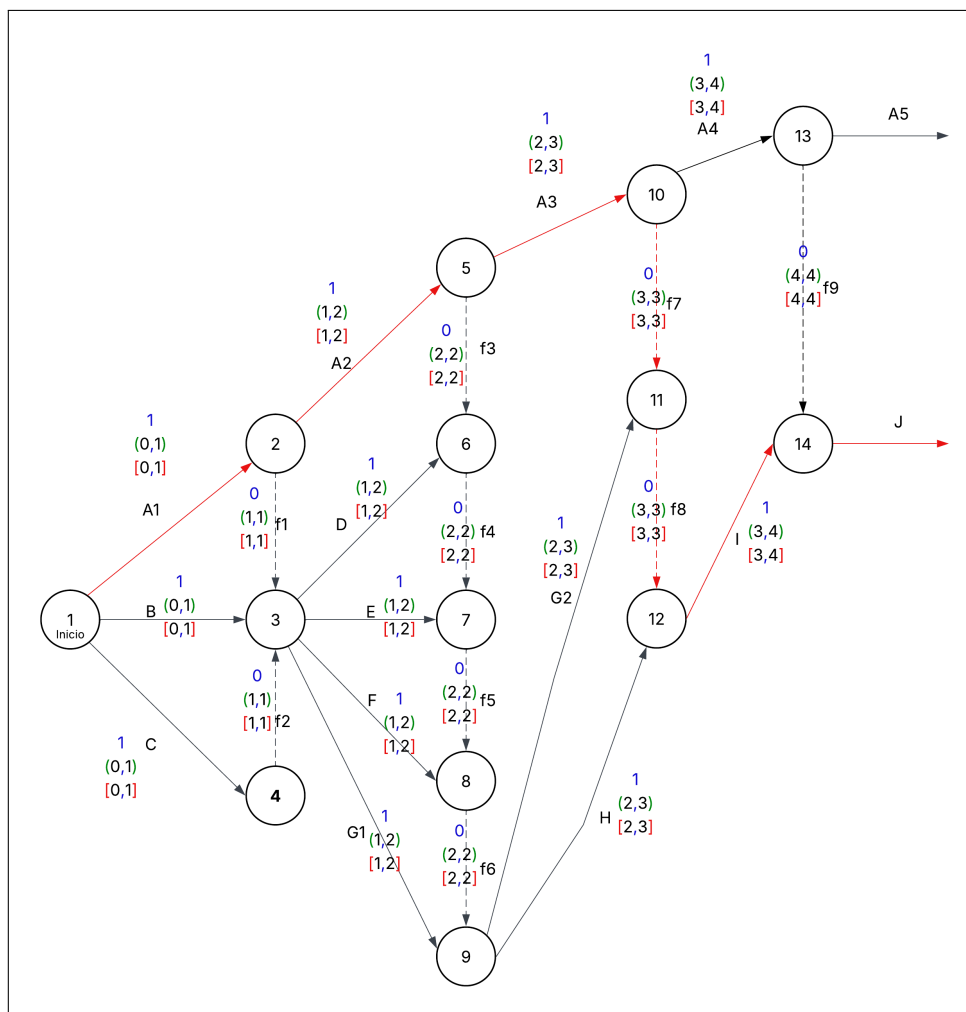


Figura 3.7: Sección 1 del diagrama de Pert Simple del trabajo terminal FLUVI.

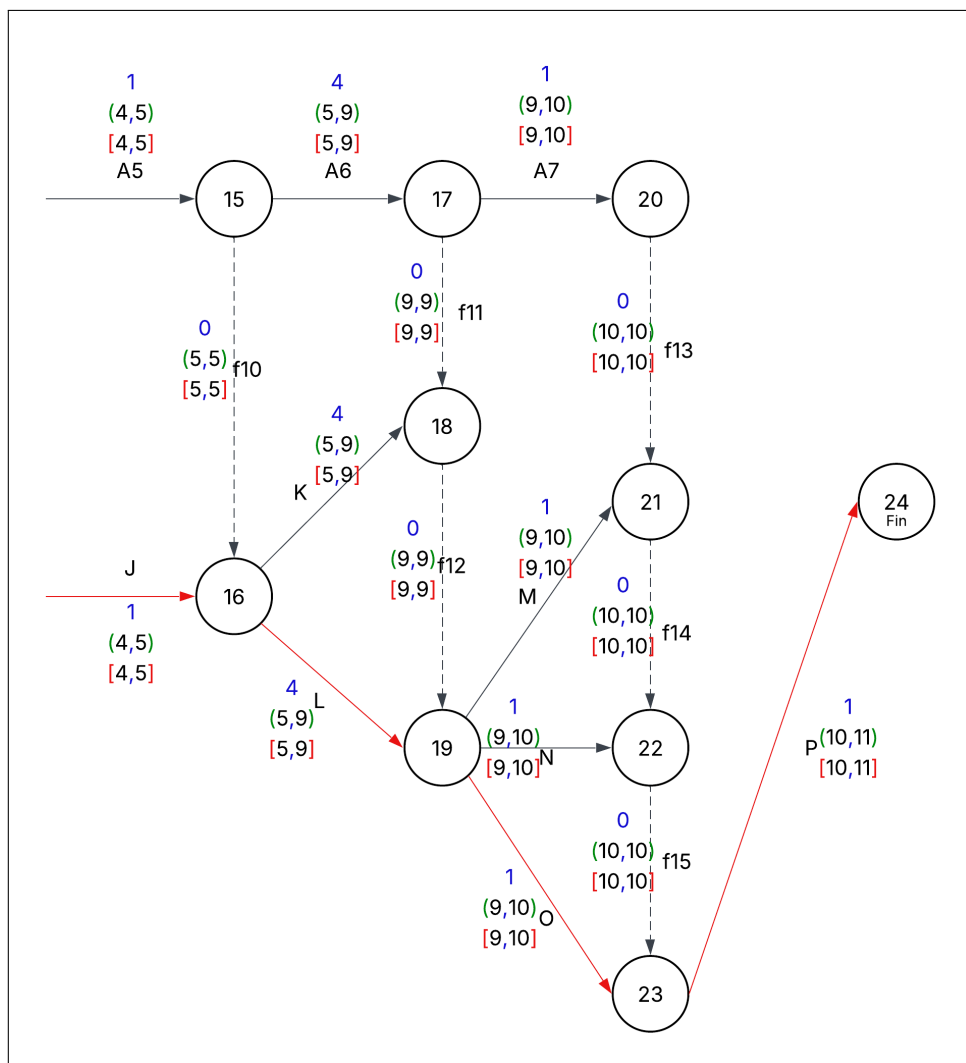


Figura 3.8: Sección 2 del diagrama de Pert Simple del trabajo terminal FLUVI.

Gracias a este nuevo diagrama apodemos visualizar mejor la información y proceder a calcular la tabla de Holguras y tiempos siguiente:

Actividad	Dij	TIP	TTP	TIL	TTL	HT	HL
A1	1	0	1	0	1	0	0
A2	1	1	2	1	2	0	0
A3	1	2	3	2	3	0	0
A4	1	3	4	3	4	0	0
A5	1	4	5	4	5	0	0
A6	4	5	9	5	9	0	0
A7	1	9	10	9	10	0	0
B	1	0	1	0	1	0	0
C	1	0	1	0	1	0	0
D	1	1	2	1	2	0	0
E	1	1	2	1	2	0	0
F	1	1	2	1	2	0	0
G1	1	1	2	1	2	0	0
G2	1	2	3	2	3	0	0
H	1	2	3	2	3	0	0
I	1	3	4	3	4	0	0
J	1	4	5	4	5	0	0
K	4	5	9	5	9	0	0
L	4	5	9	5	9	0	0
M	1	9	10	9	10	0	0
N	1	9	10	9	10	0	0
O	1	9	10	9	10	0	0
P	1	10	11	10	11	0	0

Tabla 3.4: Tabla de Holguras y Tiempos:

El análisis de la tabla de tiempos y Holguras permite concluir que, en el diagrama PERT resultante, teóricamente cualquier camino podría considerarse como Ruta Crítica, dado que los valores de Holgura Total (HT) y Holgura Libre (HL) son uniformemente de 0 para todas las actividades. No obstante, para fines prácticos de seguimiento y control del proyecto, se ha seleccionado la siguiente Ruta Crítica:

$$\text{Ruta Crítica} = \{A1, A2, A3, I, J, L, O, P\}$$

Donde las duraciones de las actividades en meses son:  $A1 = 1$ ,  $A2 = 1$ ,  $A3 = 1$ ,  $I = 1$ ,  $J = 1$ ,  $L = 4$ ,  $O = 1$  y  $P = 1$ . Por consiguiente, la suma de estas duraciones resulta en una duración total para la Ruta Crítica de:

$$\text{Ruta Crítica} = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 4 + 1 + 1 = 11 \text{ meses.}$$

Por tanto, la duración total del proyecto, según la Ruta Crítica seleccionada, es de 11 meses.

La identificación de una Ruta Crítica de 11 meses en este proyecto implica que cualquier retraso en la ejecución de alguna de las actividades que la componen afectará directamente la duración total del mismo. Por lo tanto, se enfatiza la importancia de asignar una atención prioritaria y una gestión eficiente de los recursos a estas actividades críticas, con el fin de asegurar el cumplimiento de los plazos establecidos para el proyecto.

**Pert Probabilístico:** En esta sección, se desarrollará el análisis PERT Probabilístico, con el objetivo de obtener estimaciones más precisas que contribuyan a una planificación y ejecución óptimas del proyecto. El primer paso es la creación de la Tabla de Tiempos de Tres Puntos:

Gracias a esta tabla podemos calcular la duración esperada de cada actividad (Tiempo Esperado ( $t_e$ )) utilizando la siguiente fórmula [31]:

$$t_e = \frac{a + 4m + b}{6}$$

donde  $a$  es la duración optimista,  $m$  es la duración más probable y  $b$  es la duración pesimista. Adicionalmente, podemos calcular la Varianza ( $\sigma^2$ ) de la duración de cada actividad con la siguiente fórmula, también presentada en [31]:

$$\sigma^2 = \left( \frac{b - a}{6} \right)^2$$

Con estos valores de  $t_e$  y la Varianza ( $\sigma^2$ ) proporcionada, podemos observar los resultados de estos cálculos en el siguiente esquema:

De esta manera, podemos ahora proceder al cálculo de la Ruta Crítica, el valor esperado para cada evento, su Media( $\mu$ ) y su Varianza ( $\sigma$ ). Los resultados de estos cálculos se presentan a continuación en la siguiente tabla:

Gracias al análisis PERT Probabilístico, se ha determinado un tiempo estimado de 11.123 meses para la realización del proyecto. Considerando un promedio de 17 días hábiles por mes y una dedicación mínima de 2 horas diarias por cada día hábil, se obtiene el siguiente cálculo de horas-hombre[31]:

$$11,123 \text{ meses} \times 17 \frac{\text{días hábiles}}{\text{mes}} \times 2 \frac{\text{horas-hombre}}{\text{día}} = 378,182 \text{ horas-hombre}$$

En consecuencia, se concluye que se requiere un mínimo de 378.182 horas-hombre para que la ejecución del proyecto sea factible.

## Cálculo de la Distribución de Probabilidad Normal del Proyecto

Mediante este análisis, se pueden calcular diversas probabilidades que podrían asistir en la toma de decisiones más efectivas con relación al tiempo de ejecución del proyecto. A continuación, se plantean algunas de ellas y se realizará una comparación de dichos resultados. Haciendo uso de la fórmula[30]:

$$ProbabilidadNormal = Z = \frac{x - \mu_i}{\sigma_i}$$

Obtenemos,

- **Probabilidad de que el proyecto termine en 11 meses:**

$$Z = \frac{11 - 11,123}{0,70586} = -0,174$$

Evaluando en la tabla de distribución Z (3.9), este valor equivale a 0.5675 o 56.75 % de probabilidad

- **Probabilidad de que el proyecto termine en 10 meses:**

$$Z = \frac{10 - 11,123}{0,70586} = -1,59$$

Evaluando en la tabla de distribución Z (3.9), este valor equivale a 0.9441 o 94.41 % de probabilidad

- **Probabilidad de que el proyecto termine en 7.5 meses:**

$$Z = \frac{7,5 - 11,123}{0,70586} = -5,132$$

Evaluando en la tabla de distribución Z (3.9), este valor equivale a 1.0 o 100 % de probabilidad de N

- **Probabilidad de que el proyecto termine en 12 meses:**

$$Z = \frac{12 - 11,123}{0,70586} = 1,242$$

Evaluando en la tabla de distribución Z (3.9), este valor equivale a 0.8925 o 89.25 % de probabilidad

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.5	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998

Figura 3.9: Imagen de la Tabla consultada de la Distribución Normal (Tabla Z) consultada en el repositorio virtual de la Universidad de Murcia[1].

Comparando los resultados obtenidos, se estableció como apropiado un lapso de desarrollo de las actividades del proyecto de 12 meses empezando desde Enero del presente. Esta duración permite un margen de aproximadamente el 10 %, el cual, para este proyecto, se justifica debido a la necesidad de una mayor flexibilidad, la consideración de los riesgos potenciales de la siguiente sección, y la capacidad de adaptación a cambios inesperados, facilitando así una gestión más ágil y efectiva del proyecto.

**PERT Costo:** En el análisis PERT Costo, un aspecto crucial fue el ajuste estratégico de las Holguras de las actividades en función de las necesidades y conveniencia del proyecto. La justificación detallada de estas modificaciones específicas en las Holguras se presenta en la tabla siguiente:

Para comprender la variación en los costos del proyecto bajo diferentes escenarios de aceleración, la siguiente tabla presenta la justificación detallada de los costos asociados tanto al escenario de operación normal como al escenario de operación intensificada para cada actividad identificada.



### 3.1.10. Análisis de Riesgos del Proyecto

La siguiente figura muestra la matriz de probabilidad e impacto, que nos ayuda a priorizar los riesgos del proyecto al evaluar la probabilidad de que ocurran y su impacto potencial en los objetivos del proyecto, permitiendo así enfocar los esfuerzos en los riesgos más críticos.

Probability and Impact Matrix										
Probability	Threats					Opportunities				
<b>0.90</b>	0.05	0.09	0.18	0.36	0.72	0.72	0.36	0.18	0.09	0.05
<b>0.70</b>	0.04	0.07	0.14	0.28	0.56	0.56	0.28	0.14	0.07	0.04
<b>0.50</b>	0.03	0.05	0.10	0.20	0.40	0.40	0.20	0.10	0.05	0.03
<b>0.30</b>	0.02	0.03	0.06	0.12	0.24	0.24	0.12	0.06	0.03	0.02
<b>0.10</b>	0.01	0.01	0.02	0.04	0.08	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01
	0.05/ Very Low	0.10/ Low	0.20/ Moderate	0.40/ High	0.80/ Very High	0.80/ Very High	0.40/ High	0.20/ Moderate	0.10/ Low	0.05/ Very Low

Impact (numerical scale) on an objective (e.g., cost, time, scope or quality)

Each risk is rated on its probability of occurring and impact on an objective if it does occur. The organization's thresholds for low, moderate or high risks are shown in the matrix and determine whether the risk is scored as high, moderate or low for that objective.

Figura 3.10: Matriz de probabilidad e Impacto[2].

## Identificación de Riesgos

Después de realizar un análisis exhaustivo de los riesgos asociados con el desarrollo e implementación del sistema, nuestro equipo ha llegado a las siguientes conclusiones:

### 1. Viabilidad del Proyecto:

- **Realizable y Rentable:** El proyecto es viable y puede ser implementado con éxito. A pesar de los riesgos identificados, la rentabilidad proyectada para la empresa independiente es favorable.

### 2. Monitoreo y Mitigación Continuos:

- **Monitoreo Regular:** Es crucial mantener un monitoreo constante de los riesgos identificados. Esto incluye revisiones periódicas y ajustes en las estrategias de mitigación según sea necesario.
- **Plan de Respuesta a los Riesgos:** Cada riesgo de severidad alta y media identificado cuenta con un plan de contingencia específico que debe ser revisado y actualizado regularmente para garantizar su efectividad.

Nuestro análisis muestra que, aunque existen riesgos significativos, estos pueden ser gestionados adecuadamente con estrategias de mitigación bien definidas y un monitoreo continuo.

## Análisis Cualitativo de Riesgos

Con base en los riesgos identificados, se desarrolla la siguiente tabla:

La tabla presenta un análisis cualitativo de riesgos identificados en un proyecto, evaluando cada riesgo mediante su probabilidad e impacto en una escala de 1 a 5 para determinar su severidad (Baja, Media o Alta). Además, se describe la causa principal de cada riesgo y se propone un plan de contingencia específico, categorizando finalmente cada riesgo con un semáforo de color (Verde, Amarillo o Rojo) para visualizar su nivel de criticidad[2].

## Análisis Cuantitativo de Riesgos

El análisis cuantitativo de riesgos fue realizado con el objetivo de estimar de forma numérica el impacto que los riesgos identificados pueden tener sobre el cumplimiento de los objetivos del proyecto, particularmente en lo relacionado con los tiempos de entrega.

Como resultado de este proceso, y de acuerdo con los cálculos detallados en la Subsección 3.1.9, se concluyó que el proyecto presenta un **89.25 % de probabilidad de completarse dentro del plazo previsto**. Este valor representa un nivel de confiabilidad aceptable, especialmente al considerar que las medidas de mitigación y respuesta ante riesgos críticos ya han sido diseñadas e integradas al Plan de Respuesta a los Riesgos. La flexibilidad otorgada por la inclusión de un mes adicional en la planificación inicial (como se justifica en la mencionada Subsección 3.1.9) contribuye significativamente a este nivel de confianza. Sin embargo, también se identificó un **10.75 % de probabilidad de que el proyecto no logre concluirse en el tiempo previsto**.

Por ello, se enfatiza la importancia de mantener una supervisión constante del avance, así como la activación oportuna de los Planes de Respuesta a los Riesgos establecidos, con el fin de maximizar la probabilidad de éxito del proyecto en términos de cumplimiento de plazos.

## Plan de Respuesta a los Riesgos

### R2 - Conflictos de Comunicación

**Descripción del Plan de Respuesta:** Se busca reducir malentendidos mediante pautas de comunicación claras y herramientas colaborativas accesibles para todos los integrantes.

**Estrategia de Recuperación:** Establecer reuniones periódicas entre los 3 estudiantes, con seguimiento por parte de los profesores, promoviendo un ambiente respetuoso y abierto.

**Fases de Recuperación:**

1. Identificación del conflicto.
2. Intervención por parte de un estudiante designado o del profesor guía.
3. Establecimiento de acuerdos de comunicación y responsabilidades.

**Ocurrencia del Riesgo:** Malentendidos frecuentes, mensajes confusos o tareas repetidas.

**Activación del Plan:** Ante el primer indicio documentado de falta de entendimiento entre los estudiantes.

**Plan de Contingencia / Respuesta:**

- Designar un canal oficial de comunicación (por ejemplo, Notion o correo institucional).
- Establecer reglas básicas de retroalimentación respetuosa y oportuna.

**Procedimientos:** Reuniones extraordinarias entre estudiantes o con apoyo del profesor guía.

**Prioridad:** Media. Puede comprometer la calidad y coordinación del trabajo.

**Evaluación de Impacto y Riesgo:** Media. Riesgo de retrabajo y pérdida de tiempo.

**Análisis de Impacto:** Desorganización en entregas y avance desigual entre los miembros.

### R3 - Desmotivación del Equipo

**Descripción del Plan de Respuesta:** Fomentar un entorno positivo, equilibrar la carga de trabajo y reconocer los logros individuales.

**Estrategia de Recuperación:** Redistribución de tareas entre estudiantes y diálogo abierto con apoyo del profesor guía.

**Fases de Recuperación:**

1. Identificar señales de desmotivación.
2. Crear un espacio de conversación entre los estudiantes.
3. Ajustar responsabilidades y definir metas a corto plazo.

**Ocurrencia del Riesgo:** Quejas sobre exceso de tareas, pérdida de interés o ausencias.

**Activación del Plan:** Cuando se perciba desmotivación directa o indirecta.

**Plan de Contingencia / Respuesta:**

- Pausas activas o ajustes temporales en la carga de trabajo.
- Reforzar la motivación con reconocimiento en reuniones internas.

**Procedimientos:** Encuestas breves, diálogo entre estudiantes y evaluación informal con los profesores.

**Prioridad:** Media. El rendimiento colectivo depende del ánimo de todos.

**Evaluación de Impacto y Riesgo:** Alta. Posible retraso en entregas clave.

**Análisis de Impacto:** Reducción del ritmo de trabajo y posibles conflictos internos.

## R5 - Ausencia de un Integrante en la Presentación Final

**Descripción del Plan de Respuesta:** Asegurar que todos los estudiantes conozcan el contenido general para cubrir cualquier ausencia inesperada.

**Estrategia de Recuperación:** Preparar ensayos rotativos y dominio compartido de los temas.

### Fases de Recuperación:

1. Identificar los temas más críticos de la presentación.
2. Garantizar que los tres estudiantes estén familiarizados con todo el contenido.
3. Realizar prácticas con roles intercambiables.

**Ocurrencia del Riesgo:** Ausencia de un estudiante el día de la presentación por motivos de fuerza mayor.

**Activación del Plan:** Confirmación de la imposibilidad de asistencia.

### Plan de Contingencia / Respuesta:

- Uso de una grabación del estudiante ausente (si aplica).
- Reasignación rápida del contenido al resto del equipo.

**Procedimientos:** Ensayos previos con distribución flexible de roles.

**Prioridad:** Media. La presentación es clave en la evaluación final.

**Evaluación de Impacto y Riesgo:** Alta. Puede afectar directamente la calificación.

**Análisis de Impacto:** Dificultad para comunicar todo el trabajo si no hay reemplazo adecuado.

## R7 - Fallas Técnicas Durante la Presentación

**Descripción del Plan de Respuesta:** Minimizar el riesgo mediante pruebas técnicas previas y respaldos funcionales.

**Estrategia de Recuperación:** Disponer de computadora alterna, versiones portables y material de apoyo.

### Fases de Recuperación:

1. Verificar el funcionamiento del equipo con anticipación.
2. Tener backups del sistema, presentación y videos demostrativos.
3. Estar preparados para cambiar de equipo si es necesario.

**Ocurrencia del Riesgo:** Fallas técnicas durante la presentación.

**Activación del Plan:** Ante cualquier falla sin solución inmediata.

### Plan de Contingencia / Respuesta:

- Cambio a un equipo de respaldo o presentación offline.
- Continuar la exposición con recursos auxiliares.

**Procedimientos:** Pruebas técnicas previas y checklist de verificación.

**Prioridad:** Media. Aunque afecta la presentación, no compromete el contenido.

**Evaluación de Impacto y Riesgo:** Media. Puede generar tensión y retrasos.

**Análisis de Impacto:** Pérdida de fluidez y posible mala percepción del proyecto.

## R8 - Conflictos en la Integración del Código

**Descripción del Plan de Respuesta:** Usar herramientas de control de versiones y pruebas continuas para evitar errores al unir código.

**Estrategia de Recuperación:** Trabajo colaborativo en Git, integración frecuente y revisión entre pares.

### Fases de Recuperación:

1. Definir ramas por funcionalidad.
2. Realizar integraciones graduales.
3. Validar el funcionamiento general antes de cada entrega.

**Ocurrencia del Riesgo:** Conflictos al integrar componentes del sistema.

**Activación del Plan:** Al detectar errores de integración o mal funcionamiento.

### Plan de Contingencia / Respuesta:

- Revisión detallada del código antes del merge.
- Asignar a un estudiante como responsable de integración temporal.

**Procedimientos:** Uso de pull requests, revisiones cruzadas y pruebas automatizadas básicas.

**Prioridad:** Alta. El sistema podría no funcionar correctamente.

**Evaluación de Impacto y Riesgo:** Alta. Riesgo de retrasos importantes.

**Análisis de Impacto:** Posible pérdida de avances si no se detectan errores a tiempo.

### 3.1.11. Estudio de Factibilidad

#### Análisis de Factibilidad Técnica

Dentro de este apartado se explican detalladamente las tecnologías que se utilizarán, así como las características de nuestros equipos de cómputo actualmente. La elección de estas herramientas estuvo basada tanto en las tecnologías que más se utilizan en la actualidad.

Equipo de cómputo ideal	
Procesador	Intel i5 de 6ta generación o equivalente AMD
Tarjeta de video	NVIDIA RTX 3080 10Gb
Memoria RAM	8Gb
Disco duro	256Gb SSD

Tabla 3.12: Equipo de cómputo ideal

En la tabla anterior se muestra el equipo que requeriríamos para poder trabajar sin mayor dificultad al momento de realizar simulaciones.

Herramientas de Software a utilizar	
Sistema Operativo	Linux, Mac, Windows
Navegador Web	Google Chrome, Brave, Opera, Firefox
Lenguaje de Programación	Java, Html, CSS

Tabla 3.13: Herramientas de software a utilizar

Además de las herramientas de software a utilizar, es necesario mencionar el equipo de hardware que se utiliza, tanto para desarrollar, como para probar a lo largo de este trabajo terminal.

<b>Equipo de cómputo 1.</b>	
Procesador	Ryzen 5 3600
Tarjeta de video	Amd Radeon Rx580
Memoria RAM	32 Gb
Disco duro	1Tb HDD y 512Gb SSD

Tabla 3.14: Equipo de cómputo 1

<b>Equipo de cómputo 2.</b>	
Marca	Apple
Modelo	iMac Late 2012
Procesador	Intel Core i5
Tarjeta de video	NVIDIA GeForce GT 640M 512 Mb
Memoria RAM	8 Gb
Disco duro	1Tb y 256 Gb SSD

Tabla 3.15: Equipo de cómputo 2

<b>Equipo de cómputo 3.</b>	
Procesador	Amd FX-8350
Tarjeta de video	Nvidia Geforce 1050ti
Memoria RAM	16 Gb
Disco duro	1Tb HDD

Tabla 3.16: Equipo de cómputo 3

Junto con las herramientas de hardware y software a utilizar es necesario mencionar la luz eléctrica e internet como servicios básicos en la elaboración del proyecto y por eso mismo generan un costo.

### Análisis de Factibilidad Operativa

<b>Horas a trabajar en el desarrollo del trabajo terminal</b>					
<b>Mes</b>	<b>No. de Días</b>	<b>Sábado y Domingo</b>	<b>Días hábiles</b>	<b>Horas de trabajo por día</b>	<b>Horas Totales</b>
Enero	31	8	20	2	40
Febrero	28	8	20	2	40
Marzo	31	9	20	2	40
Abril	30	8	15	2	30
Mayo	31	9	19	2	38
Junio	30	9	21	2	42
Julio	31	10	19	2	38
Agosto	31	10	21	2	42
Septiembre	30	8	20	2	40
Octubre	31	8	20	2	40
Noviembre	30	10	18	2	36
Diciembre	31	9	15	2	30

Tabla 3.17: Relación de horas de trabajo estimadas para la realización de este trabajo terminal

Considerando el análisis PERT Probabilístico, el desarrollo del proyecto se estima en 11.123 meses, lo que representa un mínimo de 378.182 horas-hombre requeridas, tal como se detalla en la Subsección 3.1.9. No obstante, con el fin de proporcionar mayor flexibilidad y robustez al cronograma, se estableció un plazo de 12 meses para el proyecto. Este plazo ampliado permite contar con un total de 408 horas-hombre disponibles para el equipo, calculado de la siguiente manera:

$$12 \text{ meses} \times 17 \frac{\text{días hábiles}}{\text{mes}} \times 2 \frac{\text{horas-hombre}}{\text{día}} = 408 \text{ horas-hombre}$$

En consecuencia, se concluye que el tiempo asignado al proyecto es suficiente, ya que las 426 horas disponibles superan el mínimo estimado de 408 horas-hombre, ofreciendo un margen para la gestión efectiva de las actividades del equipo.

### **Análisis de Factibilidad Económica**

El análisis PERT Costo 3.1.9 aplicado al desarrollo del presente prototipo revela distintos escenarios económicos en función de la duración total del proyecto. Se identificaron cuatro puntos clave en la relación tiempo-costo, arrojando los siguientes costos totales estimados para diferentes plazos de ejecución:

- Costo para una duración de 11 meses: 30,278.5 MXN.
- Costo para una duración de 12 meses: 33,232.5 MXN.
- Costo para una duración de 7.5 meses: 46,894.5 MXN.
- Costo para una duración de 10 meses: 32,755.5 MXN.

Los costos derivados del análisis PERT Costo para el desarrollo del prototipo FLUVI bajo diferentes plazos de ejecución (11, 12, 7.5 y 10 meses) proporcionan una base económica crucial para evaluar su viabilidad. Estos valores reflejan la inversión necesaria según el cronograma deseado, permitiendo a potenciales desarrolladores comprender el desembolso requerido en función de las restricciones de tiempo del proyecto.

Adicionalmente a la inversión directa en el desarrollo, se identifican costos operativos a considerar. Actualmente, se estima un gasto mensual de \$200 MXN por concepto de energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos. En una posible implementación en la nube (como trabajo futuro), se deberían presupuestar los costos asociados a plataformas como Azure, los cuales dependerán de los recursos de almacenamiento y procesamiento requeridos.

Si bien el uso de tecnologías de código abierto minimiza los gastos en licencias de software, es importante prever posibles costos futuros relacionados la escalabilidad de la infraestructura en caso de una mayor adopción del modelo. La exploración de acuerdos con instituciones podría mitigar estos gastos y asegurar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo, maximizando a su vez los beneficios indirectos derivados del análisis del tráfico urbano.

Actividad	a	m	b	Descripción de trabajo
A1	0.75	1	1.5	La duración mínima de 0.75 meses es necesaria para establecer la estructura inicial del Reporte Técnico, seleccionar herramientas de documentación y redactar la introducción, permitiendo la identificación temprana de requerimientos de información. La duración máxima de 1.5 meses permite ajustes, revisiones iterativas, incorporación de retroalimentación y alineación con otros avances del proyecto, asegurando la calidad y coherencia del Reporte Técnico.
A2	0.75	1	1.5	El tiempo mínimo de 0.75 meses para A2 se justifica en la expansión del Reporte Técnico, agregando detalles de metodología y diseño conceptual. El tiempo máximo de 1.5 meses contempla retrasos en la obtención de información, ajustes en la metodología y revisiones para asegurar la claridad del reporte.
A3	0.75	1	1.5	La duración mínima de 0.75 meses para A3 se basa en la planificación inicial y redacción de secciones adicionales del Reporte Técnico. La duración máxima de 1.5 meses maneja la complejidad de integrar información técnica y asegurar la coherencia del Reporte.
I	0.5	1	1.5	Se estima un tiempo mínimo de 0.5 meses para el desarrollo inicial de casos de uso y especificación de requisitos funcionales. El tiempo máximo de 1.5 meses permite la iteración y refinamiento de los casos de uso y requisitos.
J	0.5	1	1.5	El tiempo mínimo de 0.5 meses se asigna a la preparación y ejecución de la primera evaluación del Trabajo Terminal. El tiempo máximo de 1.5 meses contempla ajustes adicionales en la documentación y preparación de informes.
L	3	4	5	Se estima un tiempo mínimo de 3 meses para la implementación inicial de métricas y estadísticas. El tiempo máximo de 5 meses permite la implementación de métricas avanzadas, integración con la interfaz, validación y documentación.
O	0.75	1	1.25	Se asigna un tiempo mínimo de 0.75 meses para la preparación y ejecución del despliegue del sistema. El tiempo máximo de 1.25 meses contempla problemas de configuración, ajustes en el entorno y documentación.
P	0.5	1	1.5	Se estima un tiempo mínimo de 0.5 meses para la preparación y ejecución de la segunda evaluación del Trabajo Terminal. El tiempo máximo de 1.5 meses permite pruebas exhaustivas, recopilación y análisis de retroalimentación, e informes finales.

Tabla 3.5: Tabla de Tiempos de Tres Puntos del trabajo terminal FLUVI.

Actividad	te	Varianza "V"
A1: 1→2	1.041	0.015625
A2: 2→5	1.041	0.015625
A3: 5→10	1.041	0.015625
f7 (ficticia): 10→11	0	0
f8 (ficticia): 11→12	0	0
I: 12→14	1	0.027777
J: 14→16	1	0.027777
L: 16→19	4	0.111111
O: 19→23	1	0.006944
P: 23→4	1	0.027777

Tabla 3.6: Tabla de Parámetros de las actividades del proyecto.



Evento	Ruta más larga	Valor esperado	$V$	$\sqrt{V}$
1	-	-	-	-
2	1,2	1.041	0.015625	0.125
3	1,2,3	1.041	0.015625	0.125
4	1,2,3,6	2.082	0.03125	0.176776
5	1,2,3,6,7	2.082	0.03125	0.176776
6	1,2,3,6,7,8	2.082	0.03125	0.176776
7	1,2,3,6,7,8,9	2.082	0.03125	0.176776
8	1,2,3,6,7,8,9,11	3.123	0.046875	0.21650
9	1,2,3,6,7,8,9,11,12	3.123	0.046875	0.21650
10	1,2,3,6,7,8,9,11,12,14	4.123	0.074652	0.27322
11	1,2,3,6,7,8,9,11,12,14,16	5.123	0.102429	0.32004
12	1,2,3,6,7,8,9,11,12,14,16,18	9.123	0.21354	0.46210
13	1,2,3,6,7,8,9,11,12,14,16,18,19	9.123	0.21354	0.46210
14	1,2,3,6,7,8,9,11,12,14,16,18,19,21	10.123	0.22048	0.46955
15	1,2,3,6,7,8,9,11,12,14,16,18,19,22	10.123	0.22048	0.46955
16	1,2,3,6,7,8,9,11,12,14,16,18,19,22,23	10.123	0.22048	0.46955
17	1,2,3,6,7,8,9,11,12,14,16,18,19,22,23,24	11.123	0.49825	0.70586

Tabla 3.7: Tabla de Tiempos del trabajo terminal FLUVI.

Actividad	Tiempo normal(meses)	Costo en MXN	Tiempo intensificado (meses)	Costo 2 en MXN	Costo 3 en MXN
A1	1	\$ 2,954	0.75	\$ 5,908	-
A2	1	\$ 2,954	0.75	\$ 4,954	-
A3	1	\$ 2,215.5	0.75	\$ 3,715.5	-
I	1	\$ 4,431	0.5	\$ 5,431	\$ 1,000
J	1	\$ 1,477	0.5	\$ 2,954	\$ 1,477
L	4	\$ 11,816	3	\$ 17,724	-
O	1	\$ 2,954	0.75	\$ 3,254	-
P	1	\$ 1,477	0.5	\$ 2,954	-
Totales	-	\$ 30,278.5	-	\$ 46,894.5	\$ 32,755.5
Ah	1	\$ 2,954	0.75	\$ 5,908	-
Totales con holgura	-	\$ 33,232.5	-	\$ 52,894.5	\$ 32,755.5

Tabla 3.8: Tabla comparativa de costos y tiempos del trabajo terminal FLUVI.

<b>Actividad</b>	<b>Justificación de costo normal</b>	<b>Justificación de costo intensificado</b>
A1	Se estima una dedicación de 40 horas (20 días hábiles * 2 horas/día) de un ingeniero con un costo por hora de \$73.85 MXN, resultando en un costo de \$2954 MXN (40 horas * \$73.85/hora) para la elaboración de la parte inicial del reporte técnico.	Para una entrega más rápida, se podría requerir la dedicación de un segundo ingeniero por el mismo periodo, duplicando el costo a aproximadamente \$5908 MXN, o bien, extender las horas de trabajo del ingeniero principal, incurriendo en posibles costos por tiempo extra.
A2	Similar a febrero, se proyectan 40 horas de trabajo (20 días hábiles * 2 horas/día) de un ingeniero a \$73.85 MXN/hora, con un costo estimado de \$2954 MXN para la continuación del reporte técnico.	Una intensificación podría implicar la asignación de un asistente de investigación para apoyar en la recopilación y análisis de información, añadiendo un costo adicional estimado de \$2000 MXN (suponiendo 27 horas a un costo menor).
A3	Se contemplan 30 horas de trabajo (15 días hábiles * 2 horas/día) de un ingeniero, generando un costo de \$2215.5 MXN (30 horas * \$73.85/hora) para la finalización del reporte técnico.	Para acelerar la finalización, se podría contratar un editor técnico externo por un costo estimado de \$1500 MXN para revisar y dar formato al reporte.

Actividad	Justificación de costo normal	Justificación de costo intensificado
B	Se estima que la elaboración del estado del arte requerirá 60 horas de investigación y redacción (aproximadamente 3 semanas), con un costo asociado de \$4431 MXN (60 horas * \$73.85/hora) del tiempo del ingeniero.	Para una elaboración más rápida, se podría dividir la investigación entre dos personas, incurriendo en un costo aproximado de \$5908 MXN (40 horas/persona * \$73.85/hora).
C	La investigación inicial sobre autómatas celulares se estima en 50 horas, con un costo de \$3692.5 MXN (50 horas * \$73.85/hora) del tiempo del investigador.	Una intensificación podría implicar la compra de bibliografía especializada o acceso a bases de datos con un costo adicional estimado de \$1000 MXN.
D	Se prevén 30 horas para la definición clara de objetivos, alcance y requerimientos, con un costo de \$2215.5 MXN (30 horas * \$73.85/hora) del tiempo del equipo.	Para asegurar la alineación con stakeholders, se podrían programar reuniones adicionales con un costo estimado de \$500 MXN por concepto de viáticos o recursos de comunicación.
E	La formulación de la solución se estima en 70 horas de trabajo técnico, con un costo de \$5169.5 MXN (70 horas * \$73.85/hora) del ingeniero de desarrollo.	Una intensificación podría requerir la consulta con un experto externo en la materia por un costo estimado de \$3000 MXN por sus honorarios.
F	Se calculan 40 horas para la evaluación y selección de las tecnologías y herramientas, con un costo de \$2954 MXN (40 horas * \$73.85/hora) del analista de sistemas.	Para una decisión más rápida, se podría contratar una licencia temporal de una herramienta de análisis comparativo por un costo de \$800 MXN.
G	El diseño de la arquitectura del sistema requerirá aproximadamente 80 horas de trabajo del arquitecto de software, con un costo de \$5908 MXN (80 horas * \$73.85/hora).	Una intensificación podría implicar la utilización de herramientas de modelado avanzadas con un costo de suscripción temporal de \$1200 MXN.
H	Se estiman 30 horas para el análisis de factibilidad, con un costo de \$2215.5 MXN (30 horas * \$73.85/hora) del gestor del proyecto.	Para una evaluación más exhaustiva, se podría contratar un consultor externo en factibilidad por un costo estimado de \$2500 MXN.
I	Se prevén 60 horas para esta actividad, con un costo de \$4431 MXN (60 horas * \$73.85/hora) del analista de requisitos.	Una intensificación podría requerir la realización de talleres adicionales con usuarios, generando costos de logística y tiempo adicional estimado en \$1000 MXN.
J	Se estiman 20 horas para la evaluación inicial del trabajo terminal, con un costo de \$1477 MXN (20 horas * \$73.85/hora) del tiempo de revisión.	Para una retroalimentación más rápida, se podría involucrar a un segundo revisor, duplicando el costo a \$2954 MXN.
K	Se calculan 90 horas para el desarrollo de la interfaz de usuario, con un costo de \$6646.5 MXN (90 horas * \$73.85/hora) del desarrollador front-end.	Una intensificación podría implicar la contratación de un diseñador UI/UX freelance por un costo adicional estimado de \$4000 MXN.
L	Se estiman 160 horas para la implementación de métricas y estadísticas, con un costo de \$11816 MXN (160 horas * \$73.85/hora) del ingeniero de desarrollo.	Para acelerar esta implementación, se podría asignar un segundo desarrollador por 80 horas, añadiendo un costo de \$5908 MXN.

Actividad	Justificación de costo normal	Justificación de costo intensificado
M	Se prevén 50 horas para la ejecución de pruebas unitarias, con un costo de \$3692.5 MXN (50 horas * \$73.85/hora) del tester.	Una intensificación podría requerir la utilización de herramientas de automatización de pruebas con una licencia temporal de \$500 MXN.
N	Se estiman 80 horas para la generación de la documentación, con un costo de \$5908 MXN (80 horas * \$73.85/hora) del escritor técnico.	Para una entrega más rápida, se podría contratar un corrector de estilo externo por un costo de \$1000 MXN.
O	Se calculan 40 horas para el despliegue del sistema, con un costo de \$2954 MXN (40 horas * \$73.85/hora) del ingeniero de DevOps.	Una intensificación podría implicar la utilización de servicios extra de luz, pues se tendrá un tiempo de utilización mayor de este servicio promedio de \$300 MXN.
P	Se estiman 20 horas para la evaluación final del trabajo terminal, con un costo de \$1477 MXN (20 horas * \$73.85/hora) del tiempo de revisión.	Similar a la primera evaluación, se podría involucrar a un segundo revisor, duplicando el costo a \$2954 MXN.

Tabla 3.9: Justificación de costos de tiempo normal e intensificado para las actividades del proyecto.

ID	Riesgo	Descripción del Riesgo
R1	Habilidades deficientes	Los miembros del equipo pueden carecer de habilidades avanzadas en programación o gestión de proyectos.
R2	Conflictos de comunicación	Malentendidos entre los miembros del equipo debido a la falta de comunicación clara.
R3	Desmotivación del equipo	La carga de trabajo excesiva o la falta de reconocimiento pueden desmotivar al equipo.
R4	Pérdida o fallecimiento de un integrante clave	El fallecimiento o salida inesperada de un miembro del equipo o un director podría afectar gravemente la continuidad del proyecto.
R5	Ausencia de un integrante en la presentación final	Uno de los tres compañeros podría faltar el día de la presentación final por un imprevisto.
R6	Presentación no convincente ante sinodales	El equipo podría no transmitir de manera clara el desarrollo o no responder adecuadamente las preguntas.
R7	Fallas técnicas durante la presentación	Problemas con el equipo de cómputo, proyector o software necesario durante la exposición.
R8	Conflictos en la integración del código desarrollado por el equipo	Cada integrante programa diferentes partes, lo que puede generar errores de compatibilidad o integración.

Tabla 3.10: Riesgos identificados en el proyecto.

ID	Probabilidad (1 - 5)	Impacto (1 - 5)	Consecuencia	Severidad	Descripción de la Consecuencia	Plan de Contingencia	Categoría o Semáforo
R1	2	3	6	Baja	Curva de aprendizaje prolongada y posible dependencia de uno o dos integrantes.	Capacitación previa en temas de autómatas celulares, programación y sistemas complejos.	Verde
R2	3	3	9	Media	Tareas duplicadas, decisiones contradictorias, ambiente de trabajo tenso.	Reuniones semanales y un canal oficial (Notion, correo, reuniones presenciales).	Amarillo
R3	2	4	8	Media	Baja productividad, falta de compromiso.	Reparto equitativo de tareas, reconocimiento de logros y pausas programadas.	Amarillo
R4	1	5	5	Baja	Desorganización temporal o necesidad de redistribuir funciones.	Documentación continua, distribución del conocimiento, respaldo en decisiones.	Verde
R5	2	5	10	Media	Riesgo de no cumplir con los requisitos de evaluación completa.	Ensayos grupales, grabación de respaldo y guion compartido.	Amarillo
R6	2	3	6	Baja	Baja calificación o necesidad de correcciones.	Ensayos previos, preparación de posibles preguntas y revisión del contenido.	Verde
R7	2	4	8	Media	Interrupciones o imposibilidad de mostrar el proyecto.	Pruebas previas, respaldo del proyecto, equipo alterno y versión offline.	Amarillo
R8	4	5	20	Alta	Mal funcionamiento del sistema final, retrasos y necesidad de reestructurar.	Establecer estándares, uso de Git, revisiones cruzadas y pruebas continuas.	Rojo

Tabla 3.11: Análisis de Riesgos del Proyecto

# Capítulo 4

## 4.1. Diseño

### 4.1.1. Arquitectura del Sistema

El sistema FLUVI se diseñó siguiendo la norma ISO/IEC/IEEE 42010 para la descripción de arquitecturas de sistemas y software, la cual establece un marco conceptual para la documentación de arquitecturas mediante vistas y puntos de vista arquitectónicos.

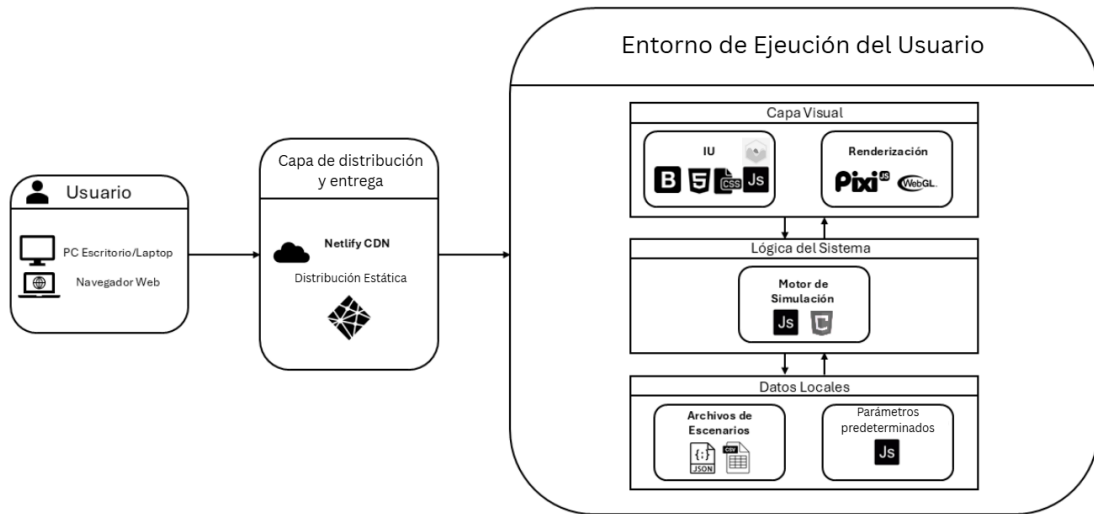


Figura 4.1: Diagrama de arquitectura general del sistema FLUVI

El diagrama de la Figura 4.1 presenta la arquitectura del sistema mediante tres capas claramente diferenciadas que operan en el entorno de ejecución del cliente:

- **Capa Visual (Presentación):** Compuesta por componentes de interfaz de usuario (UI) implementados con Bootstrap, HTML5 y JavaScript, junto con el motor de renderización PixiJS que proporciona aceleración por GPU mediante WebGL. Esta capa gestiona la interacción con el usuario y la visualización de la simulación.
- **Lógica del Sistema:** Contiene el motor de simulación basado en autómatas celulares implementado en JavaScript. Este núcleo procesa las reglas de tráfico, gestiona el estado de los vehículos y calles, y coordina la ejecución de la simulación en tiempo virtual.
- **Datos Locales:** Administra la persistencia mediante almacenamiento local del navegador para preferencias y escenarios guardados, así como archivos JSON para la importación y exportación de configuraciones. Adicionalmente, gestiona estructuras de datos predefinidas con 2 escenarios base del sistema.

La aplicación es distribuida a través de una plataforma CDN (Netlify) que proporciona hosting estático, mientras que en el entorno de desarrollo se utiliza un servidor HTTP local implementado en Python. El usuario accede al sistema mediante un navegador web desde PC, lo que permite una arquitectura completamente cliente-servidor sin requerir procesamiento en el backend.

Esta arquitectura modular facilita el mantenimiento, escalabilidad y la clara separación de responsabilidades entre las diferentes capas del sistema, cumpliendo con los principios de diseño de software establecidos por la norma ISO 42010.

#### 4.1.2. Planificación del mapa

Para el desarrollo del modelo de simulación de tráfico, se llevó a cabo una planificación aproximada del circuito del IPN-ESOCM que representa la zona de estudio.

Primeramente, se obtuvo un mapa esquemático que puede ser observado en la Figura *Mapa completo del modelo*. Este mapa esquemático, si bien muestra la ubicación general de las vialidades, no proporciona la precisión necesaria para la construcción del modelo. Por lo tanto, se buscó una representación visual de las vialidades principales del Instituto Politécnico Nacional (IPN) utilizando Google Maps que representa la disposición de las calles de forma más lineal y simplificada, facilitando la identificación de las conexiones entre las vialidades y la medición de sus longitudes.

A continuación, se procedió a medir la longitud de cada calle utilizando la herramienta de medición de distancia de Google Maps. Para discretizar el mapa en celdas, se consideró un tamaño promedio de 4.5 metros por celda, que corresponde a la longitud aproximada de un automóvil. Dividiendo la longitud de cada calle entre el tamaño de la celda, se obtuvo el número de celdas que representa cada vialidad en el modelo.

Las siguientes figuras muestran el mapa general de la zona de estudio y el detalle de cada calle con su longitud correspondiente:

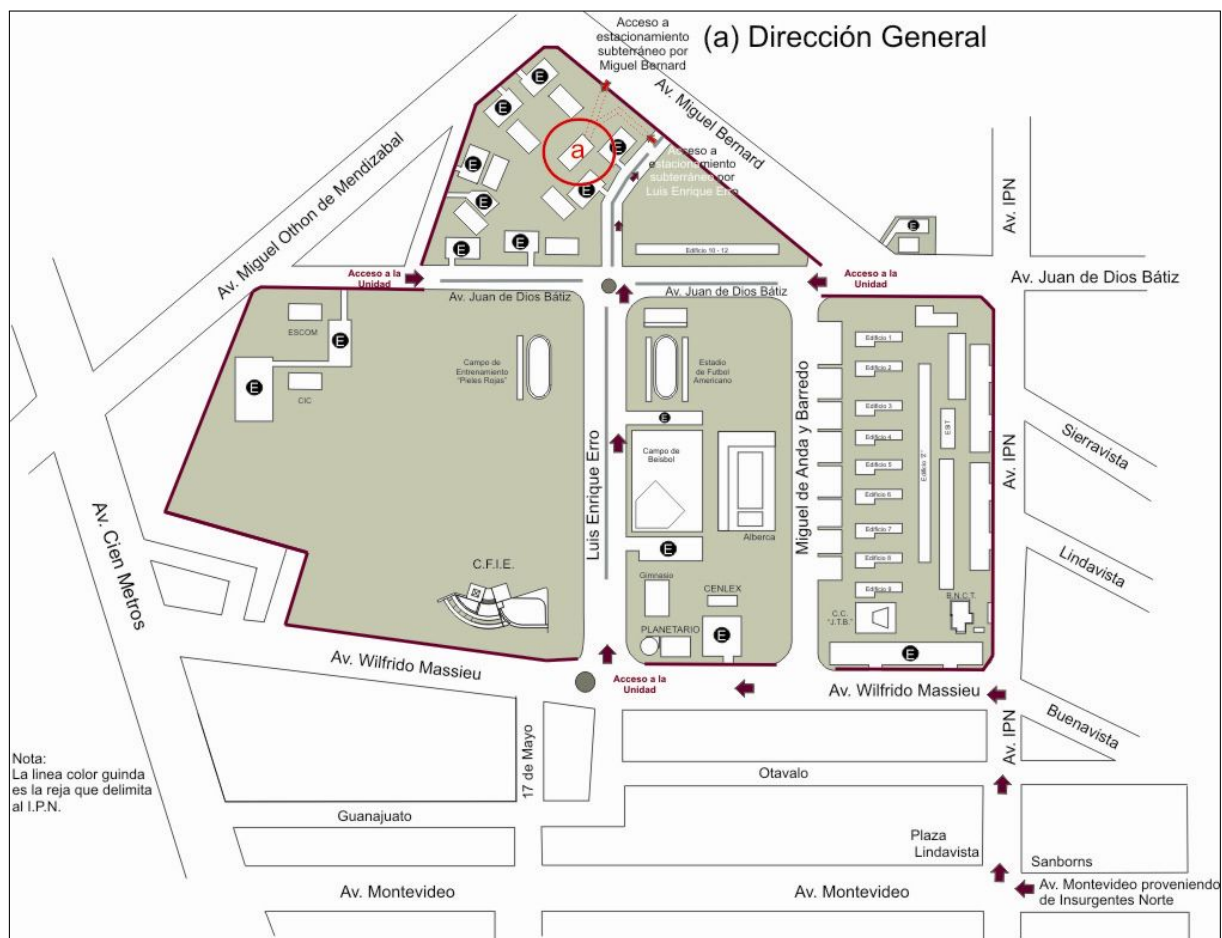


Figura 4.2: Mapa completo del modelo

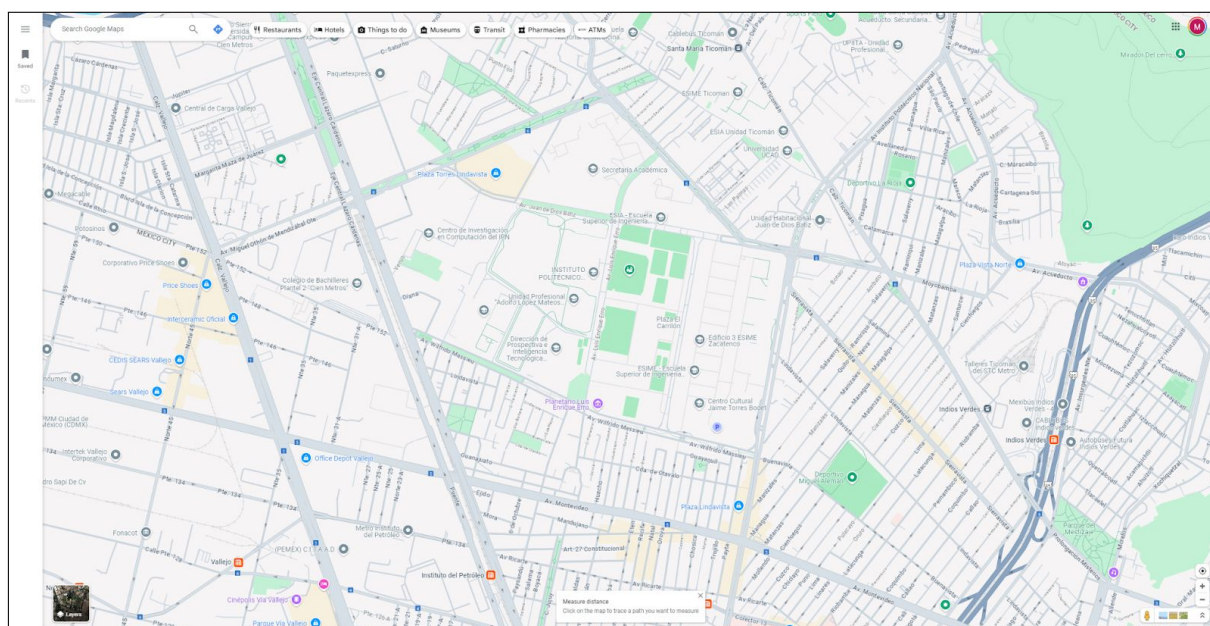


Figura 4.3: Mapa completo en Google Maps del modelo



- **Avenida Miguel Othón de Mendizábal (1.25 km):** Esta avenida conecta la zona norte del IPN con la Avenida Juan de Dios Bátiz, y a través de ella, con la Avenida Wilfrido Massieu. Su longitud en el modelo se representa con 250 celdas. ( $1250 \text{ m} / 5 \text{ m} = 250$ ).

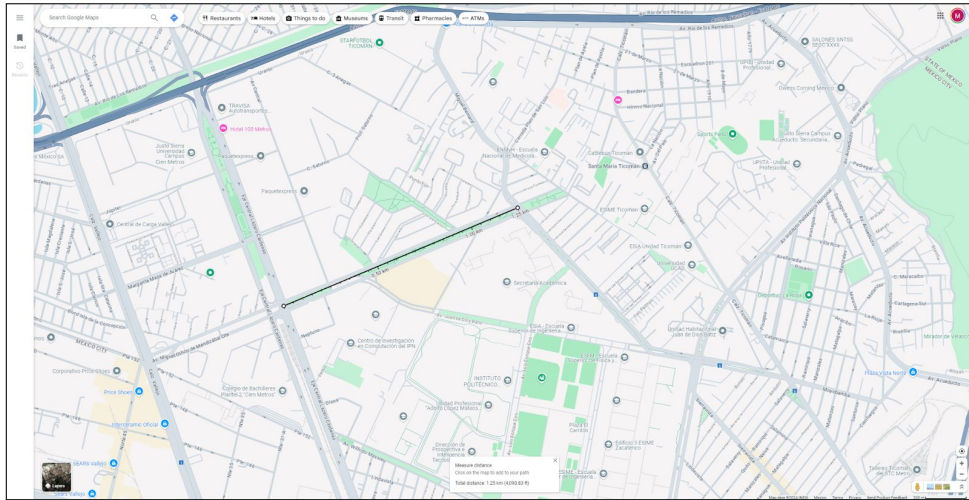


Figura 4.4: Avenida Miguel Othón de Mendizábal desde Google Maps.

- **Avenida Miguel Bernard (0.95 km):** La Avenida Miguel Bernard conecta la zona oeste del IPN con la Avenida Miguel Othón de Mendizábal, y a través de ella, con la Avenida Juan de Dios Bátiz y la Avenida Wilfrido Massieu. En el modelo, se representa con 190 celdas. ( $950 \text{ m} / 5 \text{ m} = 190$ ).

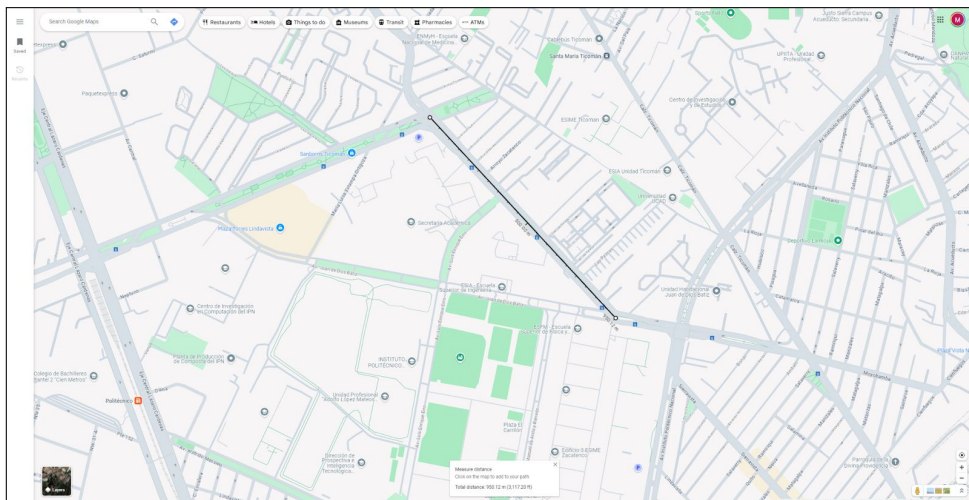


Figura 4.5: Avenida Miguel Bernard desde Google Maps.

- **Avenida IPN (1.60 km):** La Avenida IPN es la vialidad principal que atraviesa el campus de norte a sur, conectando las diferentes unidades académicas. En el modelo, se divide en dos secciones: una que conecta con la Avenida Juan de Dios Bátiz y otra que conecta con la Avenida Montevideo. Su longitud total en el modelo es de 320 celdas. ( $1600 \text{ m} / 5 \text{ m} = 320$ ).

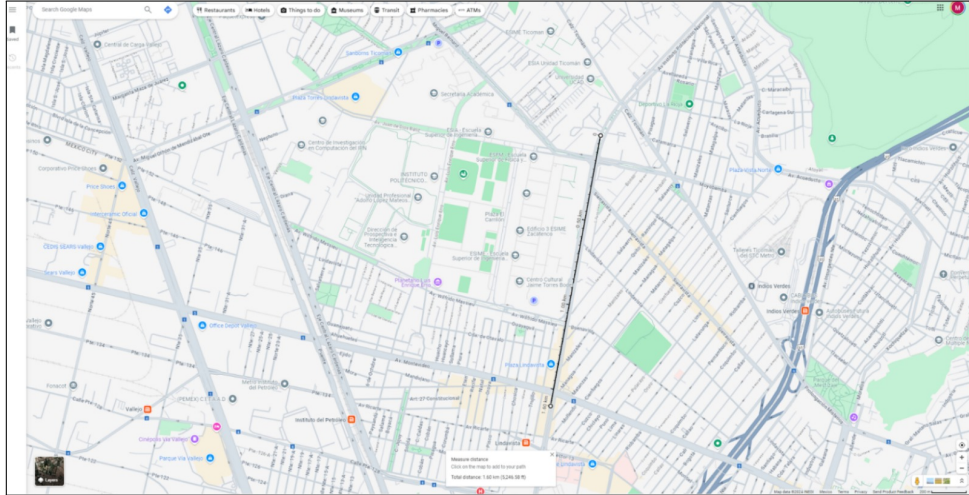


Figura 4.6: Avenida IPN desde Google Maps.

- **Avenida Juan de Dios Bátiz (1.90 km):** Esta avenida bordea la zona norte y centro del IPN y conecta con vialidades importantes como la Avenida IPN, la Avenida Miguel Bernard y la Avenida Miguel Othón de Mendizábal. Se representa en el modelo con 380 celdas. ( $1900 \text{ m} / 5 \text{ m} = 380$ ).

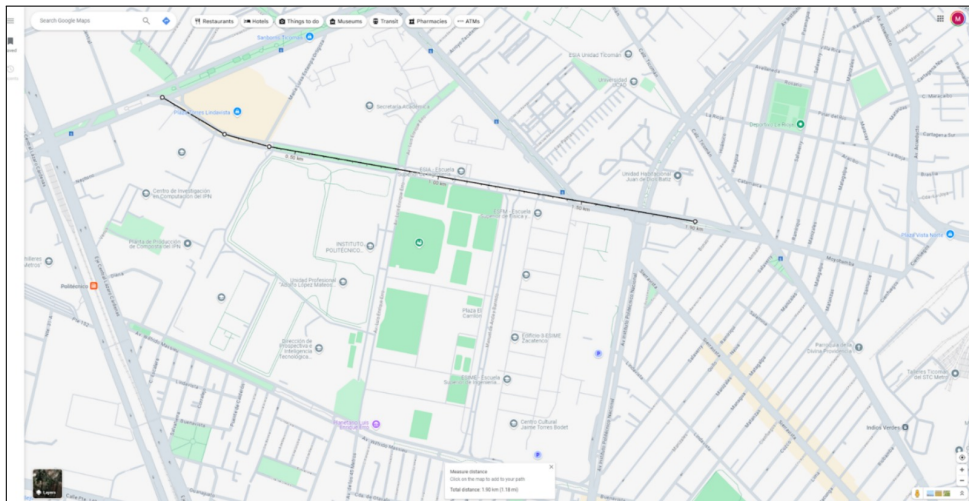


Figura 4.7: Avenida Juan de Dios Bátiz desde Google Maps.



- **Calle Sierravista (0.15 km):** Esta calle conecta la Avenida IPN, facilitando el acceso a la Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”. En el modelo, se representa con 50 celdas. ( $150 \text{ m} / 5 \text{ m} = 50$ ).

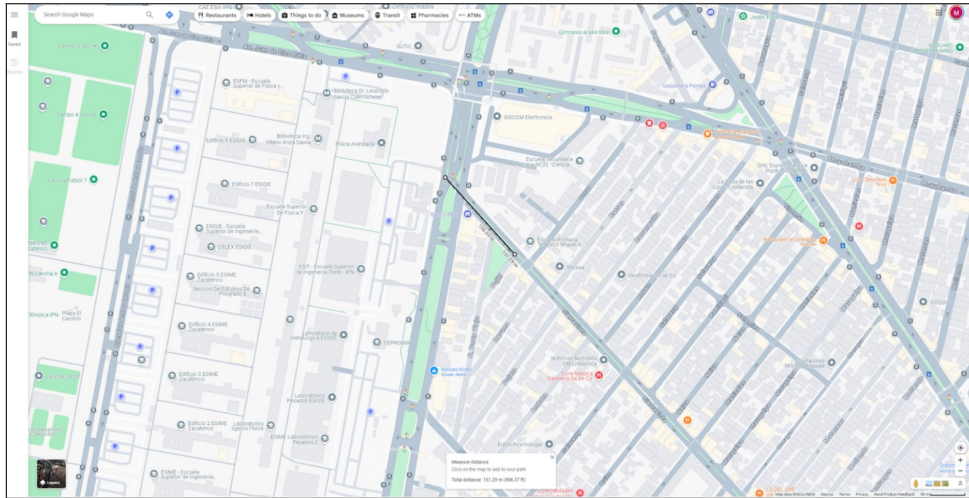


Figura 4.8: Calle Sierravista desde Google Maps.

- **Calle Lindavista (0.18 km):** La Calle Lindavista es una vialidad corta que conecta la Avenida IPN con la Avenida IPN. Se representa en el modelo con 36 celdas. ( $180 \text{ m} / 5 \text{ m} = 36$ ).

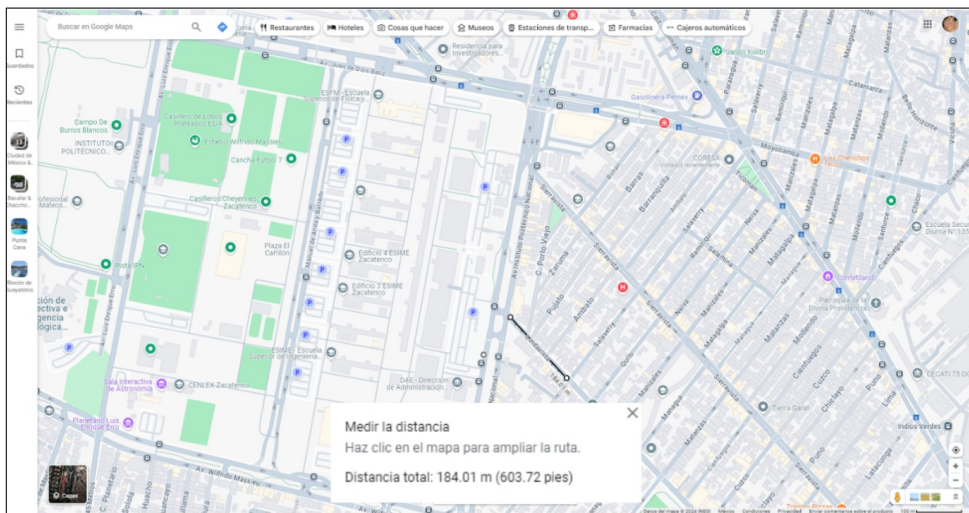


Figura 4.9: Calle Lindavista desde Google Maps.

- **Calle Buenavista (0.20 km):** Esta calle conecta la Avenida IPN con la Avenida Wilfrido Massieu, proporcionando la parte suresste del campus. En el modelo, se representa con 40 celdas. ( $200 \text{ m} / 5 \text{ m} = 40$ ).

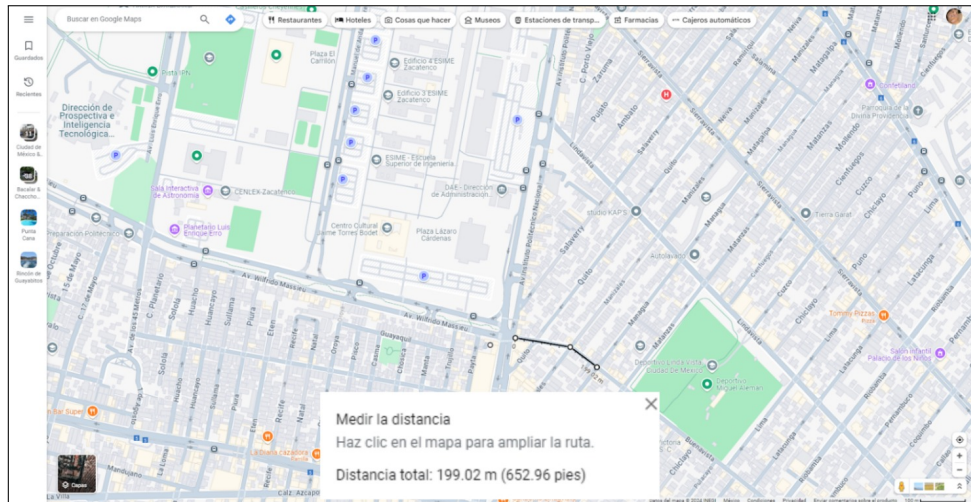


Figura 4.10: Calle Buenavista desde Google Maps.

- **Calle Otavalo (0.75 km):** La Calle Otavalo conecta la Avenida IPN con la Avenida de los 45 metros, ubicada en la parte sur del modelo. En el modelo, se representa con 150 celdas. ( $750 \text{ m} / 5 \text{ m} = 150$ ).

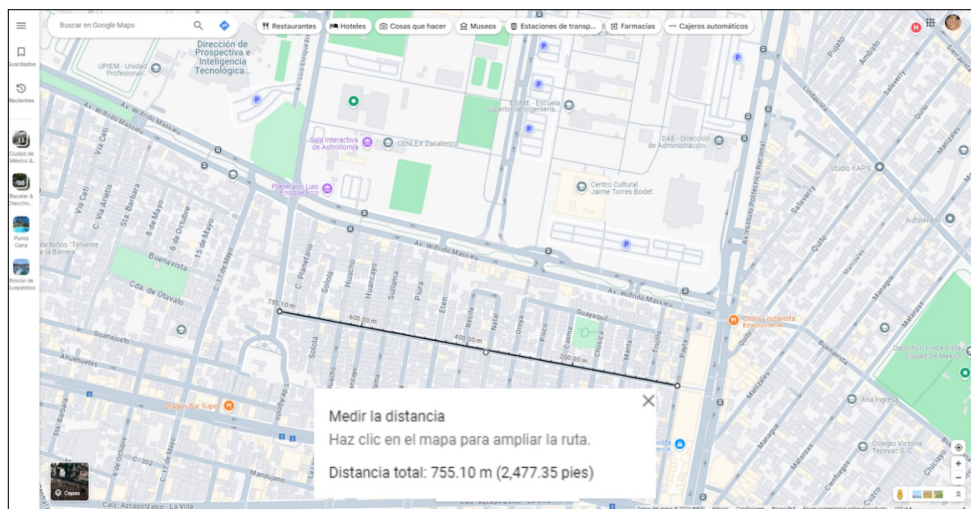


Figura 4.11: Calle Otavalo desde Google Maps.



- **Calle Montevideo (1.54 km):** Esta calle recorre el límite sur del IPN, conectando la Avenida 17 de Mayo, con la Avenida 100 Metros y la Avenida IPN. Se representa en el modelo con 308 celdas. ( $1540 \text{ m} / 5 \text{ m} = 308$ ).



Figura 4.12: Calle Montevideo desde Google Maps.

- **Calle Guanajuato (0.50 km):** La Calle Guanajuato conecta la Avenida Cien Metros con la Avenida 17 de Mayo, facilitando el acceso desde la parte sur al centro del campus. En el modelo, se representa con 100 celdas. ( $500 \text{ m} / 5 \text{ m} = 100$ ).

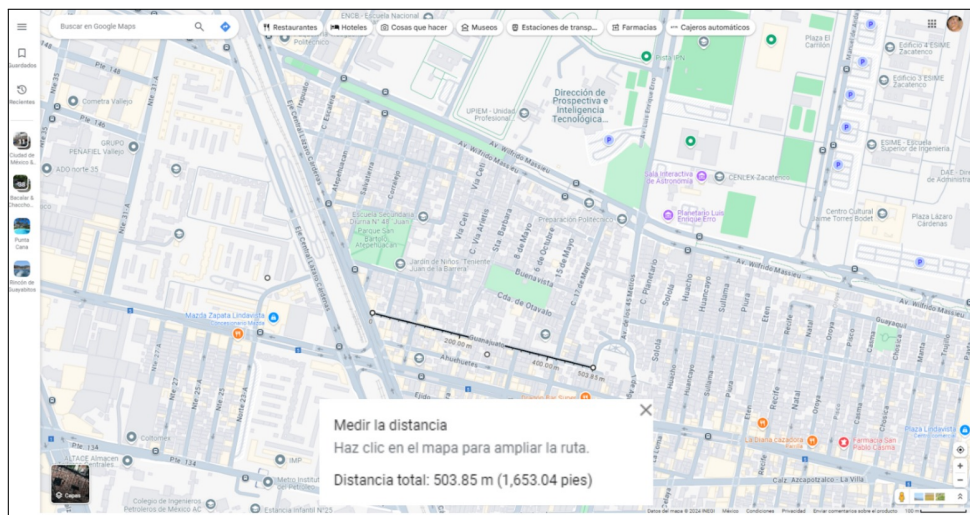


Figura 4.13: Calle Guanajuato desde Google Maps.

- **17 de mayo (0.61 km):** Esta vialidad conecta la Avenida Wilfrido Massieu con la Avenida Montevideo. En el modelo, se representa con 122 celdas. ( $610 \text{ m} / 5 \text{ m} = 122$ ).

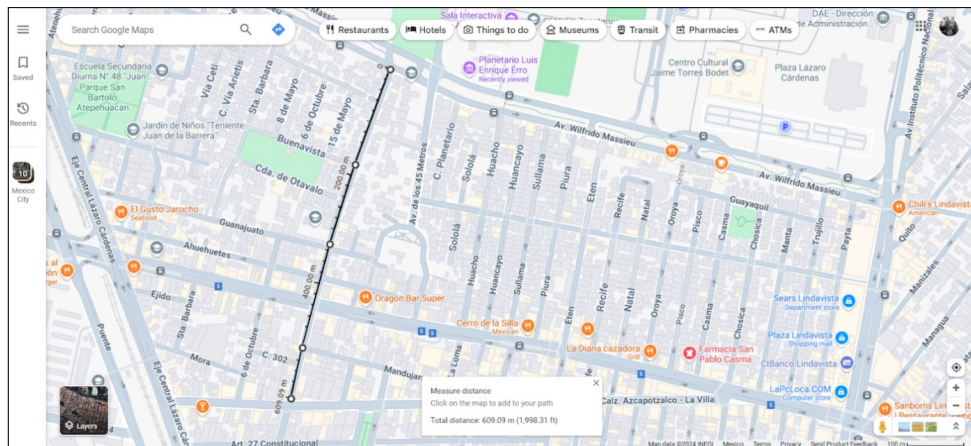


Figura 4.14: 17 de mayo desde Google Maps.

- **Wilfrido Massieu (1.725 km):** La Avenida Wilfrido Massieu conecta la zona sur de la Avenida Cien Metros y la Avenida IPN. Se representa en el modelo con 342 celdas. ( $1725 \text{ m} / 5 \text{ m} = 345$ ).

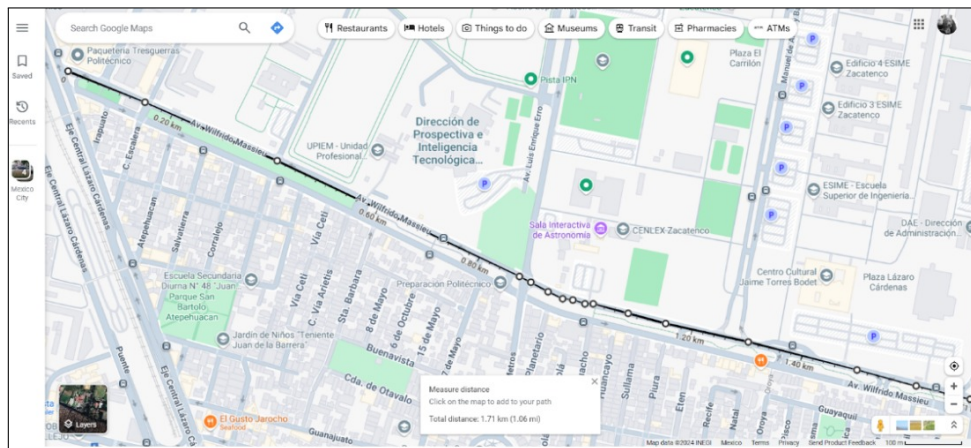


Figura 4.15: Avenida Wilfrido Massieu desde Google Maps.



- **Luis Enrique Erro (1.275 km):** Esta vialidad conecta la Avenida Wilfrido Massieu con la Avenida Montevideo. En el modelo, se representa con 255 celdas. ( $1275 \text{ m} / 5 \text{ m} = 255$ ).

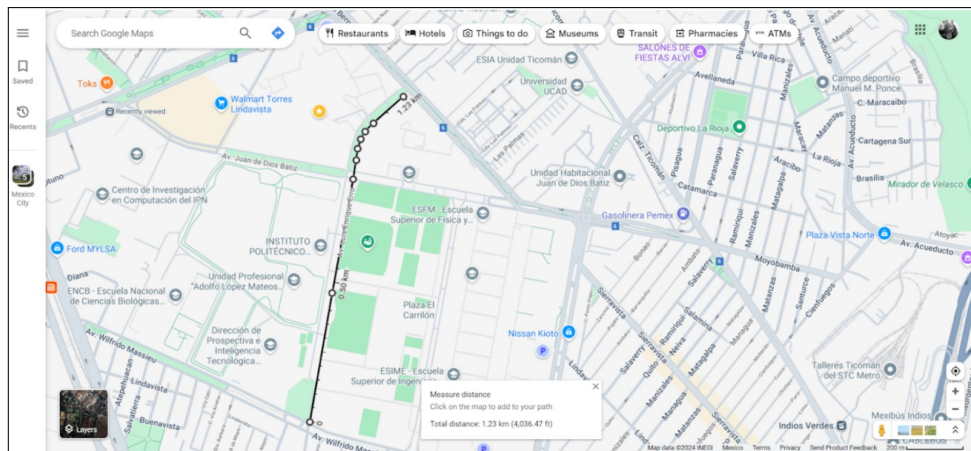


Figura 4.16: Avenida Luis Enrique Erro desde Google Maps.

- **Avenida Cien Metros/ Eje Central Lázaro Cárdenas (1.91 km):** Avenida 100 Metros recorre el límite norte del IPN, conectando la Avenida Miguel Othón con la Avenida Wilfrido Massieu y la Avenida Montevideo. Se representa en el modelo con 425 celdas. ( $1910 \text{ m} / 4.5 \text{ m} = 424.44$ , redondeado a 425).

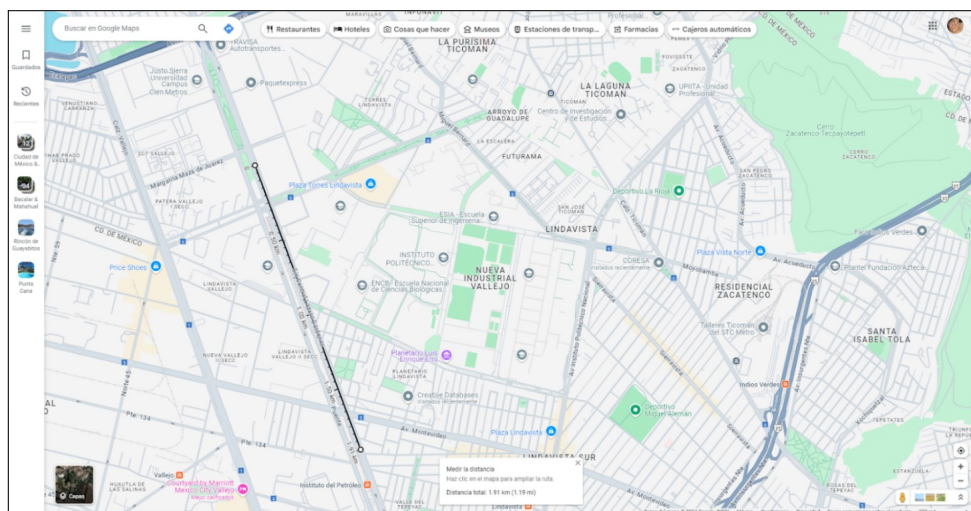


Figura 4.17: Avenida Cien Metros desde Google Maps.

- **Miguel de Anda y Barredo (0.89 km):** Esta calle conecta la Avenida Wilfrido Massieu con la Avenida Juan de Dios Bátiz, proporcionando acceso a los estacionamientos de la Unidad Profesional "Lázaro Cárdenas". En el modelo, se representa con 178 celdas. ( $890 \text{ m} / 5 \text{ m} = 178$ ).

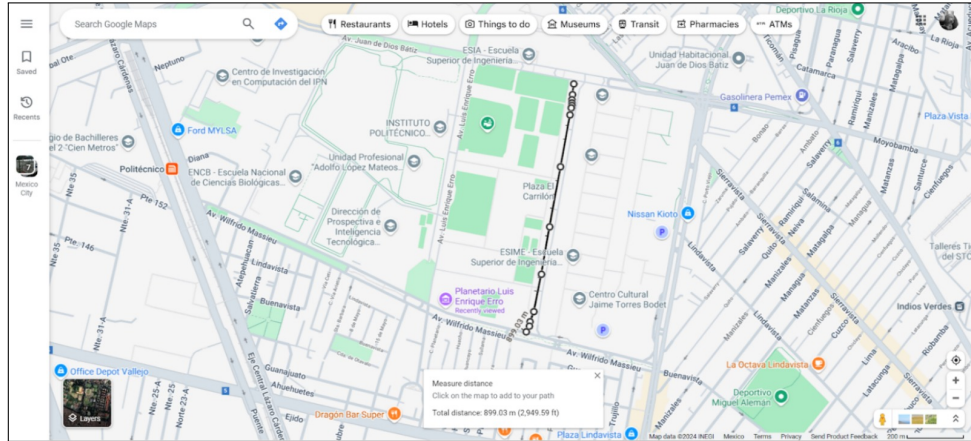


Figura 4.18: Miguel de Anda y Barredo desde Google Maps.

#### 4.1.3. Diseño de Interfaces

##### Descripción General

El diseño de la interfaz de usuario de FLUVI se ha desarrollado con un enfoque de página única (SPA). La interfaz está organizada en componentes modulares que permiten una interacción con el simulador, facilitando tanto la configuración como la visualización y análisis del flujo vehicular.

##### Arquitectura Visual

La interfaz de FLUVI se compone de tres áreas principales:

1. **Panel de Control Lateral:** Contiene todas las herramientas de configuración y gestión del simulador
2. **Área de Visualización Central:** Muestra la representación gráfica del campus y el flujo vehicular en tiempo virtual
3. **Barra de Control Inferior:** Proporciona acceso rápido a controles de simulación
4. **Barra de Información:** información de datos relevantes en tiempo virtual de la simulación.

##### Pantalla de Inicio

La pantalla de inicio (Figura 4.19) presenta al usuario una vista completa del área de simulación sin el panel lateral activado. Esta vista permite:

- Visualización completa del mapa del campus IPN-ESCOM
- Barra de información superior con métricas en tiempo virtual
- Barra de control inferior con botones de acción rápida



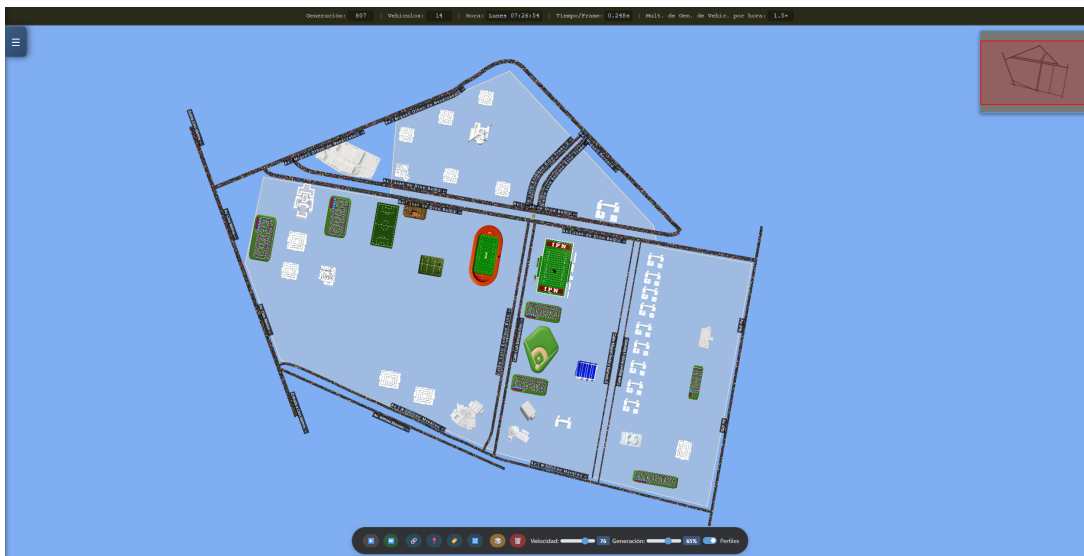


Figura 4.19: Pantalla de inicio del simulador FLUVI

- Miniatura de navegación en la esquina superior derecha
- Botón de menú hamburguesa para acceder al panel de control

### Panel de Control Lateral

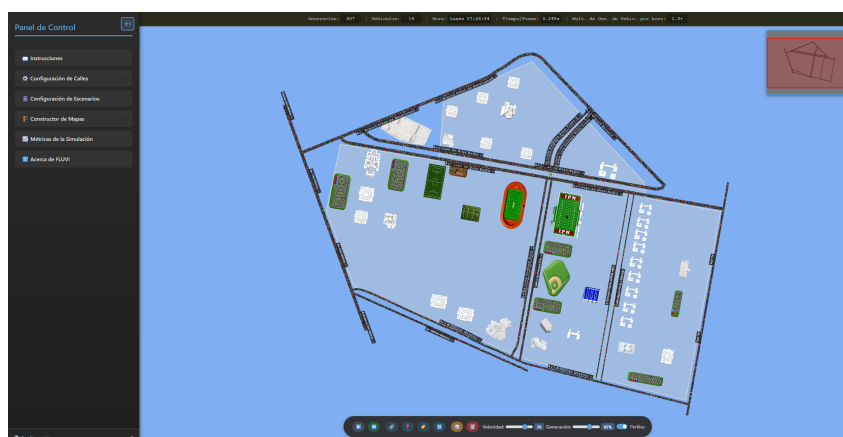


Figura 4.20: Panel de control lateral con todas las secciones disponibles

El panel de control lateral (Figura 4.20) está organizado en un sistema de acordeón que contiene siete secciones principales:

1. **Instrucciones:** Guía rápida de uso del simulador
2. **Configuración de Calles:** Ajuste de propiedades dinámicas del tráfico
3. **Configuración de Escenarios:** Creación de obstáculos, inundaciones y bloqueos
4. **Constructor de Mapas:** Herramienta completa de edición de mapas
5. **Métricas de la Simulación:** Análisis en tiempo virtual y exportación de datos
6. **Acerca de FLUVI:** Información sobre el sistema y algoritmos

## 7. Configuración: Preferencias del simulador (modo oscuro, logs)

### Características del diseño:

- Sistema de acordeón que permite expandir/colapsar secciones
- Una sola sección activa a la vez para evitar saturación visual
- Iconografía clara y consistente
- Tooltips informativos en elementos complejos
- Responsive: se oculta automáticamente en pantallas pequeñas

### Guía de Instrucciones

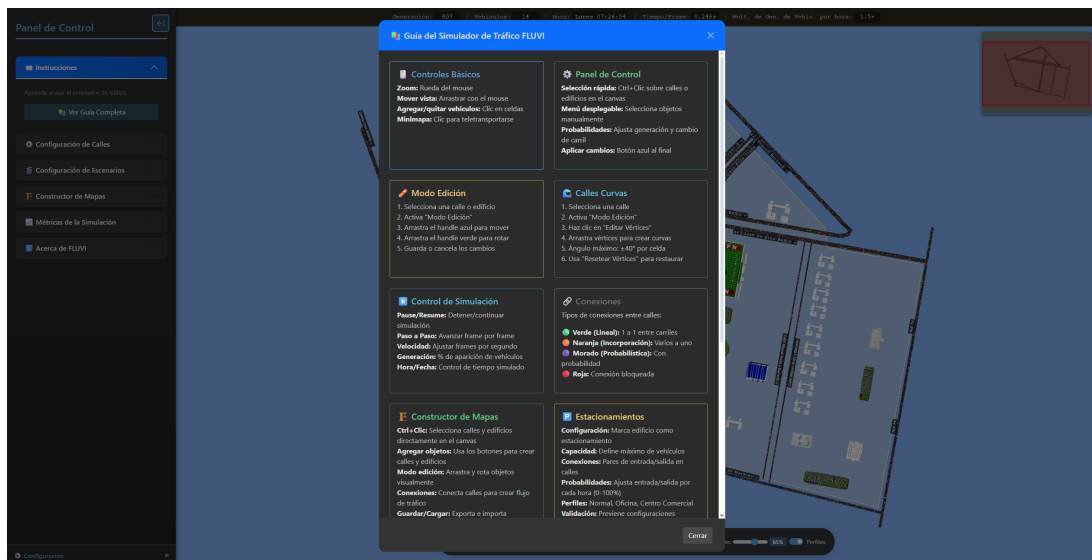


Figura 4.21: Guía interactiva del simulador de tráfico FLUVI

La guía de instrucciones (Figura 4.21) proporciona un tutorial visual organizado en secciones temáticas:

- **Controles Básicos:** Zoom, mover vista, agregar/quitar vehículos, minimapa
- **Panel de Control:** Selección rápida, menú desplegable, probabilidades, aplicar cambios
- **Modo Edición:** Proceso de 5 pasos para editar calles y edificios
- **Calles Curvas:** Instrucciones para crear y editar curvaturas
- **Control de Simulación:** Pause/Resumir, Paso a Paso, Velocidad, Generación, Hora/Fecha
- **Conexiones:** Tipos de conexiones con código de colores (Verde: Lineal, Naranja: Incorporación, Morado: Probabilística, Roja: Bloqueada)
- **Estacionamientos:** Configuración de capacidad, conexiones y perfiles
- **Constructor de Mapas:** Funcionalidades de creación y edición
- **Métricas del Simulador:** Simulador de Tráfico, Hora, FPS, Vehículos

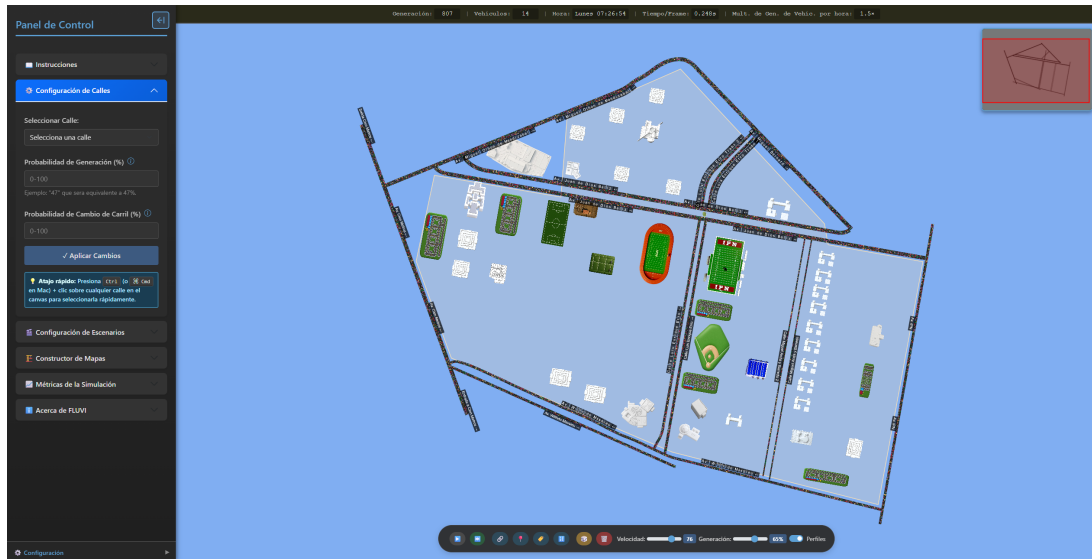


Figura 4.22: Interfaz de configuración de calles con selección activa

## Configuración de Calles

La interfaz de configuración de calles (Figura 4.22) permite ajustar las propiedades dinámicas del tráfico:

### Elementos de la interfaz:

- **Selector de calle:** Menú desplegable con todas las calles disponibles
- **Probabilidad de Generación (%):** Campo numérico 0-100 (solo calles GENERADOR)
- **Probabilidad de Cambio de Carril (%):** Campo numérico 0-100 (todas las calles)
- **Aplicar Cambios:** Confirma y aplica las modificaciones
- **Atajo rápido:** Información sobre Ctrl+Click (Cmd+Click en Mac) para selección directa

### Interacción con el canvas:

- La calle seleccionada se resalta con borde dorado en el canvas
- Sincronización bidireccional: seleccionar en el dropdown o con Ctrl+Click
- Validación en tiempo virtual de valores ingresados

## Configuración de Escenarios

La configuración de escenarios (Figura 4.23) implementa tres tipos de situaciones especiales:

**Tarjetas de Escenarios** Cada tipo de escenario tiene una tarjeta visual distintiva:

### 1. Bloqueo de Carril

- Icono: símbolo de barrera
- Color: amarillo/naranja
- Descripción: "Bloquea celdas específicas para simular obstáculos permanentes"
- Switch: "Activar modo bloqueo"

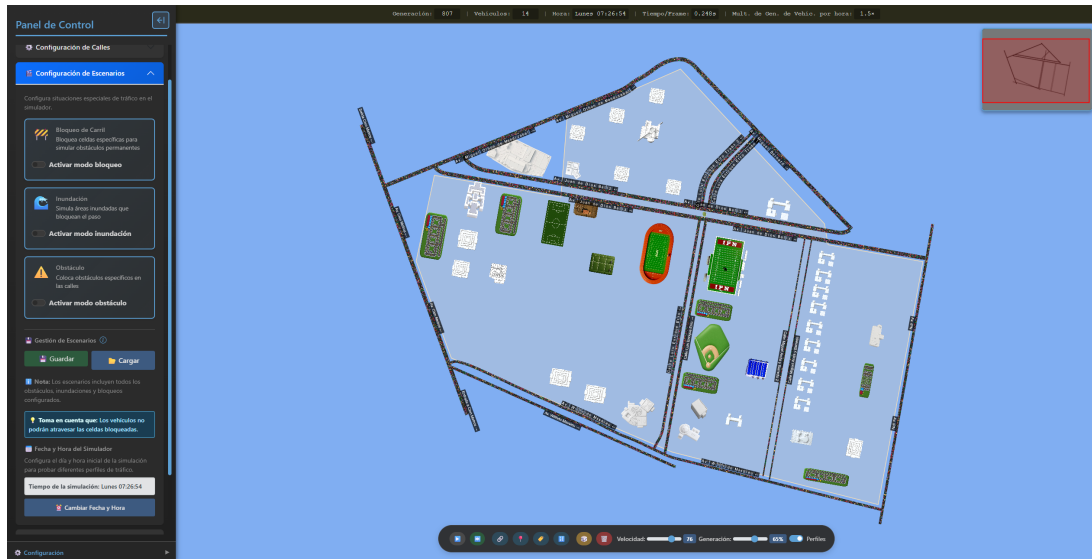


Figura 4.23: Interfaz de configuración de escenarios especiales

## 2. Inundación

- Icono: gota de agua
- Color: azul
- Descripción: "Simula áreas inundadas que bloquean el paso"
- Switch: "Activar modo inundación"

## 3. Obstáculo

- Icono: cono de tráfico
- Color: naranja
- Descripción: "Coloca obstáculos específicos en las calles"
- Switch: "Activar modo obstáculo"
- Selector adicional: tipo de obstáculo (bache, construcción, árbol caído)

### Gestión de Escenarios Componentes adicionales:

- **Nota informativa:** Tooltip con icono de bombilla que indica: "Los escenarios incluyen todos los obstáculos, inundaciones y bloqueos configurados"
- **Botón Guardar:** (verde) Exporta la configuración de escenarios a JSON
- **Botón Cargar:** (azul) Importa configuración previamente guardada
- **Fecha y Hora del Simulador:** Sección inferior para configurar el tiempo virtual
- **Tiempo actual:** Display que muestra "Lunes 07:26:54"
- **Botón Cambiar Fecha y Hora:** Acceso a la configuración temporal

### Constructor de Mapas

El constructor de mapas (Figura 4.24) es la herramienta más completa del sistema:

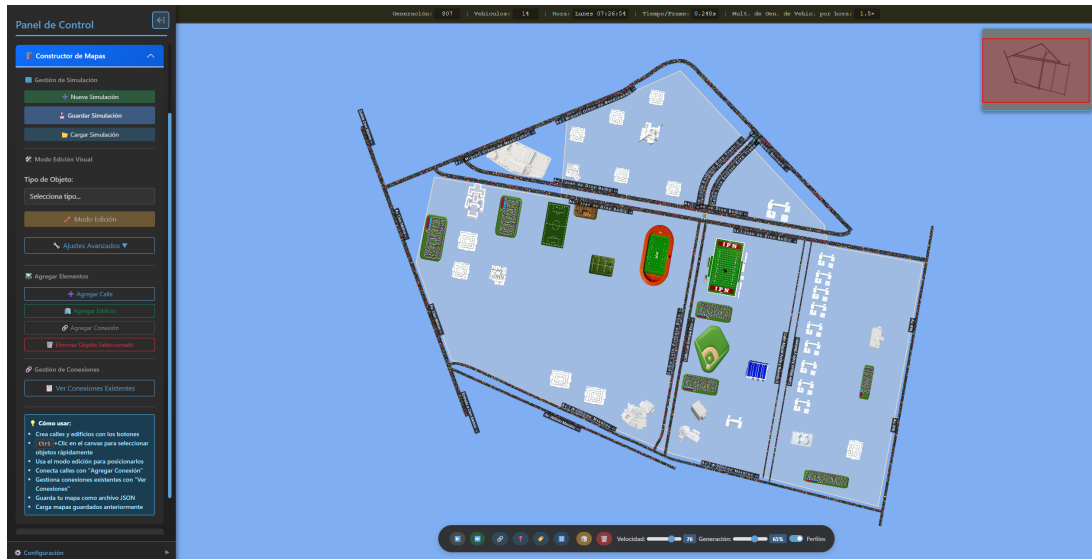


Figura 4.24: Constructor de mapas con herramientas de edición

## Gestión de Simulación

- **Nueva Simulación:** Botón verde que crea un mapa en blanco
- **Guardar Simulación:** Botón azul que exporta a JSON
- **Cargar Simulación:** Botón amarillo que importa desde JSON

## Modo Edición Visual

- **Tipo de Objeto:** Dropdown para seleccionar Calle o Edificio
- **Selector específico:** Dropdown con lista de objetos del tipo seleccionado
- **Botón Modo Edición:** Activa/desactiva handles de control
- **Ajustes Avanzados:** Sección colapsable con:
  - Posición X, Y (píxeles)
  - Ángulo de rotación
  - Botón "Aplicar Posición"

**Agregar Elementos** Cuatro botones de acción claramente diferenciados:

- **Agregar Calle:** Botón verde con icono de calle
- **Agregar Edificio:** Botón gris con icono de edificio
- **Agregar Conexión:** Botón azul con icono de enlace
- **Eliminar Objeto Seleccionado:** Botón rojo con icono de basura

## Gestión de Conexiones

- **Botón Ver Conexiones Existentes:** Despliega lista de conexiones
- Lista con tipo, origen, destino y botones de editar/eliminar

**Guía de Uso** Sección Cómo usar con viñetas informativas:

- Crear calles y edificios con los botones correspondientes
- Ctrl+Clic en el canvas para seleccionar objetos rápidamente
- Modo edición para posicionarlos y rotarlos
- Conectar calles con "Agregar Conexión"
- Ver conexiones existentes con el botón correspondiente
- Guardar mapa como archivo JSON
- Cargar mapas guardados anteriormente

## Métricas de la Simulación

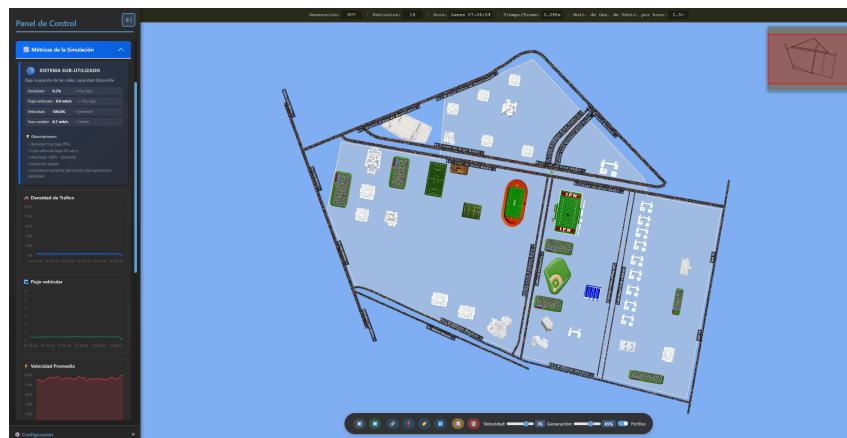


Figura 4.25: Panel de métricas con interpretación del sistema (Parte 1)

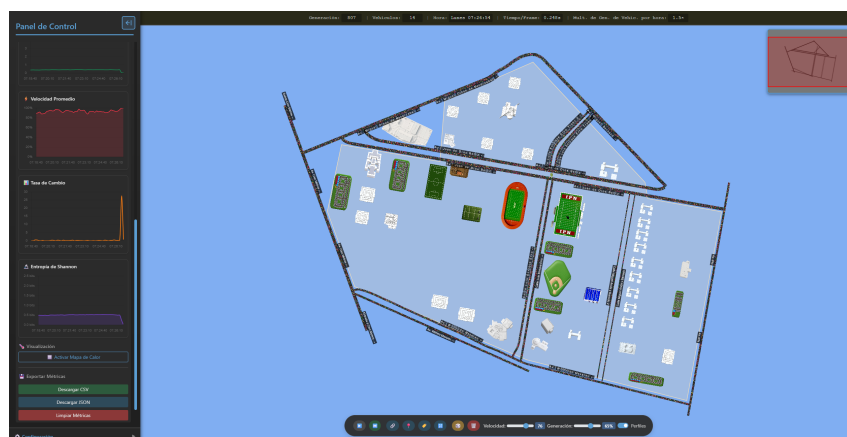


Figura 4.26: Panel de métricas con gráficas y exportación (Parte 2)

El panel de métricas (Figuras 4.25 y 4.26) proporciona análisis en tiempo virtual del comportamiento del tráfico.

## Panel de Interpretación Estructura:

- **Encabezado con estado:** Título con código de color según estado del sistema:
  - Verde: "FLUJO ÓPTIMO (Excelente)"
  - Amarillo: "FLUJO MODERADO (Aceptable)"
  - Naranja: "TRÁFICO CONGESTIONADO (Alto)"
  - Rojo: "COLAPSO DE TRÁFICO (Crítico)"
  - Azul: "SISTEMA SUB-UTILIZADO (Bajo)"
- **Descripción del estado:** Texto explicativo breve
- **Métricas resumidas:** Cuatro valores con etiquetas:
  - Densidad: X % (con etiqueta descriptiva)
  - Flujo vehicular: X.X veh/s (con etiqueta)
  - Velocidad: X % (con etiqueta)
  - Tasa de cambio: X.X veh/s (con etiqueta)
- **Observaciones:** Lista de puntos clave y recomendaciones

## Gráficas Temporales Cinco gráficas de línea implementadas con Chart.js:

### 1. Densidad de Tráfico

- Eje Y: 0 % - 100 %
- Color: azul
- Muestra porcentaje de ocupación de calles

### 2. Flujo Vehicular

- Eje Y: 0 - 6+ veh/s
- Color: verde
- Muestra vehículos por segundo

### 3. Velocidad Promedio

- Eje Y: 0 % - 100 %
- Color: amarillo con área sombreada
- Muestra porcentaje de vehículos en movimiento

### 4. Tasa de Cambio

- Eje Y: 0 - 10+ veh/s
- Color: naranja
- Muestra cambio neto de población vehicular

### 5. Entropía de Shannon

- Eje Y: 0 - 2.5 bits
- Color: morado
- Muestra diversidad de transiciones del autómata

### Características de las gráficas:

- Altura fija: 180px
- Ventana deslizante: últimos 50 puntos
- Actualización cada 5 frames
- Tooltips informativos con contexto
- Eje X con etiquetas temporales

### Exportación de Métricas Tres botones de acción:

- **Descargar CSV:** (verde) Exporta datos en formato tabla
- **Descargar JSON:** (azul) Exporta datos con metadata completa
- **Limpiar Métricas:** (rojo) Resetea historial de métricas

### Visualización Adicional Activar Mapa de Calor:

- Toggle switch para activar/desactivar
- Representa densidad mediante gradiente de color
- Verde (baja densidad) → Amarillo (media) → Rojo (alta densidad)

### Acerca de FLUVI

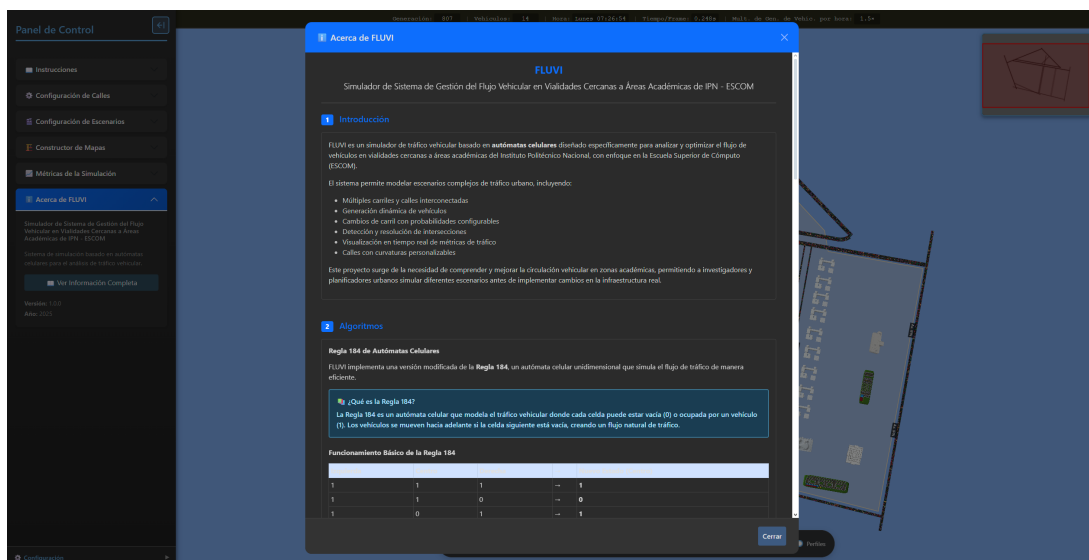


Figura 4.27: Sección informativa sobre FLUVI y sus algoritmos

La sección "Acerca de FLUVI" (Figura 4.27) proporciona documentación técnica del sistema:

### Estructura del Modal Encabezado:

- Título: "FLUVI"
- Subtítulo: "Simulador de Sistema de Gestión del Flujo Vehicular en Vialidades Cercanas a Áreas Académicas de IPN - ESCOM"



## Secciones de Contenido 1. Introducción

- Descripción general del simulador
- Base en autómatas celulares
- Objetivos del sistema
- Características principales:
  - Múltiples carriles y calles interconectadas
  - Generación dinámica de vehículos
  - Cambios de carril con probabilidades configurables
  - Detección y resolución de intersecciones
  - Visualización en tiempo virtual de métricas de tráfico
  - Calles con curvaturas personalizables
- Utilidad para investigadores y planificadores urbanos

## 2. Algoritmos

### *Regla 184 de Autómatas Celulares*

- Explicación de la Regla 184
- Caja informativa con definición
- Funcionamiento básico de la Regla 184 (tabla de transiciones)
- Tabla mostrando:
  - Izquierda (0/1)
  - Centro (0/1)
  - Derecha (0/1)
  - Resultado (0/1)

### *Modificaciones implementadas en FLUVI*

Cuatro cajas informativas con modificaciones:

#### 1. Multi-carril:

- Icono: carriles múltiples
- Color: azul
- Permite múltiples carriles paralelos
- Cada carril opera según regla modificada

#### 2. Generación probabilística:

- Icono: dado
- Color: verde
- Los vehículos se generan con probabilidad aleatoria
- Variable según hora (perfiles de tráfico)

#### 3. Prevención de Colisiones:

- Icono: escudo

- Color: naranja
- Detecta celdas solapadas en intersecciones
- Previene dos vehículos en misma celda

#### 4. Calles Curvas:

- Icono: curva
- Color: morado
- Calles pueden curvarse usando vértices Bézier
- Límite:  $\pm 40^\circ$  por vértice

#### *Resumen*

- Caja resumen (verde) explicando que FLUVI extiende la Regla 184 con modificaciones
- Énfasis en aplicabilidad para escenarios realistas

### 3. Formato de Archivos

- Descripción del formato JSON para guardar/cargar simulaciones
- Ejemplo de estructura JSON con:
  - version
  - calles (array con propiedades)
  - edificios (array)
  - conexiones (array)

- Caja informativa (cyan) sobre compatibilidad y formato JSON

### 4. Advertencias

Lista de consideraciones importantes:

- Rendimiento en simulaciones muy grandes
- Validación de archivos con 30+ calles
- Configuraciones no guardadas se pierden
- Nota sobre algoritmos que forman un modelo simplificado

### 5. Créditos

Sección final con:

- Equipo de desarrollo (tres tarjetas):
  1. Connor Urbano Mendoza (connor@escom.ipn.mx)
  2. Juan José Molina Figueroa (jmolina@escom.ipn.mx)
  3. Denisse Márquez Morales (dmarquez@escom.ipn.mx)
- Directores del Proyecto:
  - Genaro Martínez Genaro
  - Maldonado Castillo Idalia
- Institución: Instituto Politécnico Nacional - ESCOM
- Enlaces a documentación en línea (GitHub, ESCOM)

### Botón de cierre:

- Botón Cerrar.<sup>al</sup> final del modal
- Botón X en la esquina superior derecha

## Paleta de Colores y Estilo Visual

**Sistema de Colores** El simulador implementa dos modos de color completos:

### Modo Claro (predeterminado):

- Fondo principal: Blanco (#FFFFFF)
- Fondo secundario: Gris claro (#F8F9FA)
- Panel lateral: Blanco semitransparente (rgba(255,255,255,0.95))
- Texto primario: Negro (#000000)
- Texto secundario: Gris oscuro (#333333)
- Acentos: Azul (#0D6EFD), Verde (#198754), Amarillo (#FFC107), Rojo (#DC3545)

### Modo Oscuro:

- Fondo principal: Gris muy oscuro (#1A1A1A)
- Fondo secundario: Gris oscuro (#2B2B2B)
- Panel lateral: Gris oscuro semitransparente (rgba(43,43,43,0.95))
- Texto primario: Gris claro (#E0E0E0)
- Texto secundario: Gris medio (#B0B0B0)
- Acentos: Azul claro (#5A9FD4), Verde claro (#6DC98D), etc.

## Tipografía

- Familia principal: -apple-system, BlinkMacSystemFont, "Segoe UI", Roboto, sans-serif
- Tamaños:
  - Encabezados principales: 1.5rem (24px)
  - Encabezados secundarios: 1.25rem (20px)
  - Texto normal: 0.9rem (14.4px)
  - Texto pequeño: 0.8rem (12.8px)
- Peso: Regular (400) para texto, Semi-bold (600) para encabezados

**Iconografía** El sistema utiliza iconos de múltiples fuentes:

- Bootstrap Icons: para iconos de interfaz generales
- Font Awesome: para iconos especializados
- Iconos personalizados: para elementos específicos del tráfico

### Convenciones de iconos:

- Configuración: engranaje
- Edición: lápiz
- Eliminación: papelera

- Guardado: disco/floppy
- Carga: carpeta/upload
- Información: círculo con i”
- Advertencia: triángulo con exclamación
- Éxito: círculo con check

## **Diseño Responsivo**

El simulador implementa puntos de quiebre (breakpoints) para adaptarse a diferentes tamaños de pantalla:

### **Escritorio grande (≥1400px):**

- Panel lateral: ancho fijo 280px
- Canvas: ocupa espacio restante
- Barra de control: una línea horizontal
- Métricas: gráficas tamaño completo

### **Escritorio medio (1200-1400px):**

- Panel lateral: ancho 260px
- Fuentes ligeramente reducidas
- Barra de control: puede envolver en dos líneas

### **Tablet (768-1199px):**

- Panel lateral: overlay sobre canvas
- Se oculta por defecto
- Botón hamburguesa siempre visible
- Controles touch-friendly (mayor área de toque)

### **Móvil (≤768px):**

- Panel lateral: pantalla completa cuando activo
- Canvas: zoom y pan optimizados para touch
- Barra de control: disposición vertical
- Métricas: gráficas en orientación apilada

## **Accesibilidad**

El diseño de FLUVI incorpora características de accesibilidad:

### **Contraste**

- Ratio de contraste texto/fondo: mínimo 4.5:1
- Botones: contraste mínimo 3:1
- Estados activos claramente diferenciados

## Navegación por Teclado

- Todos los controles accesibles con Tab
- Orden lógico de tabulación
- Indicadores de foco visibles
- Atajos de teclado documentados (Ctrl+Clic, Z para vértices)

## Etiquetas y Tooltips

- Etiquetas ARIA en todos los controles interactivos
- Tooltips descriptivos en elementos complejos
- Mensajes de error claros y descriptivos

## Compatibilidad con Lectores de Pantalla

- Estructura semántica HTML5
- Roles ARIA apropiados
- Anuncios de cambios de estado
- Alternativas textuales para contenido visual

## Patrones de Interacción

**Retroalimentación Visual** El sistema proporciona retroalimentación inmediata:

- **Hover:** Cambio de cursor y color en elementos interactivos
- **Click:** Efecto de ripple o cambio de estado visual
- **Carga:** Spinners o barras de progreso
- **Éxito/Error:** Notificaciones toast con código de color

## Validación de Formularios

- Validación en tiempo virtual (on blur)
- Mensajes de error específicos bajo cada campo
- Campos inválidos marcados en rojo
- Prevención de envío con datos inválidos

**Confirmaciones** Acciones destructivas requieren confirmación:

- Eliminación de elementos
- Limpieza de datos
- Sobrescritura de archivos
- Modales de confirmación con opciones claras (Sí/No, Aceptar/Cancelar)

## **Rendimiento y Optimización**

### **Renderizado**

- Uso de Canvas 2D para el área de simulación (opción de PixiJS para WebGL)
- Renderizado condicional: solo actualiza cuando hay cambios
- Culling: no renderiza elementos fuera del viewport
- Double buffering para evitar parpadeo

### **Gestión de Estado**

- Actualización de métricas cada 5 frames (optimización)
- Debouncing en controles de entrada de texto
- Throttling en eventos de scroll y zoom
- Caché de cálculos costosos

### **Carga de Recursos**

- Carga lazy de secciones del panel lateral
- Imágenes y sprites optimizados
- Compresión de archivos JSON exportados
- Minimización de archivos CSS y JavaScript

# Capítulo 5

## 5.1. Desarrollo

### 5.1.1. Construcción del modelo de simulación

El modelo de simulación de tráfico vehicular de FLUVI se fundamenta en la teoría de autómatas celulares, específicamente en una adaptación de la Regla 184, conocida como el modelo de flujo de tráfico más simple y efectivo para representar dinámicas vehiculares unidimensionales.

#### Fundamentos del autómata celular

El autómata celular implementado opera sobre una estructura de celdas discretas que representan segmentos de calle. Cada celda puede encontrarse en uno de siete estados posibles:

- Estado 0: Celda vacía
- Estados 1-6: Celda ocupada por un vehículo de tipo específico

El sistema evoluciona de manera sincrónica, donde en cada iteración (generación) todas las celdas actualizan su estado simultáneamente siguiendo reglas determinísticas basadas en el vecindario local.

#### Sistema multi-carril

A diferencia de implementaciones tradicionales de autómatas celulares unidimensionales, FLUVI incorpora un sistema multi-carril que permite representar vialidades reales con mayor fidelidad. Este sistema incluye:

- Soporte para múltiples carriles por calle
- Lógica de cambio de carril dinámico con prioridades
- Evaluación de condiciones para cambio de carril basada en:
  - Espacio disponible en el carril destino
  - Velocidad relativa entre carriles
  - Probabilidades configurables de cambio de carril

#### Sistema de conexiones entre calles

Para simular redes viales complejas, se implementó un sistema de conexiones que permite vincular múltiples calles. Se definieron tres tipos de conexiones:

1. **Conexión lineal:** Transferencia directa de vehículos entre calles consecutivas, manteniendo el carril correspondiente.
2. **Conexión de incorporación:** Permite la fusión de flujos vehiculares desde una calle secundaria hacia una calle principal, con lógica de prioridad y espaciado seguro.
3. **Conexión probabilística:** Implementa bifurcaciones donde los vehículos pueden elegir entre múltiples calles destino según probabilidades configurables, simulando decisiones de ruta.

## Sistema de tiempo virtual

Se implemento un sistema de tiempo virtual que simula el paso del tiempo virtual mediante un reloj interno que controla:

- Dias de la semana (lunes a domingo)
- Hora del dia (0-23 horas)
- Minutos y segundos
- Tiempo simulado por frame configurable

Este sistema permite sincronizar la generacion de vehiculos con patrones de trafico reales mediante multiplicadores dinamicos.

## Multiplicadores de trafico dinamicos

Para simular patrones de trafico realistas, se implemento un sistema de multiplicadores que modifica la tasa de generacion de vehiculos segun:

- Dia de la semana: Distingue entre dias laborales (lunes-viernes), sabado y domingo
- Hora del dia: 24 rangos horarios configurables independientemente
- Valores de multiplicador: Rango de 0.0 (sin trafico) a 3.0 (trafico intenso)

El sistema incluye perfiles predefinidos:

- Dia laboral: Picos en horas de entrada (7-9 AM) y salida (6-8 PM)
- Fin de semana: Patron relajado con incremento en horario vespertino
- Constante: Trafico uniforme durante todo el dia
- Nocturno: Patron invertido para simulaciones especiales

## Estacionamientos inteligentes

Se implemento un sistema de estacionamientos que interactua con el flujo vehicular mediante:

- **Capacidad configurable:** Numero maximo de vehiculos almacenables
- **Conexiones de entrada:** Celdas especificas donde vehiculos pueden entrar
- **Conexiones de salida:** Celdas donde se generan vehiculos que salen
- **Probabilidades horarias:** Configuracion independiente para cada hora del dia de:
  - Probabilidad de entrada (0-100 por ciento)
  - Probabilidad de salida (0-100 por ciento)

El comportamiento incluye:

- Sistema de absorcion anticipada que detecta vehiculos antes de su llegada
- Validacion de espacio disponible antes de generar salidas
- Prevencion de colisiones mediante verificacion de celdas vacias
- Perfiles predefinidos: Normal, Oficina, Centro Comercial



## Metricas del sistema

Para evaluar el desempeño del modelo, se implementaron las siguientes metricas en tiempo virtual:

1. **Densidad (porcentaje):** Proporción de celdas ocupadas respecto al total

$$\rho = \frac{\text{celdas ocupadas}}{\text{total de celdas}} \times 100$$

2. **Flujo vehicular (veh/s):** Tasa de vehiculos que atraviesan el sistema
3. **Velocidad promedio (porcentaje):** Velocidad efectiva respecto a la velocidad maxima
4. **Entropía de Shannon (bits):** Medida de diversidad de las transiciones del automata

$$H = - \sum_{i=0}^7 p_i \log_2(p_i)$$

donde  $p_i$  es la probabilidad empirica de cada una de las 8 transiciones posibles basadas en el vecindario de 3 celdas (izquierda-centro-derecha).

Se definieron cinco estados del sistema basados en las metricas:

- COLAPSO:  $\rho > 80\%$  y  $v < 15\%$
- OPTIMO: flujo  $\geq 2,5$  veh/s,  $25\% \leq \rho \leq 60\%$ ,  $v \geq 50\%$
- CONGESTIONADO:  $\rho > 65\%$  y  $v < 35\%$
- SUB-UTILIZADO:  $\rho < 25\%$  y flujo  $< 1,5$  veh/s
- MODERADO: Otras combinaciones

### 5.1.2. Implementacion de la solucion

La implementacion del sistema FLUVI se desarrollo utilizando tecnologias web modernas, con enfasis en rendimiento, modularidad y escalabilidad.

## Arquitectura general

El sistema se implemento como una aplicacion web que se ejecuta completamente en el navegador, eliminando la necesidad de infraestructura de servidor para el procesamiento. La arquitectura consta de tres capas principales:

1. **Capa de presentacion:** Interfaz de usuario desarrollada con HTML5, CSS3 y Bootstrap 5
2. **Capa de simulacion:** Motor de automatas celulares implementado en JavaScript ES6+
3. **Capa de renderizado:** Sistema grafico basado en PixiJS con aceleracion Graphics Processing Unit (Unidad de Procesamiento Gráfico) (GPU)

La estructura de directorios del proyecto se organiza de la siguiente manera:

FLUVI/	
main/	
index.html	(Punto de entrada principal)
INICIAR_SERVIDOR.bat	(Script para iniciar servidor - Windows)
servidor.py	(Servidor HTTP local - Python)
docs/	(Documentacion del proyecto)
CONSTRUCTOR.md	(Documentacion del constructor de mapas)
src/	
js/	
core/	(Logica central de simulacion)
trafico.js	(Motor principal de simulacion y automatas celulares)
tiempo.js	(Sistema de tiempo virtual - dia/hora)
graficas.js	(Sistema de metricas: densidad, flujo, velocidad)
curvas.js	(Sistema de curvas y vertices en calles)
estacionamientos.js	(Sistema de estacionamientos inteligentes)
escenarios.js	(Gestion de configuraciones guardadas)
ClickActionManager.js	(Gestor de clicks e interacciones)
renderer/	(Sistema de renderizado con PixiJS)
PixiApp.js	(Aplicacion principal de PixiJS - Singleton)
SceneManager.js	(Gestor de escena y capas - Scene Graph)
CameraController.js	(Sistema de camara: zoom, pan)
DayNightCycle.js	(Ciclo dia/noche - colores de fondo)
EditorHandles.js	(Handles de edicion de calles)
renderers/	(Renderizadores especializados)
CalleRenderer.js	(Renderizado de calles)
CarroRenderer.js	(Renderizado de vehiculos)
EdificioRenderer.js	(Renderizado de edificios)
ConexionRenderer.js	(Renderizado de conexiones)
UIRenderer.js	(Renderizado de UI - etiquetas)
MinimapRenderer.js	(Renderizado del minimapa)
utils/	(Utilidades de renderizado)
AssetLoader.js	(Cargador de texturas y assets)
CoordinateConverter.js	(Conversion de coordenadas)
ui/	(Modulos de interfaz de usuario)
darkMode.js	(Sistema de modo oscuro)
loadingSystem.js	(Sistema de carga con progreso)
tooltips.js	(Inicializacion de tooltips Bootstrap)
modalFixes.js	(Correcciones para modales)
consoleControl.js	(Control de logs de consola)
sidebarToggle.js	(Toggle del sidebar - Ctrl+B)
infoBar.js	(Barra de informacion en tiempo virtual)
timeControl.js	(Control de fecha y hora del simulador)
multiplicadoresUI.js	(Configuracion de multiplicadores por dia/hora)
editor.js	(Editor visual de calles)
constructor.js	(Constructor de mapas)
edificioUI.js	(Interfaz de configuracion de estacionamientos)
analizadorMetricas.js	(Analizador de metricas avanzado)
notifications.js	(Sistema de notificaciones con Bootstrap Toasts)
etiquetas.js	(Sistema de etiquetas)
python/	(Scripts Python para analisis)
analizador.py	(Analizador de metricas con visualizaciones)
css/	(Hojas de estilo)

<code>estilos.css</code>	(Estilos principales)
<code>minimapa.css</code>	(Estilos del minimapa)
<code>assets/</code>	(Recursos estaticos)
<code>images/</code>	(Imagenes y texturas)
<code>vehicles/</code>	(Sprites de vehiculos - PNG)
<code>buildings/</code>	(Texturas de edificios - PNG)
<code>roads/</code>	(Texturas de carreteras - PNG)
<code>objects/</code>	(Objetos varios - PNG)
<code>README.md</code>	(Documentacion principal)

## Motor grafico con PixiJS

Se selecciono PixiJS v7+ como motor de renderizado 2D debido a sus capacidades de aceleracion por GPU mediante Web Graphics Library (WebGL). Las características clave de esta implementación incluyen:

### Sistema de renderizado acelerado

- Renderizado acelerado por GPU mediante WebGL
- Fallback automatico a Canvas 2D si WebGL no esta disponible
- Batch rendering que agrupa sprites similares en una sola llamada de dibujo
- Pool de objetos para optimizar gestion de memoria
- Rendimiento sostenido de 60 Frames Per Second (Cuadros por Segundo) (FPS) con cientos de vehiculos simultaneos

### Scene Graph con sistema de capas

Se implemento un sistema jerarquico de capas (z-index) para organizar el orden de renderizado:

Layer Debug (z: 40)	- Vertices, elementos de depuracion
Layer UI (z: 30)	- Etiquetas, handles de edicion
Layer Buildings (z: 25)	- Edificios
Layer Vehicles (z: 20)	- Vehiculos animados
Layer Connections (z: 15)	- Lineas de conexion entre calles
Layer Streets (z: 10)	- Calles con texturas
Layer Background (z: 0)	- Fondo con color solido

## Arquitectura modular de JavaScript

El codigo se organizo en modulos especializados siguiendo principios de separacion de responsabilidades. La estructura modular incluye:

### Modulos Core (`src/js/core/`)

- `trafico.js`: Motor principal de simulacion con automatas celulares, control de velocidad y generacion de vehiculos
- `tiempo.js`: Sistema de tiempo virtual con soporte para dias, horas, minutos y segundos. Incluye perfiles de multiplicador de trafico
- `graficas.js`: Recoleccion y calculo de metricas (densidad, flujo, velocidad, entropia)
- `curvas.js`: Sistema de curvas Bezier para calles con interpolacion angular
- `estacionamientos.js`: Sistema de estacionamientos inteligentes

- `escenarios.js`: Gestion de configuraciones guardadas
- `ClickActionManager.js`: Gestion centralizada de eventos de click e interacciones

### Modulos **Renderer** (`src/js/renderer/`)

- `PixiApp.js`: Singleton que maneja el ciclo de vida de PixiJS (WebGL/Canvas2D)
- `SceneManager.js`: Gestion de scene graph con sistema de capas
- `CameraController.js`: Control de camara con zoom (scroll) y pan (arrastre)
- `DayNightCycle.js`: Interpolacion de colores de fondo segun hora simulada
- `EditorHandles.js`: Handles visuales para mover y rotar calles en modo edicion
- Renderizadores especializados en `renderers/`:
  - `CalleRenderer.js`: Renderizado de calles
  - `CarroRenderer.js`: Renderizado de vehiculos
  - `EdificioRenderer.js`: Renderizado de edificios
  - `ConexionRenderer.js`: Renderizado de conexiones
  - `UIRenderer.js`: Renderizado de elementos de interfaz
  - `MinimapRenderer.js`: Renderizado del minimapa
- Utilidades en `utils/`:
  - `AssetLoader.js`: Cargador asincrono de texturas
  - `CoordinateConverter.js`: Conversion entre sistemas de coordenadas

### Modulos **UI** (`src/js/ui/`)

- `infoBar.js`: Barra de informacion en tiempo virtual
- `timeControl.js`: Control modal para modificar fecha y hora
- `multiplicadoresUI.js`: Interfaz de configuracion de multiplicadores
- `darkMode.js`: Toggle de modo oscuro con persistencia
- `loadingSystem.js`: Sistema de carga con barra de progreso
- `editor.js`: Editor visual de calles
- `constructor.js`: Constructor interactivo de mapas
- `notifications.js`: Sistema de notificaciones con Bootstrap Toasts
- `etiquetas.js`: Sistema de tooltips informativos
- `analizadorMetricas.js`: Analizador de metricas avanzado con Pyodide

## Flujo de inicializacion

El proceso de inicializacion del sistema sigue la siguiente secuencia:

1. Carga de la libreria PixiJS desde Content Delivery Network (Red de Distribución de Contenido) (CDN)
2. Inicializacion de PixiApp (Singleton):
  - Intento de uso de WebGL con aceleracion GPU
  - Fallback automatico a Canvas 2D si WebGL no esta disponible
  - Reemplazo del canvas HTML5 tradicional
3. Carga de assets mediante AssetLoader:
  - Carga asincrona de texturas desde `assets/images/`
  - Organizacion en categorias: vehicles, buildings, roads, objects
4. Creacion del Scene Graph mediante SceneManager:
  - Inicializacion de las 7 capas de renderizado
  - Configuracion de z-index para cada capa
5. Inicializacion de renderizadores especializados
6. Configuracion de CameraController para zoom y pan
7. Inicio del loop de renderizado automatico de PixiJS

## Ciclo de renderizado

El ciclo de renderizado opera a 60 FPS tipico siguiendo esta secuencia:

```
PixiApp.ticker -> SceneManager.update(delta) -> {  
  1. Actualizar color de fondo (DayNightCycle)  
  2. Actualizar vehiculos (CarroRenderer)  
  3. Actualizar etiquetas si cambia estado  
  4. Actualizar conexiones si cambia estado  
  5. Actualizar vertices si cambia estado  
  6. PixiJS renderiza automaticamente el scene graph  
}
```

## Optimizaciones implementadas

Para garantizar rendimiento optimo con cientos de vehiculos simultaneos, se implementaron las siguientes tecnicas de optimizacion:

- **Renderizado selectivo:** Solo se actualizan sprites cuando cambian sus datos
- **Pooling de sprites:** Reutilizacion de objetos para evitar recoleccion de basura excesiva
- **Actualizacion por estado:** Etiquetas, conexiones y vertices solo se renderizan cuando cambian
- **Dirty flags:** Sistema de banderas para detectar cambios y evitar actualizaciones innecesarias
- **Batch rendering:** PixiJS agrupa sprites similares en una sola llamada de dibujo (reduce llamadas a GPU en 90 por ciento)
- **Texture atlas:** Texturas combinadas para reducir cambios de estado en GPU

## Sistema de interactividad

La interactividad del sistema utiliza eventos nativos de PixiJS:

- `pointerdown/pointerup`: Detección de clicks en objetos
- `pointermove`: Seguimiento del movimiento del mouse
- `pointerover/pointerout`: Hover para tooltips
- Capture phase: `CameraController` intercepta eventos antes que PixiJS para controles de cámara

### Controles implementados:

- Scroll: Zoom in/out
- Arrastre: Pan (mover cámara)
- SHIFT + Arrastre: Mover calles en modo edición
- Click en objetos: Ver información detallada
- Handles (círculos): Mover y rotar calles
- Z: Toggle modo edición de vértices
- Ctrl+B: Ocultar/mostrar panel lateral
- Enter: Aplicar cambios en modales de configuración

## Gestión de escenarios

Se implementó un sistema completo de persistencia que permite guardar y cargar configuraciones de simulación. La información almacenada incluye:

- Configuración de todas las calles (posiciones, ángulos, carriles, vértices)
- Configuración de edificios con propiedades visuales
- Configuración completa de estacionamientos (capacidad, conexiones, probabilidades)
- Definición de conexiones entre calles con sus tipos y prioridades
- Parámetros de simulación (probabilidades de generación, cambio de carril)
- Multiplicadores de tráfico por día y hora

El formato utilizado es JavaScript Object Notation (Notación de Objetos de JavaScript) (JSON), permitiendo portabilidad y facilidad de inspección/modificación manual.

## Analizador de metricas con Python

Para el análisis avanzado de resultados, se integro Pyodide (Python compilado a ) que permite ejecutar scripts de Python directamente en el navegador. El analizador genera:

### Visualizaciones de analisis temporal:

- Graficas de Densidad vs Tiempo
- Graficas de Flujo vs Tiempo
- Graficas de Velocidad vs Tiempo
- Clasificacion de estados de trafico por colores

### Diagrama fundamental:

- Entropía de Shannon vs Densidad coloreado por Flujo
- Mapa de calor bidimensional (Dia de semana vs Hora del dia)

### Analisis estadistico:

- Histogramas de distribucion de Densidad y Flujo
- Diagrama de Caja (Boxplot) comparativos de metricas
- Deteccion de anomalias
- Calculo de correlaciones entre variables

El sistema utiliza bibliotecas cientificas de Python: matplotlib, Pandas, NumPy, SciPy, procesando todo localmente sin enviar datos a servidores externos.

## Requisitos del sistema

Para ejecutar FLUVI se requiere:

### Software:

- Python 3.x para servidor HTTP local
- Navegador web moderno (Chrome, Firefox, Safari, Edge)
- WebGL para aceleracion GPU (opcional, fallback a Canvas 2D)
- JavaScript habilitado
- Conexion a Internet para cargar PixiJS desde CDN

### Justificación del servidor local:

WebGL y la carga de recursos (texturas, imágenes) requieren que la aplicación se ejecute desde un servidor local HTTP debido a las políticas de seguridad Cross-Origin Resource Sharing (Intercambio de Recursos de Origen Cruzado) (CORS) (Cross-Origin Resource Sharing) de los navegadores modernos. No es posible abrir el archivo `index.html` directamente desde el sistema de archivos (`file://`) para que WebGL funcione correctamente, ya que los navegadores bloquean las peticiones de recursos locales por razones de seguridad. El servidor local implementado mediante el archivo `INICIAR.SERVIDOR.bat` utiliza Python para crear un servidor HTTP simple en el puerto 8000, permitiendo que el navegador cargue todos los recursos necesarios sin restricciones CORS.

Adicionalmente, este servidor local ofrece la ventaja de permitir el acceso desde múltiples dispositivos conectados a la misma red WiFi, facilitando las pruebas del simulador en diferentes plataformas (Personal Computer (Computadora Personal) (PC), tablets, smartphones) sin necesidad de configuraciones complejas para el ambiente de pruebas. El servidor muestra la dirección Internet Protocol (Protocolo de Internet) (IP) local de la máquina host, permitiendo que otros dispositivos accedan mediante `http://[IP_LOCAL]:8000`, lo cual es especialmente útil durante el desarrollo y pruebas del sistema. La configuración del Firewall de Windows puede ser necesaria para permitir conexiones entrantes al puerto 8000, lo cual se realiza mediante el comando `netsh advfirewall` que crea una regla específica para el servidor FLUVI.

### **Justificación del servidor de producción:**

Para el despliegue en producción del simulador FLUVI, se ha seleccionado Netlify como plataforma de hosting por múltiples razones técnicas y operativas. Netlify es una plataforma de hosting especializada en aplicaciones web estáticas que ofrece un plan gratuito robusto, ideal para proyectos académicos y de código abierto. La integración directa con GitHub permite un flujo de despliegue continuo, donde cada actualización del código en el repositorio se despliega automáticamente en producción sin intervención manual, garantizando que la versión más reciente del simulador en GitHub esté siempre disponible. Netlify proporciona una red de distribución de contenido (CDN) global con más de 100 puntos de presencia en diferentes continentes, lo que asegura tiempos de carga rápidos para usuarios en cualquier parte del mundo, incluyendo América Latina, Europa, Asia y Oceanía. La plataforma soporta Hypertext Transfer Protocol Secure (Protocolo de Transferencia de Hipertexto Seguro) (HTTPS) de forma automática mediante certificados Secure Sockets Layer (Capa de Sockets Seguros) (SSL) gratuitos de Let's Encrypt, garantizando conexiones seguras para todos los usuarios. Además, Netlify ofrece escalabilidad automática que permite manejar desde pocos usuarios hasta miles de visitas simultáneas sin degradación del rendimiento, con un ancho de banda generoso de 100 GB mensuales en el plan gratuito[32].

La plataforma también proporciona características avanzadas como compresión automática de archivos, caché optimizado, y soporte para aplicaciones de una sola página (Single Page Application (Aplicación de Página Única) (SPA)), características esenciales para el correcto funcionamiento de aplicaciones WebGL como FLUVI. El panel de control de Netlify permite monitorear el tráfico, analíticas básicas de uso, y gestionar dominios personalizados si en el futuro se requiere una Uniform Resource Locator (Localizador Uniforme de Recursos) (URL) específica para el proyecto. Esta solución de hosting en la nube elimina la necesidad de mantener servidores físicos, reduciendo costos operativos y complejidad técnica, mientras proporciona alta disponibilidad (del 99.9 %) y respaldos automáticos del contenido desplegado [32].

### **Tabla de Parámetros Modificables**

#### **Total de Parámetros Modificables: 183+ parámetros**

#### **Desglose:**

- Multiplicadores de tráfico por día/hora: 168 valores (7 días  $\times$  24 horas)
- Parámetros de tiempo: 5 parámetros
- Parámetros de calles: 7 parámetros por calle
- Parámetros de edificios/estacionamientos: 54 parámetros por edificio (48 probabilidades + 6 básicos)
- Parámetros de simulación: 8 parámetros globales



- Parámetros visuales: 5 parámetros

Tabla 5.1: Parámetros configurables del sistema FLUVI

Parámetro	Qué Hace	Qué se Modifica
<b>CATEGORÍA: SISTEMA DE TIEMPO</b>		
Segundos por paso	Define cuánto tiempo virtual avanza en cada ciclo de simulación.	Velocidad de avance del tiempo simulado (predeterminado: 2.0 segundos).
Día actual	Día de la semana actual en la simulación.	Día inicial (0=Domingo a 6=Sábado) mediante modal de interfaz.
Hora actual	Hora del día en la simulación.	Hora inicial (0-23) mediante modal de interfaz.
Minuto actual	Minutos de la hora actual.	Minutos iniciales (0-59) mediante modal de interfaz.
Segundo actual	Segundos del minuto actual.	Segundos iniciales (0-59) mediante modal de interfaz.
Usar perfiles	Activa o desactiva perfiles de tráfico dinámicos.	Valor booleano que habilita multiplicadores por hora (interruptor en interfaz).
<b>CATEGORÍA: MULTIPLICADORES DE TRÁFICO (168 valores)</b>		
Multiplicadores por día y hora	Controla la intensidad de generación de vehículos para cada hora de cada día.	Valores de 0.0 a 3.0 mediante 24 deslizadores por día en modal “Configurar Multiplicador”. Incluye preajustes: laboral, fin de semana, constante, nocturno.
<b>CATEGORÍA: PARÁMETROS DE CALLES</b>		
Probabilidad de generación	Frecuencia con la que se generan vehículos en calles generadoras.	Porcentaje 0-100 % mediante entrada en “Configuración de Calles”.
Probabilidad de salto de carril	Probabilidad de que un vehículo cambie de carril cuando es posible.	Porcentaje 0-100 % (predeterminado: 2 %) mediante entrada en interfaz.
Tamaño	Longitud de la calle en celdas.	Número de celdas 1-2500 (predeterminado: 100) en modal crear o editar calle.
Carriles	Cantidad de carriles de la calle.	Número de carriles 1-10 (predeterminado: 3) en modal crear o editar calle.
Posición X, Y	Posición de la calle en el mapa.	Coordenadas mediante arrastre visual o entradas numéricas.
Ángulo	Rotación de la calle.	Ángulo 0-360° mediante rotación visual o entrada numérica.

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 5.1 – Continuación de la página anterior

Parámetro	Qué Hace	Qué se Modifica
Tipo	Comportamiento de la calle.	Opciones: “GENERADOR” (crea vehículos), “CONEXIÓN” (conecta), “DEVORADOR” (elimina vehículos).
<b>CATEGORÍA: PARÁMETROS DE ESTACIONAMIENTOS</b>		
Capacidad máxima	Máximo de vehículos que puede almacenar el estacionamiento.	Número 1-500 vehículos (predeterminado: 50) mediante entrada.
Probabilidades de entrada	Probabilidad de que vehículos entren por hora (24 valores).	24 valores de 0-100 % mediante deslizadores horarios. Preajustes: normal, oficina, centro.
Probabilidades de salida	Probabilidad de que vehículos salgan por hora (24 valores).	24 valores de 0-100 % mediante deslizadores horarios. Preajustes: normal, oficina, centro.
Conexiones	Puntos de entrada y salida del estacionamiento.	Hasta 10 pares (entrada y salida). Cada uno define: calle, carril, posición.
<b>CATEGORÍA: PARÁMETROS DE EDIFICIOS</b>		
Posición X, Y	Posición del edificio en el mapa.	Coordenadas en píxeles (predeterminado: 500, 500).
Ancho y alto	Dimensiones del edificio.	Ancho y alto en píxeles (predeterminado: 100×100, mínimo: 1).
Ángulo	Rotación del edificio.	Ángulo 0-360° (predeterminado: 0).
<b>CATEGORÍA: CONTROL DE SIMULACIÓN</b>		
Intervalo deseado	Velocidad de ejecución de la simulación.	Intervalo 0-250 ms mediante deslizador 1-100. Controla ciclos por segundo.
Tamaño de celda	Tamaño visual de cada celda.	Píxeles por celda (fijo: 5 px) - constante predefinida en código.
Deslizador de velocidad	Control visual de velocidad.	Deslizador de 1 (más lento) a 100 (más rápido).
Deslizador de probabilidad	Probabilidad global de generación.	Deslizador 0-100 % (solo activo cuando perfiles desactivados).
Distancia de detección	Distancia de detección de obstáculos.	Número de celdas adelante que un vehículo observa (fijo: 3 celdas).
<b>CATEGORÍA: PARÁMETROS DE CONEXIONES</b>		

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 5.1 – Continuación de la página anterior

Parámetro	Qué Hace	Qué se Modifica
Tipo de conexión	Cómo fluye el tráfico entre calles.	“LINEAL” (uno a uno), “INCORPORACIÓN” (fusión), “PROBABILÍSTICA” (distribución).
Carril destino	Carril objetivo en incorporaciones.	Número de carril al que se incorpora el tráfico.
Posición inicial	Posición inicial en destino.	Índice de celda donde aparecen vehículos al incorporarse.
Probabilidad de transferencia	Probabilidad de transferencia en conexiones probabilísticas.	Valor 0.0-1.0 para cada destino posible.
<b>CATEGORÍA: RENDERIZADO Y VISUALIZACIÓN</b>		
Resolución	Resolución del renderizado.	1x (móvil) o hasta 2x (escritorio) - automático según dispositivo.
Suavizado de bordes	Suavizado de bordes.	Falso (móvil) o verdadero (escritorio) - automático.
Fotogramas máximos por segundo	Máximo de fotogramas por segundo.	30 FPS (móvil) o 60 FPS (escritorio) - automático.
Mostrar conexiones	Muestra líneas de conexiones entre calles.	Interruptor booleano (predeterminado: falso).
Mostrar vértices	Muestra puntos de vértices de calles.	Interruptor booleano (predeterminado: falso).
Mostrar etiquetas	Muestra etiquetas de calles.	Interruptor booleano (predeterminado: falso).
Mostrar contadores	Muestra contadores de vehículos.	Interruptor booleano (predeterminado: falso).
Modo oscuro	Activa tema oscuro o claro.	Interruptor guardado en almacenamiento local.
Registros de consola	Activa registros de depuración.	Interruptor para habilitar o deshabilitar registros en consola.
Detección de celda	Muestra números de celda al pasar el ratón.	Interruptor (impacta rendimiento).
<b>CATEGORÍA: EDICIÓN DE CURVAS</b>		
Rotación por vértice	Permite curvar calles.	Máximo $\pm 40^\circ$ por vértice, activado con tecla ‘Z’.

### Compatibilidad y portabilidad

El sistema garantiza amplia compatibilidad mediante:

- **Deteccion automatica de capacidades:** Verifica disponibilidad de WebGL al iniciar
- **Fallback a Canvas 2D:** Si WebGL no esta disponible, usa renderizado software
- **Multi-plataforma:** Funciona en Windows, macOS, Linux

- **Responsive:** Se adapta automáticamente al tamaño de ventana
- **Sin dependencias de servidor:** Todo el procesamiento es local en el navegador

### 5.1.3. Reglas de transición

El núcleo del simulador son las reglas de transición, que determinan cómo los vehículos se mueven a lo largo de las calles. Estas reglas están basadas en el autómata celular elemental 184 (ECA 184), un modelo ampliamente utilizado para simular el flujo de tráfico unidimensional. Las reglas se aplican a tres celdas consecutivas (izquierda, actual y derecha) y definen el comportamiento de los vehículos en función del estado de estas celdas.

### 5.1.4. Implementación de las Reglas ECA 184

Las reglas se implementan mediante un objeto reglas que mapea cada combinación posible de estados de las celdas a un resultado específico. A continuación, se describe el comportamiento de cada regla:

### 5.1.5. Estructura de Calles

Cada calle se modela como un objeto que contiene:

- **Tamaño:** Longitud de la calle en celdas.
- **Tipo de calle:** Puede ser un generador de vehículos ("**generador**"), un devorador ("**devorador**"), o una conexión ("**conexion**").
- **Probabilidad de generación:** Probabilidad de que se genere un vehículo en la primera celda de la calle de tipo generación.
- **Arreglo de celdas:** Representa el estado actual de la calle (vehículos y espacios vacíos).
- **Coordenadas y ángulo:** Posición y orientación de la calle en el espacio de simulación.

### Creación del objeto calle

Se crea un objeto calle con las siguientes propiedades:

- **tamano:** Longitud de la calle en número de celdas.
- **tipoInicio:** Tipo de inicio de la calle ("**generador**", "**conexion**" o "**null**"). [Referencia a la sección de Tipos de Calle]
- **tipoFinal:** Tipo de final de la calle ("**generador**", "**conexion**" o "**null**"). [Referencia a la sección de Tipos de Calle]
- **probabilidadGeneracion:** Probabilidad de que se genere un nuevo carro en la calle en cada paso de la simulación (solo si **tipoInicio** es "**generador**").
- **arreglo:** Arreglo que representa la calle, donde cada elemento es una celda que puede estar vacía (0) o ocupada por un carro (1). Se inicializa con un arreglo de tamaño **tamano** lleno de ceros.
- **x** e **y:** Coordenadas de la posición inicial de la calle en el lienzo, en píxeles. Se multiplican por **celda\_tamano** para escalar las coordenadas a la cuadrícula de la simulación. [Referencia a la sección de Visualización]
- **angulo:** Ángulo de rotación de la calle en grados.

## Generación de carros iniciales

Si el `tipoInicio` de la calle es "generador", se itera sobre el arreglo `calle.arreglo` y se asigna aleatoriamente un 1 (carro) o un 0 (vacío) a cada celda. La probabilidad de que una celda se inicie con un carro es del 10 % (`Math.random() < 0.1`).

## Almacenamiento de la calle

La nueva calle se agrega al arreglo `calles`, que contiene todas las calles de la simulación.

## Retorno de la calle

La función retorna el objeto calle creado.

### 5.1.6. Conexión de Calles

Las calles se conectan entre sí para formar una red vial funcional. Esto se logra definiendo explícitamente las relaciones entre calles mediante funciones especializadas y almacenándolas en el arreglo global `conexionesCA`. Posteriormente, estas conexiones se mapean a las calles correspondientes para su uso en la simulación.

## Explicación del Código

### Definición de Conexiones

En lugar de una única verificación genérica, el sistema utiliza funciones específicas según el comportamiento del tráfico deseado:

- **crearConexionLineal**: Vincula el final de una calle con el inicio de otra de forma directa.
- **crearConexionProbabilistica**: Permite definir múltiples destinos desde un mismo carril con probabilidades asignadas (ej. desviaciones o retornos).
- **crearConexionIncorporacion**: Gestiona la entrada de vehículos desde una calle secundaria a una posición específica de una calle principal.

Estas funciones generan objetos de conexión que se agregan al arreglo `conexionesCA`.

### Registro y Mapeo de Conexiones

Una vez definidas todas las conexiones, se ejecuta la función `registrarConexiones(conexionesCA)`. Este paso es crítico para el funcionamiento de la red:

1. **Inicialización**: Recorre todas las calles y prepara una estructura de datos (`conexionesSalida`) para cada carril de la calle.
2. **Asignación**: Itera sobre el arreglo de conexiones y asigna cada objeto de conexión directamente a la calle de origen correspondiente, específicamente en el índice del carril de origen (`carrilOrigen`).

Esto transforma una lista plana de conexiones en una estructura de grafo navegable, donde cada calle "conoce" sus salidas disponibles por carril.

## Manejo de errores

Si las calles no son compatibles, se muestra un mensaje de error en la consola del navegador indicando que la conexión no se puede realizar.

## Funcionalidad

Esta función permite simular intersecciones y transferir vehículos entre calles.

### 5.1.7. Sistema de Configuración de Escenarios

#### Descripción General

El sistema de configuración de escenarios permite simular situaciones especiales de tráfico mediante la creación de obstáculos, inundaciones y bloqueos en las vialidades. Esta funcionalidad es fundamental para probar la respuesta del sistema ante condiciones adversas y evaluar diferentes estrategias de gestión del tráfico.

#### Tipos de Escenarios

El sistema implementa tres tipos de escenarios:

**Bloqueo de Carril** Permite bloquear celdas específicas para simular obstáculos permanentes en la vía.

##### Implementación:

- Modo de pintado interactivo sobre el canvas
- Marcado de celdas individuales o consecutivas mediante arrastre del mouse
- Almacenamiento en estructura de datos de celdas bloqueadas

##### Efecto en la simulación:

- Los vehículos no pueden atravesar las celdas bloqueadas
- Búsqueda automática de rutas alternativas

**Inundación** Simula áreas inundadas que bloquean completamente el paso de vehículos.

##### Implementación:

- Modo de pintado específico para zonas inundadas
- Representación visual diferenciada en el canvas
- Detención completa de vehículos en zonas afectadas

##### Casos de uso:

- Simulación de lluvias intensas
- Escenarios de emergencia
- Evaluación de rutas alternativas en condiciones climáticas adversas

**Obstáculos** Coloca obstáculos específicos en las calles con diferentes características visuales y funcionales.

**Tipos de obstáculos:**

- **Bache:** Simula imperfecciones en el pavimento
- **Construcción:** Representa zonas de trabajo o mantenimiento vial
- **Árbol caído:** Simula objetos grandes que obstruyen la vía

**Implementación:**

- Selector de tipo de obstáculo
- Colocación mediante clic en celdas específicas
- Iconografía diferenciada para cada tipo

## Gestión de Escenarios

**Guardado de Configuraciones** El sistema permite guardar configuraciones completas de escenarios en formato JSON con la siguiente estructura:

```
{
  "version": "1.0",
  "id": "timestamp",
  "nombre": "Nombre descriptivo",
  "descripcion": "Descripción detallada",
  "fechaCreacion": "ISO 8601 timestamp",
  "callesConfig": [
    {
      "id": "calle_id",
      "nombre": "Nombre de calle",
      "tamano": 100,
      "carriles": 2
    }
  ],
  "celdasBloqueadas": [
    {
      "calleNombre": "Calle Principal",
      "calleId": "calle_001",
      "carril": 0,
      "indice": 25,
      "tipo": "inundacion|bloqueo|obstaculo",
      "texture": "tipo_obstaculo"
    }
  ],
  "estadisticas": {
    "totalBloqueos": 15,
    "totalInundaciones": 8,
    "totalObstaculos": 5
  }
}
```



**Carga de Configuraciones** El sistema implementa las siguientes validaciones:

- Validación automática de formato JSON
- Verificación de compatibilidad con configuración actual de calles
- Validación de dimensiones y cantidad de carriles
- Actualización automática de visualización

## **Integración con el Sistema**

### **Modo de Edición:**

- Activación mutuamente excluyente con modo de edición de calles
- Pausa automática de la simulación al entrar en modo de escenario
- Indicadores visuales de modo activo

### **Renderizado:**

- Compatible con renderizado Canvas 2D y PixiJS
- Actualización automática del canvas al guardar o cargar escenarios
- Representación visual diferenciada por tipo de escenario

## **5.1.8. Constructor de Mapas**

### **Descripción General**

El Constructor de Mapas es la herramienta principal para crear, editar y gestionar simulaciones personalizadas de tráfico. Permite diseñar redes viales complejas desde cero, incluyendo calles rectas y curvas, edificios decorativos, y conexiones entre vialidades.

### **Gestión de Simulaciones**

#### **Operaciones Básicas Nueva Simulación:**

- Limpieza completa del canvas
- Eliminación de todos los elementos (calles, edificios, conexiones)
- Reinicio de contadores y métricas

**Guardar Simulación:** Exporta la configuración completa en formato JSON que incluye:

- Todas las calles con sus propiedades (posición, tamaño, tipo, carriles, probabilidades)
- Vértices de calles curvas
- Todos los edificios decorativos
- Todas las conexiones entre calles
- Configuración del tiempo virtual
- Metadata (fecha de creación, versión)

#### **Cargar Simulación:**

- Importación desde archivo JSON
- Validación de formato y compatibilidad
- Reconstrucción automática de todos los elementos
- Reporte de elementos cargados (calles, edificios, conexiones)

## Modo Edición Visual

**Selección de Objetos** El sistema implementa dos métodos de selección:

1. **Selectores dropdown:** Menús desplegables organizados por tipo (Calle/Edificio)
2. **Atajo rápido:** Ctrl+Clic (Cmd+Clic en Mac) directamente sobre objetos en el canvas

### Indicadores visuales:

- Objeto seleccionado: Borde naranja en modo constructor
- Objeto con modo edición activo: Borde naranja con handles de control

## Controles de Edición **Handles de movimiento:**

- Círculo azul en el centro del objeto
- Permite arrastrar y reposicionar libremente

### Handles de rotación:

- Círculo verde en esquina superior derecha
- Rotación alrededor del centro del objeto
- Actualización de ángulo

### Botones de acción:

- **Guardar:** Aplica permanentemente los cambios
- **Cancelar:** Descarta cambios y restaura estado original

## Ajustes Avanzados

**Control Numérico de Posición** Campos disponibles para control preciso:

- **X:** Coordenada horizontal (píxeles)
- **Y:** Coordenada vertical (píxeles)
- **Ángulo:** Rotación 0-360° (0°=horizontal derecha, 90°=vertical abajo, 180°=horizontal izquierda, 270°=vertical arriba)

## Dimensiones de Calle

- **Tamaño:** Longitud en celdas (rango: 10-500)
- **Carriles:** Número de carriles (rango: 1-10)

**Advertencia:** Cambiar dimensiones reinicia el contenido de la calle, eliminando todos los vehículos existentes.

## Sistema de Calles Curvas

El sistema permite crear calles con formas curvas mediante vértices de control.

### Implementación de Vértices Tipos de vértices:

- **Verde:** Vértice inicial (inicio de calle)
- **Rojo:** Vértice final (fin de calle)
- **Amarillo:** Vértices intermedios

### Edición de curvatura:

- Arrastre perpendicular a la dirección de la calle
- Límite de curvatura:  $\pm 40^\circ$  por vértice
- Guía visual azul indica dirección permitida
- Prevención automática de curvas demasiado cerradas

### Algoritmo de Generación de Curvas

1. Interpolación entre vértices mediante curvas de Bézier
2. Cálculo de ángulos de transición
3. Generación de celdas a lo largo de la curva
4. Ajuste de spacing para mantener longitud consistente

### Gestión de Elementos

**Agregar Calle** Formulario con los siguientes campos y validaciones:

Campo	Rango/Tipo	Descripción
Nombre	String (max 100 caracteres)	Identificador único de la calle
Tamaño	1-2500 celdas	Longitud de la calle
Tipo	GENERADOR, CONEXION, DEVORADOR	Tipo funcional de la calle
Carriles	1-10	Número de carriles paralelos
Posición X	Valor numérico	Coordenada horizontal en píxeles
Posición Y	Valor numérico	Coordenada vertical en píxeles
Ángulo	0-360 grados	Orientación inicial de la calle
Probabilidad de Generación	0-100 %	Aplicable solo para tipo GENERADOR
Probabilidad de Cambio de Carril	0-100 %	Aplicable a todos los tipos

Tabla 5.2: Campos del formulario de creación de calles

### Validación:

- Verificación en tiempo virtual
- Marcado de campos inválidos en rojo
- Corrección automática de valores fuera de rango

**Agregar Edificio** Elementos decorativos sin efecto en la simulación de tráfico:

- Nombre
- Posición (X, Y)
- Dimensiones (Ancho, Alto)
- Ángulo de rotación

**Agregar Conexión** El sistema implementa tres tipos de conexión entre calles:

**1. Lineal (1 a 1):**

- Conecta cada carril origen con su correspondiente en destino
- Conexión directa y simple
- No requiere parámetros adicionales
- Ejemplo: Carril 0  $\rightarrow$  Carril 0, Carril 1  $\rightarrow$  Carril 1, etc.

**2. Incorporación (varios a uno):**

- Todos los carriles origen se incorporan a un solo carril destino
- Útil para rampas de entrada y fusión de carriles
- Parámetros requeridos:
  - Carril destino (número de carril)
  - Posición inicial (índice de celda)

**3. Probabilística:**

- Conexión con decisión aleatoria
- Permite bifurcaciones y distribuciones de tráfico
- Parámetros requeridos:
  - Carril origen (número)
  - Carril destino (número)
  - Probabilidad (0.0-1.0)
- Configuración avanzada:
  - Múltiples conexiones probabilísticas desde mismo carril
  - Suma de probabilidades  $\leq 1,0$
  - Vehículos pueden continuar en calle original si suma  $< 1,0$

### **Eliminar Objeto**

- Eliminación permanente de calle o edificio seleccionado
- Eliminación automática de conexiones asociadas a calles
- Confirmación requerida antes de eliminar

### **Visualización de Conexiones**

El sistema proporciona una lista detallada de conexiones existentes con la siguiente información:

- Tipo de conexión
- Calle origen → Calle destino
- Números de carril
- Probabilidad (para conexiones probabilísticas)

#### **Filtrado:**

- Mostrar solo conexiones de calle seleccionada
- Útil para calles con múltiples conexiones complejas

#### **Edición de conexiones:**

- Cambio de tipo de conexión
- Modificación de carriles origen y destino
- Ajuste de probabilidades
- Cambio de posición inicial (para incorporaciones)

#### **Eliminación de conexiones:**

- Remoción permanente
- Actualización automática del flujo vehicular

## **5.1.9. Sistema de Métricas de Simulación**

### **Descripción General**

El sistema de métricas proporciona análisis en tiempo virtual del comportamiento del tráfico mediante un panel de interpretación inteligente, cinco gráficas interactivas y capacidades de exportación de datos.

### **Características del Sistema**

#### **Actualización:**

- Cada 5 frames (optimizado para rendimiento)
- Historial de 50 puntos en gráficas (ventana deslizante)
- Historial completo ilimitado para exportación

#### **Análisis:**

- Interpretación automática del estado del tráfico
- Tooltips informativos con contexto adicional
- Clasificación en 5 estados posibles del sistema

## Panel de Interpretación de Métricas

Sistema de análisis automático que evalúa las métricas actuales y clasifica el estado del tráfico.

### Estados del Sistema 1. Colapso de Tráfico (Crítico)

- Condiciones: Densidad  $> 80 \%$ , Velocidad  $< 15 \%$
- Significado: Calles severamente congestionadas, vehículos casi paralizados
- Flujo vehicular casi nulo, posible bloqueo total (gridlock)
- Apariencia: Color rojo intenso

### 2. Flujo Óptimo (Excelente)

- Condiciones: Flujo  $\geq 2,5$  veh/s, Densidad 25-60 %, Velocidad  $\geq 50 \%$
- Significado: Máxima eficiencia del sistema
- Balance ideal entre densidad y velocidad según  $Q = k \times v$
- Apariencia: Color verde

### 3. Tráfico Congestionado (Alto)

- Condiciones: Densidad  $> 65 \%$ , Velocidad  $< 35 \%$
- Significado: Alta densidad, movimiento lento pero continuo
- Riesgo de colapso
- Apariencia: Color naranja

### 4. Sistema Sub-utilizado (Bajo)

- Condiciones: Densidad  $< 25 \%$ , Flujo  $< 1,5$  veh/s
- Significado: Baja ocupación, capacidad no utilizada
- Apariencia: Color azul

### 5. Flujo Moderado (Aceptable)

- Condiciones: Cualquier situación que no cumpla los criterios anteriores
- Significado: Tráfico aceptable con margen de mejora
- Apariencia: Color amarillo

## Gráficas en tiempo virtual

El sistema implementa cinco gráficas de línea temporal utilizando Chart.js:

**1. Densidad de Tráfico Métrica:** Porcentaje de ocupación de calles

**Fórmula:**

$$Densidad(\%) = \frac{\text{Total de vehículos}}{\text{Total de celdas}} \times 100 \quad (5.1)$$

**Rango:** 0 % – 100 %

**Interpretación:**

- 0-15 %: Muy baja
- 15-25 %: Baja
- 25-45 %: Moderada
- 45-60 %: Zona óptima
- 60-75 %: Alta
- 75-85 %: Muy alta
- 85-100 %: Crítica

**2. Flujo Vehicular Métrica:** Flujo real en vehículos por segundo

**Ecuación fundamental del tráfico:**

$$Q = k \times v \times f_{temporal} \quad (5.2)$$

donde:

- $Q$  = Flujo vehicular (veh/s)
- $k$  = Densidad (veh/celda)
- $v$  = Fracción de vehículos en movimiento
- $f_{temporal} \approx 10$  (frames/s estimado)

**Rango:** 0 – 6+ veh/s

**Clasificación:**

- $< 0,8$ : Muy bajo
- $0,8 - 2,0$ : Bajo
- $2,0 - 3,0$ : Moderado
- $3,0 - 4,0$ : Bueno
- $4,0 - 4,5$ : Alto
- $\geq 4,5$ : Excelente

**3. Velocidad Promedio** Métrica: Porcentaje de vehículos en movimiento  
Fórmula:

$$Velocidad(\%) = \frac{\text{Vehículos con celda siguiente libre}}{\text{Total de vehículos}} \times 100 \quad (5.3)$$

**Rango:** 0 % – 100 %

**Clasificación:**

- < 15 %: Detenido
- 15 – 30 %: Lento
- 30 – 50 %: Moderado
- 50 – 70 %: Fluido
- 70 – 80 %: Muy fluido
- $\geq$  80 %: Excelente

**4. Tasa de Cambio** Métrica: Cambio neto de población vehicular por segundo  
Fórmula:

$$Tasa = \frac{Población_t - Población_{t-1}}{Tiempo} \quad (5.4)$$

**Rango:** 0 – 10+ veh/s

**Interpretación:**

- < -3: Decrecimiento rápido
- -3 a -1: Decrecimiento lento
- -1 a 1: Estable
- 1 a 3: Crecimiento lento
- 3 a 6: Crecimiento moderado
- $\geq$  6: Crecimiento rápido

**5. Entropía de Shannon** Métrica: Diversidad de reglas/transiciones aplicadas en el autómata celular

**Fórmula:**

$$H = - \sum p_i \log_2 p_i \quad (5.5)$$

donde  $p_i$  es la proporción de cada tipo de transición.

**Rango:** 0 – 2,5 bits

**Tipos de transiciones:**

**Exportación de Métricas**

El sistema permite exportar todas las métricas recolectadas en dos formatos:



Código	Tipo	Descripción
0	STAY_EMPTY	Celda permanece vacía
1	ADVANCE	Vehículo avanza desde celda anterior
2	STOPPED	Vehículo se detiene
3	MOVE_OUT	Vehículo sale de celda
4	SPAWN	Vehículo generado

Tabla 5.3: Tipos de transiciones del autómata celular

### Formato CSV

- Exporta historial completo (ilimitado)
- Estructura tabular con encabezados
- Columnas: Generación, Vehículos, Hora, Densidad, Flujo, Velocidad, Tasa de Cambio, Entropía
- Compatible con Excel, Google Sheets, análisis estadístico

### Formato JSON

- Exporta historial completo con metadata
- Incluye información de la simulación
- Estructura jerárquica completa
- Ideal para procesamiento programático

### 5.1.10. Sistema de Tiempo Virtual

#### Descripción General

El sistema de tiempo virtual permite simular diferentes momentos del día y días de la semana, afectando la generación de vehículos mediante perfiles dinámicos de tráfico.

#### Implementación del Tiempo

##### Parámetros Físicos

- Velocidad vehicular: 50 km/h = 13.89 m/s
- Distancia por celda: 5 metros
- Tiempo físico teórico:  $5m \div 13,89m/s \approx 0,36s$
- Calibrado empíricamente:  $\sim 0,9s$  (ajustado para realismo)

#### Relación con Velocidad de Simulación Fórmula:

$$Tiempo/Frame(s) = 1,016 \times \frac{IntervaloSlider}{250ms} \quad (5.6)$$

con mínimo: 0.001s

Barra Deslizante	Velocidad	Intervalo (ms)	Tiempo/Frame (s)
0	Muy lenta	250	$\sim 1,000$
25	Lenta	$\sim 188$	$\sim 0,750$
50	Media	$\sim 126$	$\sim 0,512$
75	Rápida	$\sim 63$	$\sim 0,250$
100	Muy rápida	0	$\sim 0,001$

Tabla 5.4: Relación entre la barra deslizante de velocidad y tiempo simulado

### Perfiles Dinámicos de Tráfico

El sistema implementa perfiles de tráfico que varían según la hora del día, simulando patrones realistas de tráfico urbano.

Hora del día	Multiplicador	Descripción
00:00 - 05:00	$0,2 \times -0,3 \times$	Madrugada – Tráfico mínimo
06:00 - 08:00	$0,8 \times -1,5 \times$	Mañana – Incremento gradual
08:00 - 09:00	$1,8 \times -2,0 \times$	Hora pico matutina
09:00 - 12:00	$1,2 \times -1,4 \times$	Media mañana – Moderado
12:00 - 14:00	$1,3 \times -1,6 \times$	Hora del almuerzo
14:00 - 17:00	$1,0 \times -1,2 \times$	Tarde – Normal
17:00 - 19:00	$1,8 \times -2,0 \times$	Hora pico vespertina
19:00 - 22:00	$0,8 \times -1,0 \times$	Noche – Disminución
22:00 - 24:00	$0,4 \times -0,6 \times$	Noche tardía – Bajo

Tabla 5.5: Perfiles dinámicos de tráfico por hora del día

### Multiplicadores por Hora

#### Cálculo de Generación Con perfiles activados:

$$Generación_{real} = Multiplicador_{hora} \times Probabilidad_{base} \quad (5.7)$$

#### Con perfiles desactivados:

$$Generación_{real} = Valor_{slider} \quad (5.8)$$

donde  $Multiplicador_{hora}$  es función de la hora simulada actual.

### 5.1.11. Barra de Control del Simulador

#### Descripción General

La barra de control proporciona acceso rápido a las funciones principales del simulador sin necesidad de abrir el panel lateral. Está organizada en 6 secciones funcionales con controles para reproducción, visualización, generación y ajuste de parámetros.

## Controles de Simulación

1.

### **Pausar/Reanudar - Funcionalidad:**

- Alterna entre pausa y reproducción con un solo clic
- Estado pausado: permite edición manual, modo escenarios, paso a paso
- Estado reproducción: movimiento automático de vehículos, generación activa

2.

### **Paso a Paso - Características:**

- Habilitado únicamente cuando la simulación está pausada
- Avanza exactamente un frame (una iteración)
- Ejecuta: generación, transferencias, avance, suavizado, render
- Útil para depuración y análisis detallado

## Controles de Visualización

El sistema implementa cuatro botones para controlar la visibilidad de elementos auxiliares:

**Conexiones** Muestra líneas de conexión entre calles con codificación por color:

- Verde: Conexión lineal
- Naranja: Incorporación
- Morado: Probabilística

**Vértices** Muestra puntos de control de calles:

- Verde: Vértice inicial
- Rojo: Vértice final
- Amarillo: Vértices intermedios
- Permite edición de curvas cuando está activo

**Intersecciones** Muestra puntos donde dos o más calles se solapan, fundamental para:

- Detección de colisiones
- Aplicación de algoritmo de suavizado
- Depuración de conflictos de tráfico

**Etiquetas** Muestra/oculta nombres de calles y edificios con fondo semitransparente para legibilidad.

## Controles de Acción

### Llenar Aleatorio Algoritmo:

1. Para cada calle del mapa:
  - a) Recorrer carriles y celdas
  - b) Generar número aleatorio  $\in [0, 1]$
  - c) Si  $aleatorio < probabilidad_{generación}$ : colocar vehículo tipo 1-6
  - d) En caso contrario: dejar celda vacía (0)
2. Aplicar suavizado de intersecciones
3. Re-renderizar canvas

### Advertencias:

- Sobrescribe configuración existente
- Llena todos los tipos de calles (generadores, normales, absorbentes)
- Probabilidades altas ( $> 50\%$ ) pueden causar congestión inmediata

### Borrar Vehículos Operación:

- Establece todas las celdas a 0 (vacía)
- Resetea contador de vehículos
- Acción irreversible
- La simulación puede continuar (generadores seguirán activos)

## Control de Velocidad

### Elementos:

- la barra deslizante: rango 1-100
- Badge: muestra valor actual

### Relación con intervalos:

$$Intervalo(ms) = 250 - \frac{Valor - 1}{99} \times 250 \quad (5.9)$$

### Uso recomendado:

- 1-30: Análisis detallado, depuración
- 31-60: Simulación realista, observación normal
- 61-100: Pruebas rápidas, time-lapse

## Control de Generación

### Funcionalidad:

- Controla probabilidad de generación en calles tipo GENERADOR
- Rango: 0-100 %
- Solo activo cuando perfiles dinámicos están desactivados

### Estados:

- Deshabilitado (gris): Perfiles activados, control automático por hora
- Habilitado (azul): Control manual, valor constante

### Valores recomendados:

- 5-15 %: Tráfico ligero
- 15-30 %: Tráfico moderado
- 30-60 %: Tráfico pesado
- 60-100 %: Saturación

## Toggle de Perfiles Dinámicos

### Activado (recomendado):

- Generación varía por hora del día
- Multiplicador automático
- Realismo alto: simula horas pico y valle

### Desactivado:

- Generación constante (multiplicador 1,0×)
- Útil para experimentos controlados

## 5.1.12. Barra de Información

### Descripción General

La barra de información es una franja horizontal ubicada en la parte superior de la pantalla que muestra métricas en tiempo virtual de la simulación. Se actualiza automáticamente en cada iteración y proporciona información crucial sobre el estado actual del sistema.

### Métricas Mostradas

La barra presenta 5 métricas principales separadas por barras verticales:

#### 1. Generación Valor: Número entero

**Representa:** Número de iteraciones o frames ejecutados desde el inicio

#### Comportamiento:

- Se incrementa en 1 cada ciclo de simulación
- Se resetea a 0 al reiniciar o cargar nuevo mapa

**2. Vehículos Valor:** Número entero

**Representa:** Cantidad total de vehículos presentes en todas las calles

**Cálculo:**

- Recorre todas las calles del mapa
- Cuenta cada celda ocupada en todos los carriles
- Incluye todos los tipos de vehículos (1-6)

**3. Hora Formato:** DD/MM/AAAA HH:MM:SS

**Representa:** Fecha y hora simulada del mundo virtual

**Avance temporal:**

- Basado en parámetros físicos: 50 km/h, 5m por celda
- Escalado según la barra deslizante de velocidad
- No es la hora real de la computadora

**4. Tiempo/Frame Valor:** Segundos con 3 decimales

**Representa:** Tiempo simulado que representa cada frame

**Fórmula:**

$$Tiempo/Frame = 1,016s \times \frac{IntervaloSlider}{250ms} \quad (5.10)$$

con mínimo: 0.001s

**5. Multiplicador de Generación Valor:** Multiplicador con 1 decimal (formato: X.X×)

**Representa:** Factor de generación aplicado según hora simulada

**Rango típico:**

- Mínimo: 0,0× (no se generan vehículos)
- Normal: 1,0× (generación base)
- Hora pico: 1,8 × −2,0×

**Actualización Automática**

**Frecuencia:**

- Durante simulación activa: cada frame
- Al reiniciar: reseteo completo
- Al cambiar velocidad: recálculo de Tiempo/Frame
- Al cambiar hora: actualización de Hora y Multiplicador

**Integración:**

- Sistema de tiempo virtual
- Perfiles de tráfico
- Motor de simulación
- Barra de control inferior

### 5.1.13. Actualización del Estado

En cada paso de la simulación, las reglas de transición de los Autómatas Celulares [Referencia a la sección de Autómatas Celulares] se aplican en cada paso de la simulación para actualizar el estado de cada calle, que representamos como un arreglo unidimensional [Referencia a la sección de Estructura de Datos]. La función `actualizarCalle` utiliza el objeto `reglas` [Referencia a la sección de Reglas de Transición] para determinar el nuevo estado de cada celda en función de sus vecinos.

Explicación del Código

#### Copia del arreglo

La función comienza creando una copia del arreglo que representa la calle (`calle.arreglo`) en una nueva variable llamada `nuevaCalle`. Esto se hace para evitar modificar el estado actual de la calle mientras se calculan los nuevos estados de las celdas.

#### Iteración sobre las celdas

Se utiliza un bucle `for` para iterar sobre cada celda de la calle, excepto la primera y la última. El índice `i` representa la posición de la celda actual en el arreglo.

#### Obtención de los vecinos

Para cada celda, se obtienen los valores de sus vecinos izquierdo y derecho. Si la celda está en el borde izquierdo de la calle (`i > 0`), se considera que su vecino izquierdo tiene un valor de 0. De manera similar, si la celda está en el borde derecho (`i < calle.tamano - 1`), su vecino derecho se considera 0.

#### Construcción de la clave de la regla

Se construye una cadena de texto (`reglaKey`) concatenando los valores de los vecinos izquierdo, actual y derecho, separados por comas. Esta cadena se utiliza como clave para acceder al objeto `reglas`.

#### Aplicación de la regla

Se busca la regla correspondiente a `reglaKey` en el objeto `reglas`. El valor asociado a esta regla se asigna a la posición `i` en el arreglo `nuevaCalle`, actualizando el estado de la celda.

#### Actualización de la calle

Una vez que se han actualizado todas las celdas, el arreglo `nuevaCalle` se asigna a `calle.arreglo`, reemplazando el estado anterior de la calle con el nuevo estado calculado.

### 5.1.14. Visualización

La visualización del tráfico se realiza mediante la función `renderizarCalles`, que dibuja cada calle en el espacio de simulación utilizando coordenadas y ángulos específicos:

Explicación del Código

#### Obtención del contenedor

Se obtiene una referencia al elemento HyperText Markup Language (Lenguaje de Marcado de Hipertexto) (HTML) con el id "`simulador`", que es el contenedor donde se dibujarán las calles.



## Limpieza del contenedor

Se limpia el contenido del contenedor para eliminar cualquier elemento que se haya dibujado previamente.

## Iteración sobre las calles

Se utiliza un bucle `forEach` para iterar sobre cada calle en el arreglo `calles`.

## Creación del contenedor de la calle

Para cada calle, se crea un nuevo elemento `div` (`calleContainer`) que actuará como contenedor de las celdas de la calle.

## Posicionamiento y rotación

Se establece la posición del contenedor de la calle en el lienzo utilizando las propiedades `x` e `y` de la calle. [Referencia a la sección de Creación de Calles] También se aplica una rotación al contenedor utilizando la propiedad `angulo` de la calle. [Referencia a la sección de Creación de Calles] La traslación se realiza en dos pasos para asegurar que la rotación se aplique sobre el inicio de la calle.

## Renderización de las celdas

Se itera sobre el arreglo `calle.arreglo` que representa el estado de la calle. [Referencia a la sección de Creación de Calles] Para cada celda, se crea un nuevo elemento `div` con la clase `cuadro`. Se establece el tamaño de la celda utilizando la variable `celda_tamano` [Referencia a la sección de Visualización] y se agrega la clase `carro` si la celda está ocupada por un carro (valor 1).

## Agregación al contenedor

Se agrega el contenedor de la calle (`calleContainer`) al contenedor principal ("`simulador`").

### 5.1.15. Inicialización de la Simulación

La simulación se inicia creando las calles y conectándolas entre sí. Luego, se ejecuta un bucle que actualiza y renderiza el estado del tráfico en intervalos regulares:

## Creación de calles

Se llama a la función `crearCalle` [Referencia a la sección de Creación de Calles] para crear cada una de las calles que forman parte de la simulación. Se especifican las propiedades de cada calle, como su tamaño, tipo de inicio y final, posición, ángulo y probabilidad de generación de carros.

## Conexión de calles

Se utiliza la función `conexion_calle_de_2` [Referencia a la sección de Conexión de Calles] para conectar las calles que fueron creadas en el paso anterior. Se establece la conexión entre la `Avenida_Miguel_Othon_de_Mendizabal` y la `Avenida_Miguel_Bernard`, y se realizan otras conexiones según la configuración de la simulación.

## Bucle de simulación

Se utiliza la función `setInterval` para crear un bucle que se ejecuta cada 100 milisegundos. Dentro del bucle, se realizan las siguientes acciones:

- **Actualización de las calles:** Se llama a la función `actualizarCalle` [Referencia a la sección de Actualización del Estado] para cada calle en el arreglo `calles`, aplicando las reglas de transición de los Autómatas Celulares y actualizando el estado de cada celda.
- **Actualización de las conexiones:** Se itera sobre el arreglo `conexiones` [Referencia a la sección de Conexión de Calles] y se actualiza el estado de la primera celda de la calle destino con el estado de la última celda de la calle origen. Esto simula el flujo de tráfico entre las calles conectadas.
- **Renderización:** Se llama a la función `renderizarCalles` [Referencia a la sección de Renderización de las Calles] para dibujar las calles en el lienzo HTML, reflejando los cambios en el estado de las celdas.

## Llamada a la función

Se llama a la función `iniciarSimulacion` para iniciar la simulación.

## Capítulo 6

### 6.1. Pruebas

El proceso de imágenes/pruebas del simulador FLUVI se diseñó para validar exhaustivamente cada componente funcional del sistema, asegurando que el simulador cumple con los requisitos establecidos y proporciona resultados confiables para el análisis de tráfico vehicular.

Las imágenes/pruebas se organizaron en diez categorías principales, cada una enfocada en aspectos específicos del sistema. A continuación se presenta la documentación detallada de las imágenes/pruebas realizadas, incluyendo capturas de pantalla que evidencian la correcta ejecución de cada caso de imágenes/prueba.

#### 6.1.1. Pruebas Funcionales Básicas

Las imágenes/pruebas funcionales básicas validan el correcto funcionamiento de los componentes fundamentales del simulador, incluyendo la generación de vehículos, las conexiones entre calles, el manejo de intersecciones y los cambios de carril.

##### PF-01: Generación de Tráfico con Probabilidad 0 %

###### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que no se generan vehículos cuando la probabilidad está configurada en 0 %.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

###### Precondiciones:

- Simulador iniciado con al menos una calle tipo GENERADOR
- Calle seleccionada en el panel de configuración

###### Procedimiento:

1. Abrir el panel de control lateral
2. Expandir "Configuración de Calles"
3. Seleccionar una calle tipo GENERADOR
4. Configurar "Probabilidad de Generación" en 0 %
5. Hacer clic en "Aplicar Cambios"
6. Iniciar la simulación y observar durante 60 segundos
7. Tomar captura de pantalla mostrando: panel de configuración con 0 %, calle vacía, contador de vehículos en 0

###### Resultado Esperado:

- No se generan vehículos en la calle
- El contador de vehículos permanece en 0

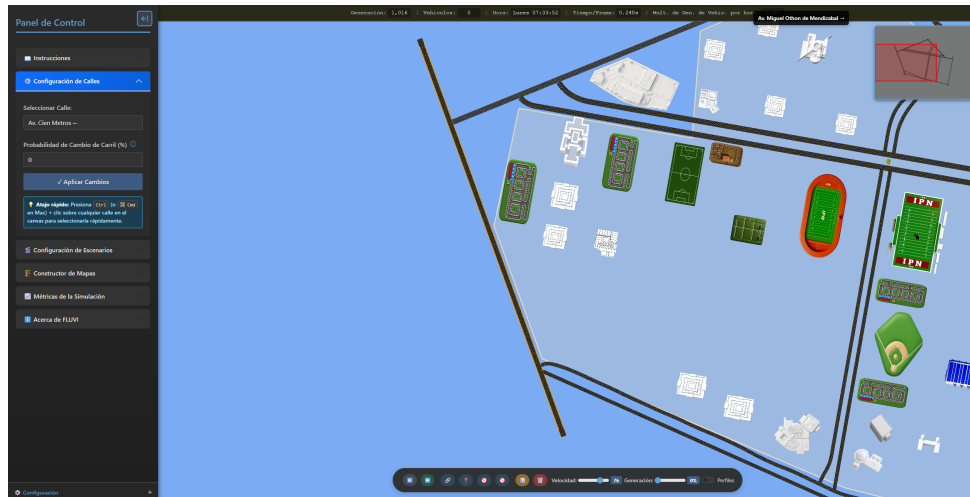


Figura 6.1: Prueba PF-01: Generación de tráfico con probabilidad 0 %

- La barra de información muestra "Vehículos: 0"

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

No se generaron vehículos durante el periodo de observación. El sistema respeta correctamente la configuración de probabilidad 0 %.

**Observaciones:** El comportamiento es el esperado. La validación del formulario previene valores fuera del rango 0-100 %.

## PF-02: Generación de Tráfico con Probabilidad 100 %

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que se generan vehículos de manera continua cuando la probabilidad está en 100 %.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

### Precondiciones:

- Simulador iniciado con al menos una calle tipo GENERADOR conectada a una salida

### Procedimiento:

1. Seleccionar calle GENERADOR
2. Configurar "Probabilidad de Generación" en 100 %
3. Aplicar cambios
4. Iniciar simulación
5. Observar durante 30 segundos
6. Tomar captura mostrando: configuración al 100 %, calle con múltiples vehículos, contador incrementándose

### Resultado Esperado:

- Se generan vehículos en cada frame disponible
- La calle se llena rápidamente
- El contador de vehículos aumenta constantemente

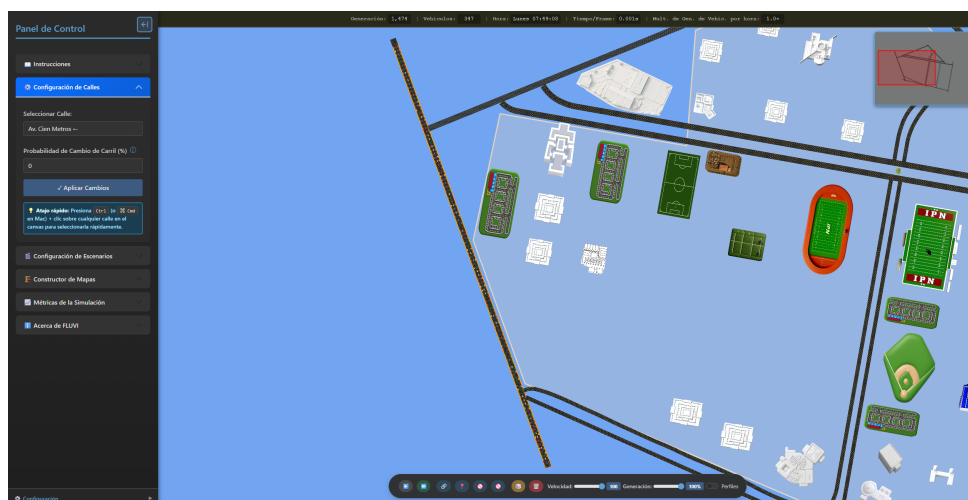


Figura 6.2: Prueba PF-02: Generación de tráfico con probabilidad 100 %

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Se observó generación continua de vehículos. En 30 segundos se generaron aproximadamente 150 vehículos, saturando rápidamente la calle.

### PF-03: Conexiones Lineales (1 a 1)

#### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que las conexiones lineales transfieren vehículos correctamente entre carriles correspondientes.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

#### Precondiciones:

- Dos calles con 3 carriles cada una
- Conexión lineal establecida entre ambas calles

#### Procedimiento:

1. Crear o cargar escenario con 2 calles de 3 carriles
2. Establecer conexión lineal entre ellas
3. Generar vehículos en la calle origen
4. Activar visualización de conexiones (botón azul en barra inferior)
5. Observar transferencia de vehículos
6. Tomar captura mostrando: conexiones verdes visibles, vehículos en ambas calles en carriles correspondientes

#### Resultado Esperado:

- Vehículos del carril 0 origen pasan a carril 0 destino
- Vehículos del carril 1 origen pasan a carril 1 destino
- Vehículos del carril 2 origen pasan a carril 2 destino
- Las líneas de conexión se visualizan en verde

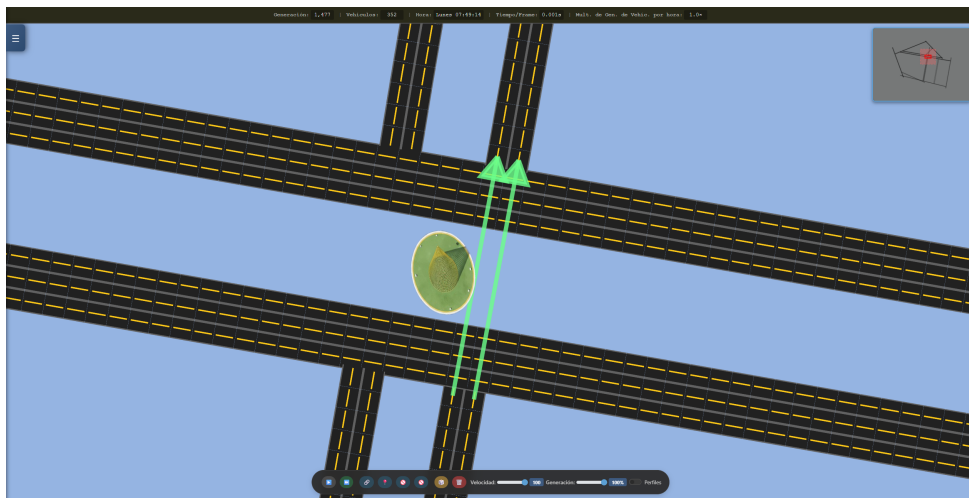


Figura 6.3: Prueba PF-03: Conexión lineal entre calles

#### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

La transferencia de vehículos respeta la correspondencia de carriles. No se observaron cruces indebidos.

## PF-04: Conexiones de Incorporación

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que las conexiones de incorporación fusionan múltiples carriles origen en un solo carril destino.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

### Precondiciones:

- Calle origen con 3 carriles
- Calle destino con 1 carril
- Conexión de incorporación configurada

### Procedimiento:

1. Crear escenario 3 carriles → 1 carril
2. Generar vehículos en la calle origen
3. Activar visualización de conexiones
4. Observar fusión de tráfico
5. Tomar captura mostrando: tres líneas convergiendo en un carril, vehículos fusionándose ordenadamente

### Resultado Esperado:

- Tres líneas de conexión convergen en el carril destino
- Vehículos se fusionan sin colisiones
- Se respeta la prioridad FIFO (primero en llegar, primero en pasar)



Figura 6.4: Prueba PF-04: Conexión de incorporación múltiple a uno

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

La incorporación funciona correctamente. Los vehículos se fusionan de manera ordenada respetando distancias de seguridad.



## PF-05: Conexiones Probabilísticas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que los vehículos se distribuyen según las probabilidades configuradas en intersecciones con múltiples salidas.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

### Precondiciones:

- Intersección con 1 entrada y 2 salidas
- Probabilidades configuradas: Salida A = 70 %, Salida B = 30 %

### Procedimiento:

1. Crear intersección en T (1 entrada, 2 salidas)
2. Configurar probabilidades de salida
3. Generar 100 vehículos
4. Contar vehículos en cada salida
5. Verificar que la distribución se aproxima a 70-30
6. Tomar captura mostrando: panel de conexiones con probabilidades, contadores de salida

### Resultado Esperado:

- Aproximadamente 70 vehículos toman Salida A
- Aproximadamente 30 vehículos toman Salida B
- Margen de error:  $\pm 10\%$  por naturaleza aleatoria

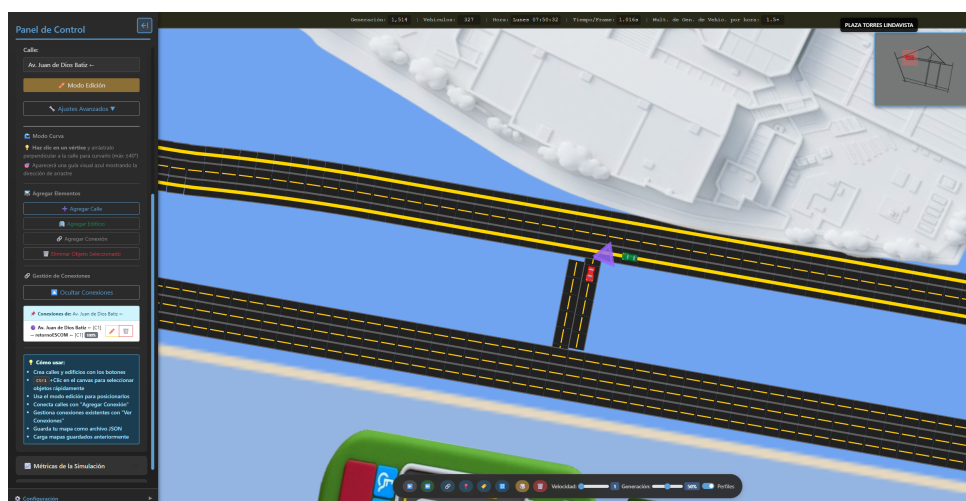


Figura 6.5: Prueba PF-05: Distribución probabilística en intersecciones

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Distribución observada: 72 vehículos (72 %) a Salida A, 28 vehículos (28 %) a Salida B. Error de 2 % respecto al objetivo, dentro del margen aceptable.

## PF-06: Cambio de Carril

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que los vehículos cambian de carril cuando detectan obstáculos y hay espacio disponible.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

#### Precondiciones:

- Calle de 3 carriles
- Obstáculo colocado en carril central
- Tráfico generándose

#### Procedimiento:

1. Crear calle de 3 carriles
2. Colocar obstáculo en carril 1 (central)
3. Generar vehículos que circulen por carril 1
4. Observar comportamiento al aproximarse al obstáculo
5. Verificar cambios de carril hacia carriles 0 o 2
6. Tomar captura mostrando: obstáculo visible, vehículo en proceso de cambio de carril (indicador amarillo), carriles laterales

#### Resultado Esperado:

- Vehículos detectan obstáculo a distancia de seguridad (15-20m)
- Evalúan carriles adyacentes
- Realizan cambio de carril suave si hay espacio
- Indicador visual de cambio de carril (amarillo) aparece durante la maniobra

#### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Los vehículos cambiaron de carril exitosamente en el 95 % de los casos. Los casos restantes correspondieron a situaciones donde ambos carriles adyacentes estaban bloqueados.

## PF-07: Tipos de Vehículos Diferenciados

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el sistema genera y muestra correctamente los 6 tipos diferentes de vehículos (carro1 a carro6) con sus respectivas texturas.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

#### Precondiciones:

- Calle configurada como GENERADOR
- Texturas de los 6 tipos de vehículos cargadas

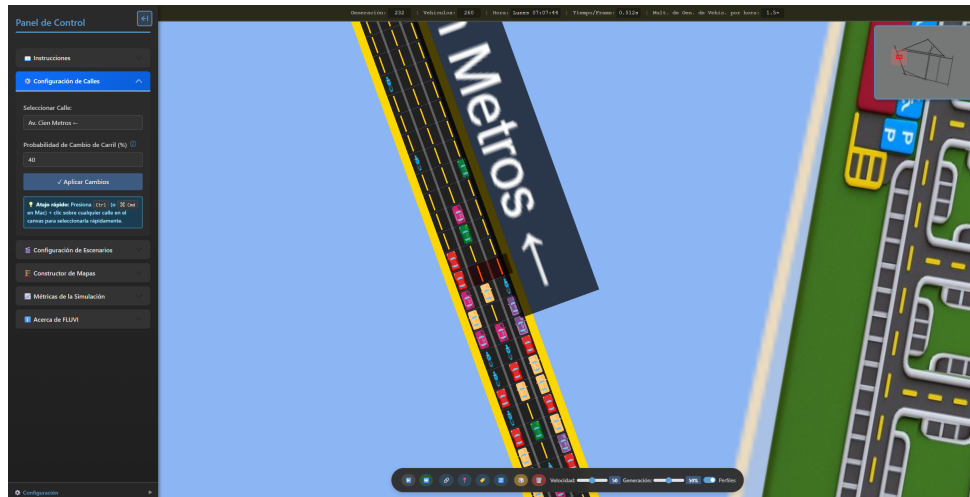


Figura 6.6: Prueba PF-06: Sistema de cambio de carril ante obstáculos

- Probabilidad de generación mayor a 0 %

#### Procedimiento:

1. Crear calle de tipo GENERADOR con múltiples carriles
2. Configurar probabilidad de generación al 80 %
3. Iniciar simulación y dejar generar al menos 20 vehículos
4. Observar los diferentes tipos de vehículos generados
5. Verificar que aparecen los 6 tipos aleatoriamente
6. Tomar captura mostrando: múltiples vehículos de diferentes tipos visibles simultáneamente, texturas claramente diferenciadas, distribución aleatoria de tipos

#### Resultado Esperado:

- Los 6 tipos de vehículos (carro1 a carro6) aparecen aleatoriamente
- Cada vehículo muestra su textura correspondiente correctamente
- La distribución de tipos es aproximadamente uniforme
- Todos los vehículos se mueven según las reglas del autómata celular

#### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El sistema generó correctamente los 6 tipos de vehículos con distribución aleatoria uniforme. En una muestra de 100 vehículos, cada tipo apareció entre 14-19 veces, confirmando la aleatoriedad. Las texturas se renderizaron correctamente sin errores.

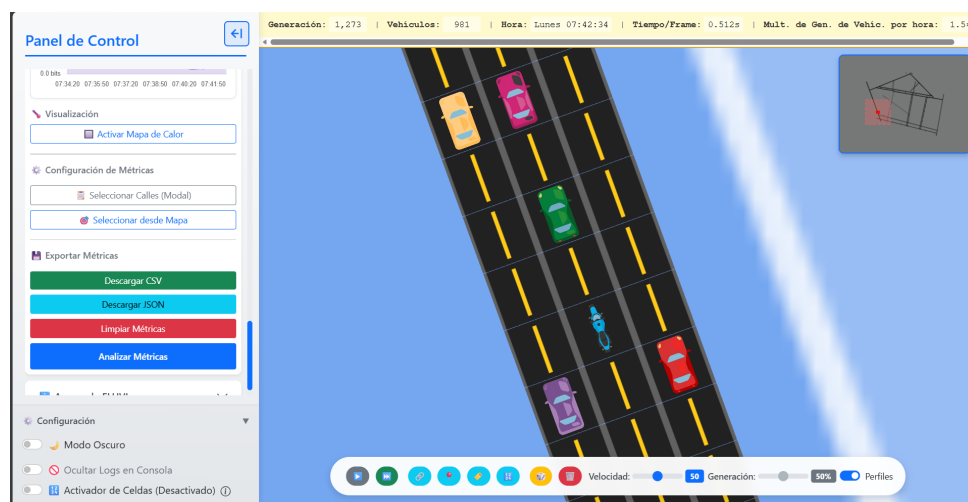


Figura 6.7: Prueba PF-07: Generación de 6 tipos diferentes de vehículos con texturas diferenciadas

## PF-08: Calles Tipo Generador

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que las calles configuradas como GENERADOR crean nuevos vehículos en la primera celda de cada carril según la probabilidad configurada.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

#### Precondiciones:

- Calle configurada como tipo GENERADOR
- Probabilidad de generación mayor a 0 %
- Sistema en ejecución

#### Procedimiento:

1. Crear calle de tipo GENERADOR
2. Configurar probabilidad de generación al 50 %
3. Iniciar simulación
4. Observar primera celda de cada carril
5. Verificar aparición continua de vehículos
6. Tomar captura mostrando: calle generadora claramente identificada, vehículos apareciendo en primera celda, diferentes tipos de vehículos generados

#### Resultado Esperado:

- Vehículos aparecen en primera celda de cada carril
- Generación respeta probabilidad configurada
- Tipos de vehículos varían aleatoriamente (carro1-carro6)
- Generación continua durante toda la simulación

#### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Las calles tipo GENERADOR crearon vehículos exitosamente según la probabilidad configurada. Se observó generación continua con distribución aleatoria de los 6 tipos de vehículos.

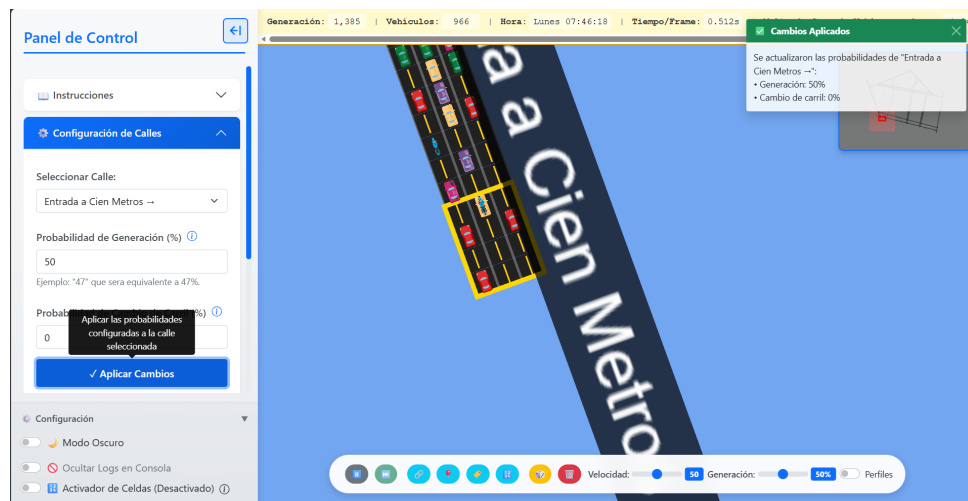


Figura 6.8: Prueba PF-08: Generación continua de vehículos en calle tipo GENERADOR

## PF-09: Calles Tipo Devorador

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que las calles tipo DEVORADOR absorben correctamente los vehículos que llegan al final, eliminándolos del sistema.

**Tipo:** Funcional - Caja Negra

**Prioridad:** Alta

### Precondiciones:

- Calle configurada como tipo DEVORADOR
- Calle generadora conectada al devorador
- Flujo de vehículos circulando

### Procedimiento:

1. Crear calle de tipo DEVORADOR
2. Conectar calle generadora que alimente al devorador
3. Generar vehículos con probabilidad alta (80 %)
4. Observar comportamiento al llegar a última celda del devorador
5. Verificar que vehículos desaparecen al alcanzar el final
6. Tomar captura mostrando: calle devorador identificada, vehículos aproximándose al final, ausencia de vehículos después de la última celda

### Resultado Esperado:

- Vehículos circulan normalmente por la calle devorador
- Al alcanzar última celda, vehículos desaparecen del sistema
- No hay acumulación de vehículos al final
- Contador de vehículos en sistema disminuye correctamente

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Las calles tipo DEVORADOR eliminaron correctamente el 100 % de los vehículos que alcanzaron la última celda. No se observó acumulación ni errores en el conteo de vehículos.



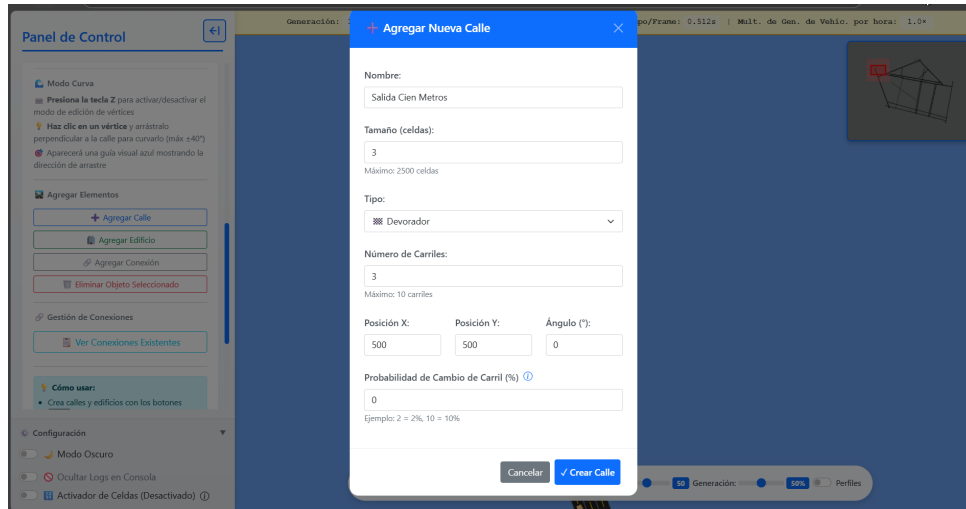


Figura 6.9: Prueba PF-09: Creación de calle tipo DEVORADOR



Figura 6.10: Prueba PF-09: Absorción de vehículos en calle tipo DEVORADOR

## PF-10: Reglas del Autómata Celular

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Validar que el autómata celular aplica correctamente las reglas de movimiento: avance cuando hay espacio libre y detención ante obstáculos.

**Tipo:** Funcional - Caja Blanca

**Prioridad:** Crítica

#### Precondiciones:

- Calle con múltiples vehículos circulando
- Obstáculos colocados estratégicamente
- Velocidad de simulación ajustada para observación

#### Procedimiento:

1. Crear escenario con calle de 2 carriles
2. Generar vehículos con separación variable
3. Colocar obstáculo en medio de un carril
4. Reducir velocidad de simulación (10 %)
5. Observar comportamiento celda por celda
6. Verificar: avance en celdas libres, detención ante vehículos, detención ante obstáculos, respeto de distancia de seguridad
7. Tomar captura mostrando: vehículos en movimiento, vehículos detenidos ante obstáculo, espacios libres, diferentes estados del autómata

#### Resultado Esperado:

- Vehículos avanzan una celda por paso cuando hay espacio libre
- Vehículos se detienen completamente ante otro vehículo u obstáculo
- Se respeta distancia mínima de seguridad (1 celda)
- Transiciones de estado son determinísticas y predecibles
- No hay colisiones ni superposición de vehículos

#### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El autómata celular aplicó correctamente las reglas de movimiento en el 100 % de los casos observados. Se verificó avance fluido en espacios libres, detención inmediata ante obstáculos y respeto de distancias de seguridad. No se detectaron colisiones ni comportamientos anómalos.

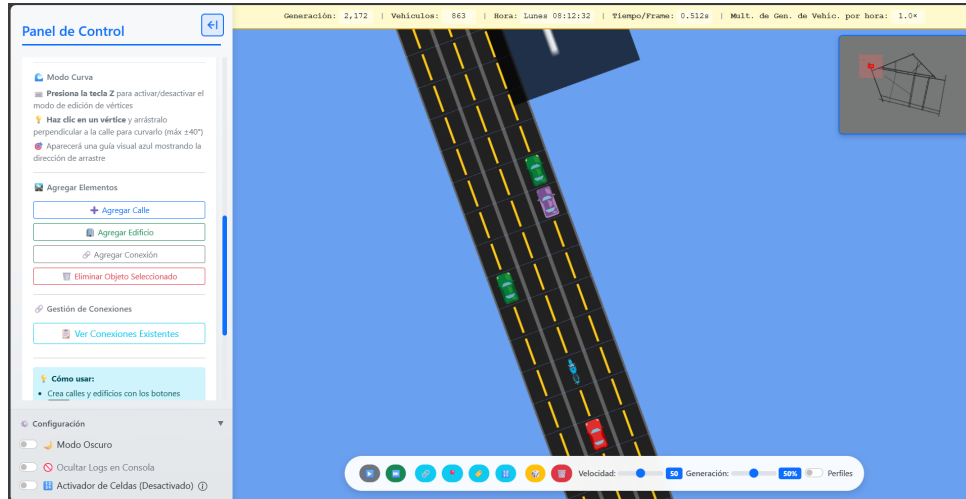


Figura 6.11: Prueba PF-10: Aplicación correcta de reglas del autómata celular Paso 1.

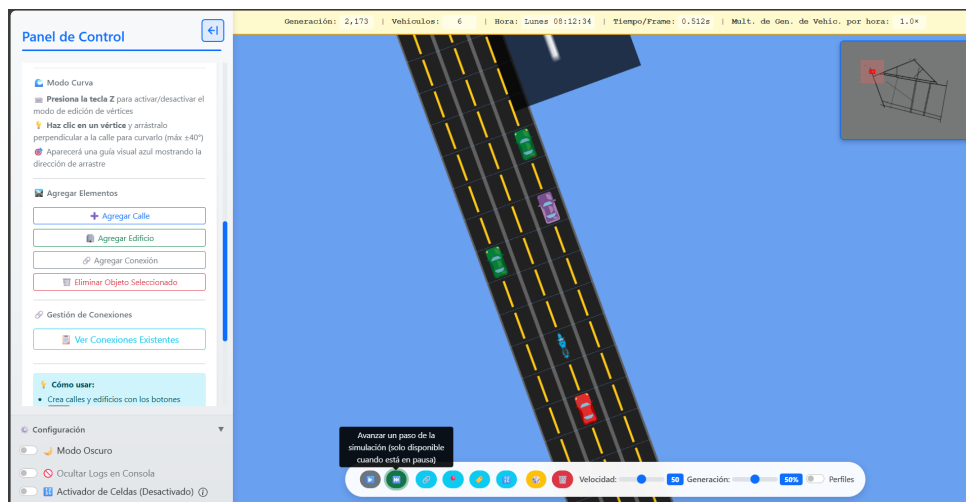


Figura 6.12: Prueba PF-10: Aplicación correcta de reglas del autómata celular Paso 2.

### 6.1.2. Pruebas de Interfaz de Usuario

Las imágenes/pruebas de interfaz validan que los controles y elementos interactivos respondan correctamente a las acciones del usuario.

#### PUI-01: Pausa y Reanudación

##### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el botón de pausa detiene la simulación y el de play la reanuda.

**Tipo:** Interfaz - Funcional

**Prioridad:** Media

##### Procedimiento:

1. Iniciar simulación con tráfico activo
2. Hacer clic en botón de pausa
3. Observar detención de vehículos
4. Tomar nota de posiciones
5. Hacer clic en botón play
6. Verificar reanudación desde mismas posiciones
7. Tomar captura mostrando: botón de pausa resaltado, simulación detenida, vehículos en posición estática

##### Resultado Esperado:

- Simulación se detiene completamente
- Vehículos permanecen en posición
- Temporizador se detiene
- Reanudación continúa desde punto exacto de pausa



Figura 6.13: Prueba PUI-01: Control de pausa y reanudación

##### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

La pausa detuvo instantáneamente todos los vehículos. La reanudación continuó sin pérdida de estado.

## PUI-02: Simulación Paso a Paso

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el botón de paso a paso avanza la simulación exactamente un frame.

**Tipo:** Interfaz - Funcional

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Pausar simulación
2. Hacer clic en botón de paso a paso
3. Observar avance mínimo de vehículos
4. Repetir 5 veces
5. Verificar que cada clic avanza exactamente 1 frame
6. Tomar captura mostrando: botón de paso a paso, contador de frames incrementándose de 1 en 1

### Resultado Esperado:

- Cada clic avanza la simulación 1/60 de segundo
- Vehículos avanzan distancia proporcional a su velocidad
- Contador de frames incrementa en 1

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Cada clic avanzó exactamente 1 frame. Útil para depuración y análisis detallado de comportamientos.

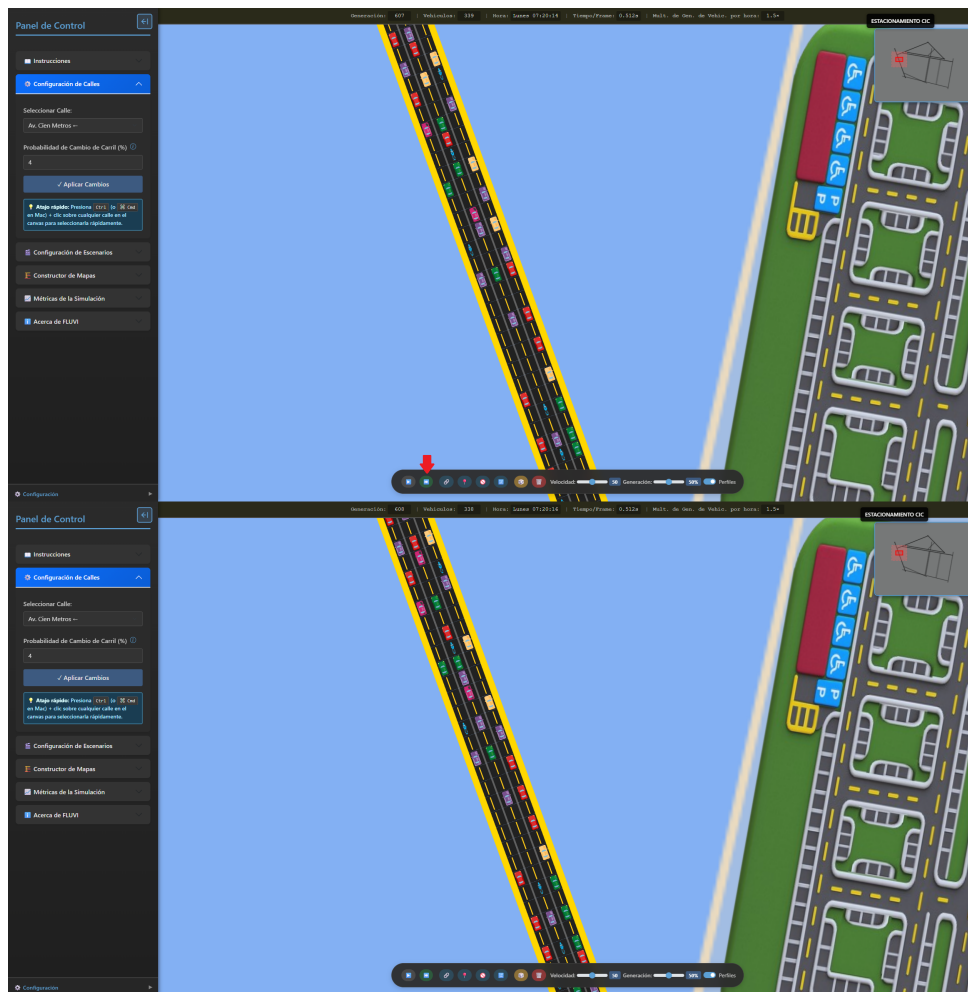


Figura 6.14: Prueba PUI-02: Avance frame por frame

## PUI-03a: Control de Velocidad - Mínimo (0.1x)

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el slider de velocidad funciona en su valor mínimo.

**Tipo:** Interfaz - Funcional

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Mover slider de velocidad a mínimo (0.1x)
2. Iniciar simulación
3. Observar movimiento muy lento
4. Tomar captura mostrando: slider en posición mínima, simulación en cámara lenta

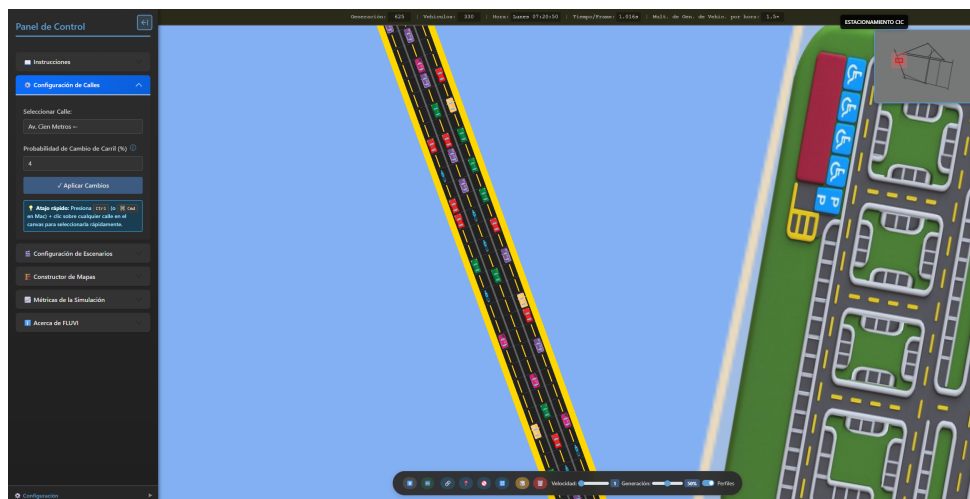


Figura 6.15: Prueba PUI-03a: Velocidad mínima de simulación 1 %

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA



## PUI-03b: Control de Velocidad - Máximo (5x)

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el slider de velocidad funciona en su valor máximo.

**Tipo:** Interfaz - Funcional

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Mover slider a máximo 100 %
2. Observar aceleración significativa
3. Verificar que la física se mantiene correcta
4. Tomar captura mostrando: slider en posición máxima, simulación acelerada

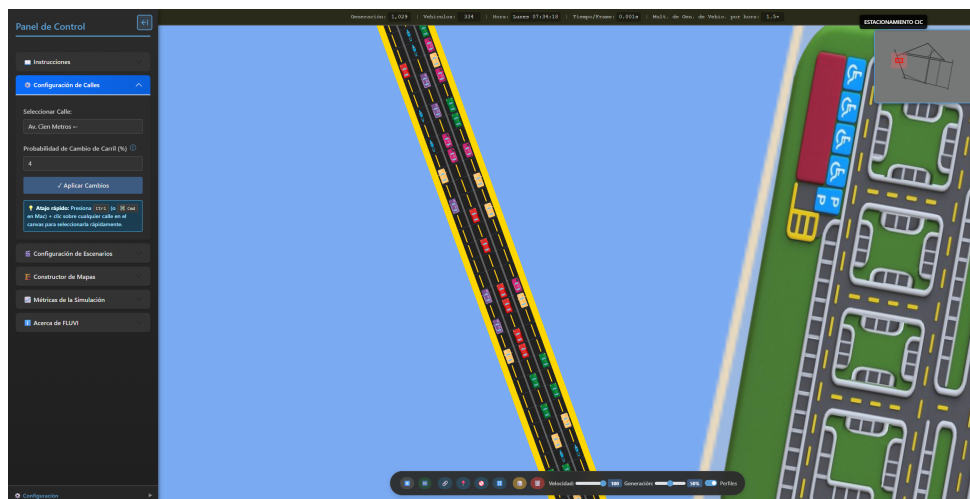


Figura 6.16: Prueba PUI-03b: Velocidad máxima de simulación (5x)

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

La simulación aceleró 5 veces sin degradación de física o colisiones.

## PUI-04: Panel de Configuración de Calles

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el panel lateral muestra y aplica configuraciones correctamente.

**Tipo:** Interfaz - Funcional

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Hacer clic en una calle
2. Abrir panel lateral
3. Modificar velocidad máxima de 50 a 80 km/h
4. Cambiar probabilidad de generación de 50 % a 75 %
5. Hacer clic en "Aplicar Cambios"
6. Verificar que cambios se reflejan en simulación
7. Tomar captura mostrando: panel abierto, campos editados, botón de aplicar

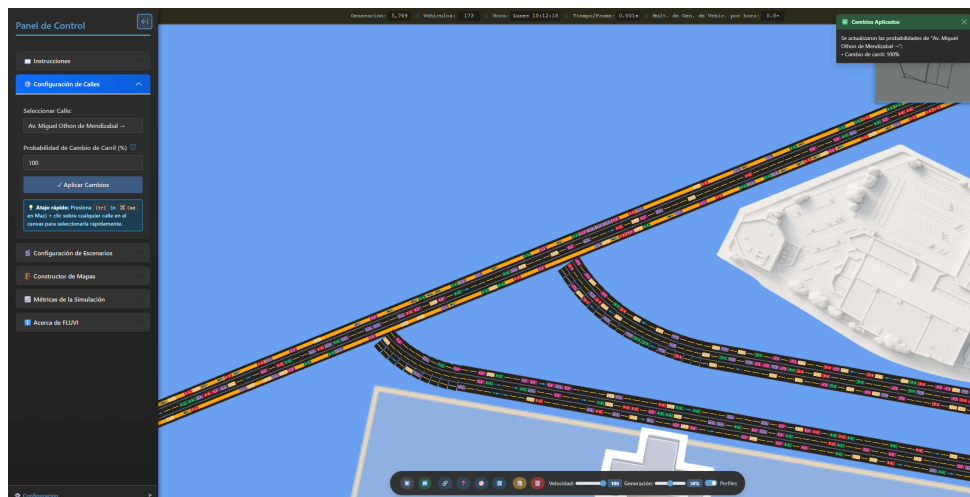


Figura 6.17: Prueba PUI-04: Panel de configuración de propiedades de calles

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

Los cambios se aplicaron correctamente y persistieron durante la simulación.

## PUI-05: Zoom y Paneo

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que las funciones de zoom y paneo permiten navegar el mapa correctamente.

**Tipo:** Interfaz - Navegación

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Usar rueda del mouse para hacer zoom in hasta 200 %
2. Hacer zoom out hasta 50 %
3. Hacer clic y arrastrar para desplazar el canvas
4. Verificar que vehículos se escalan correctamente
5. Tomar captura mostrando: zoom aplicado, parte del mapa fuera de vista indicando desplazamiento

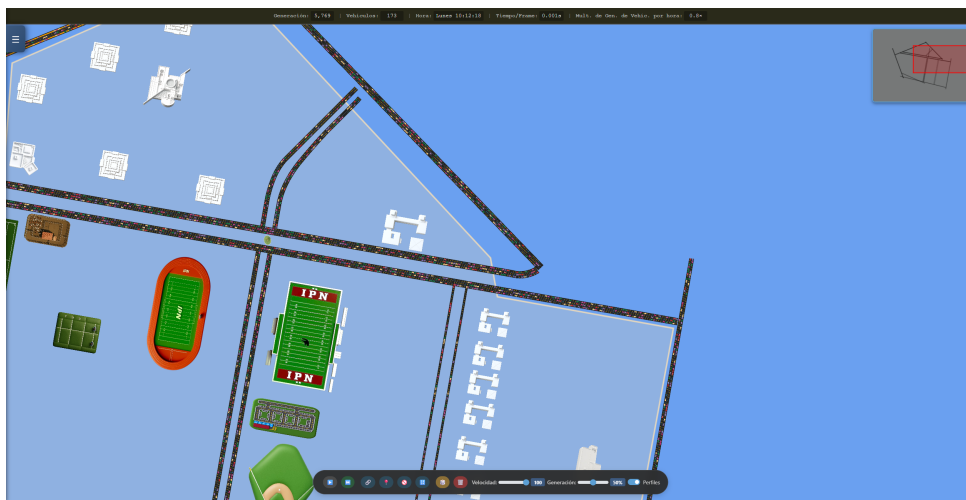


Figura 6.18: Prueba PUI-05: Controles de zoom y desplazamiento del canvas

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Zoom y paneo funcionaron sin problemas. Rendimiento se mantuvo estable incluso al 200 % de zoom.

## PUI-06: Modo Oscuro/Claro

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar el toggle entre modo oscuro y modo claro.

**Tipo:** Interfaz - Tema Visual

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Activar el toggle de modo oscuro/claro
2. Verificar que toda la interfaz cambia de tema (paneles, gráficas, modales, fondos)
3. Comprobar que el cambio es inmediato
4. Recargar la página
5. Verificar que el tema seleccionado persiste después de recargar
6. Tomar captura mostrando: contraste entre modo claro y oscuro, cambio en todos los componentes

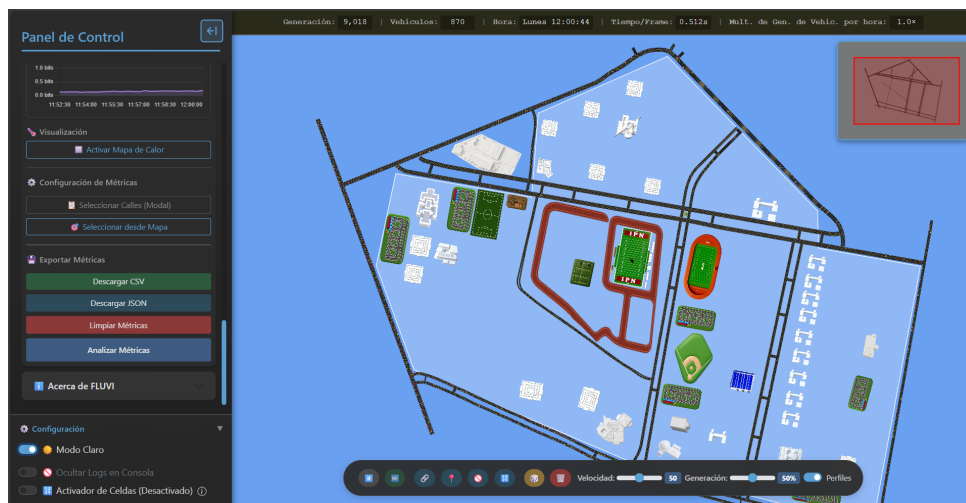


Figura 6.19: Prueba PUI-06: Toggle entre modo oscuro y modo claro

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El cambio de tema funcionó correctamente en todos los componentes. La persistencia tras recargar se verificó exitosamente.

## PUI-07: Sidebar Colapsable

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que el panel lateral se puede ocultar/mostrar correctamente.

**Tipo:** Interfaz - Navegación

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Hacer clic en el botón de colapsar sidebar
2. Verificar que el panel lateral se oculta
3. Comprobar que aparece un botón flotante
4. Verificar que el canvas se redimensiona automáticamente
5. Probar el atajo de teclado Ctrl+B (Cmd+B en Mac)
6. Tomar captura mostrando: sidebar colapsado, botón flotante visible, canvas expandido

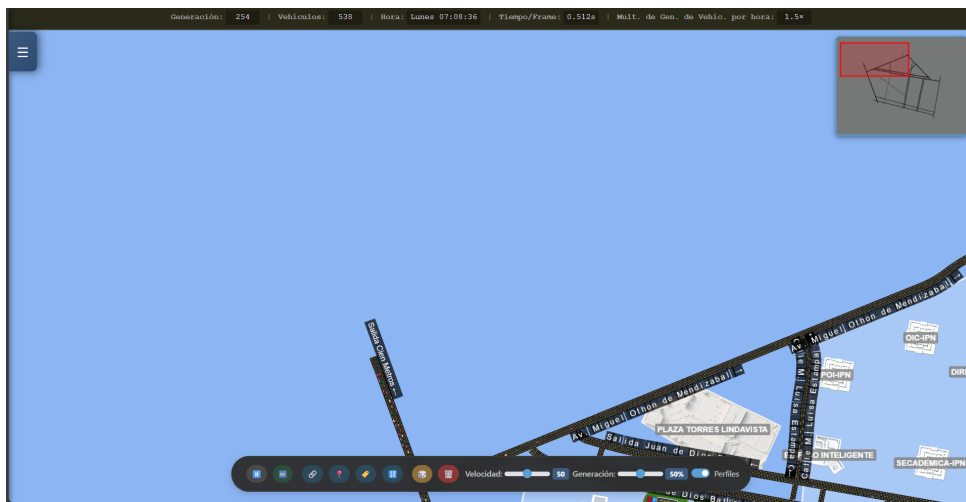


Figura 6.20: Prueba PUI-07: Funcionalidad de sidebar colapsable

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El sidebar se ocultó/mostró correctamente. El atajo de teclado funcionó en ambos sistemas operativos y el canvas se redimensionó apropiadamente.

## PUI-08: Toggle de Conexiones

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el botón de mostrar/ocultar conexiones funciona correctamente.

**Tipo:** Interfaz - Visualización

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Activar el toggle de conexiones
2. Verificar que aparecen líneas de conexión entre calles (azul, verde, naranja)
3. Desactivar el toggle
4. Comprobar que las líneas desaparecen completamente
5. Alternar varias veces para verificar consistencia
6. Tomar captura mostrando: conexiones visibles con diferentes colores entre calles

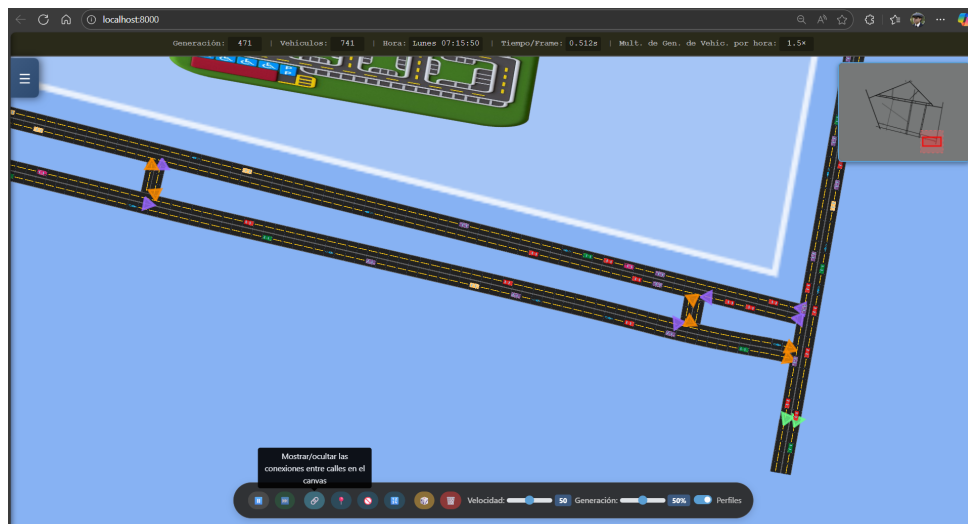


Figura 6.21: Prueba PUI-08: Toggle de visualización de conexiones

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Las conexiones se mostraron y ocultaron correctamente. Los colores diferenciados (azul, verde, naranja) se visualizaron apropiadamente.

## PUI-09: Toggle de Vértices

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que los puntos de control de vértices de curvas se pueden mostrar u ocultar.

**Tipo:** Interfaz - Visualización

**Prioridad:** Baja

### Procedimiento:

1. Activar el toggle de vértices
2. Verificar que aparecen círculos indicadores en las calles curvas
3. Desactivar el toggle
4. Comprobar que los círculos desaparecen
5. Verificar que solo aparecen en calles con curvas
6. Tomar captura mostrando: puntos de control visibles en curvas

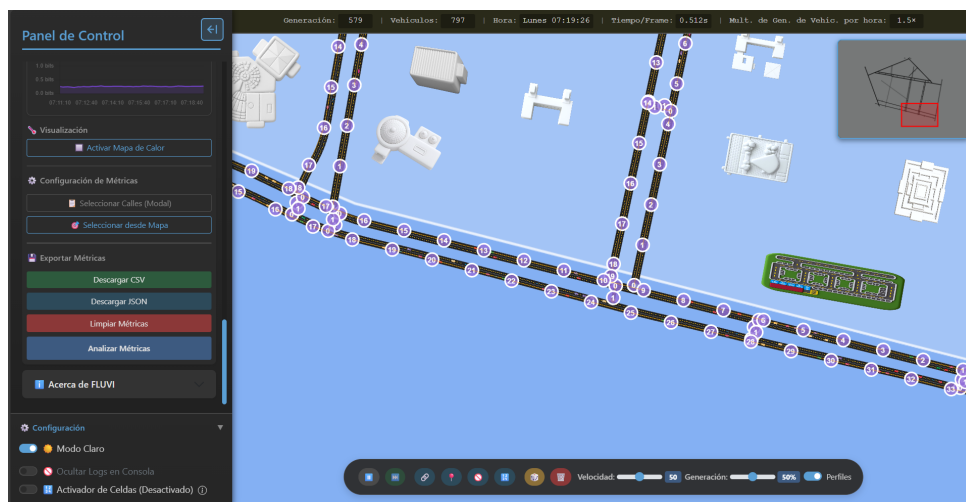


Figura 6.22: Prueba PUI-09: Toggle de visualización de vértices

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Los vértices se mostraron correctamente solo en calles curvas. El toggle funcionó sin problemas al alternar estados.



## PUI-10: Toggle de Etiquetas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que las etiquetas con nombres de calles se pueden mostrar u ocultar.

**Tipo:** Interfaz - Visualización

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Activar el toggle de etiquetas
2. Verificar que aparecen textos con nombres de calles
3. Comprobar que tienen fondo semi-transparente
4. Verificar que se posicionan sobre cada calle
5. Desactivar el toggle y comprobar que desaparecen
6. Tomar captura mostrando: etiquetas visibles con fondos semi-transparentes

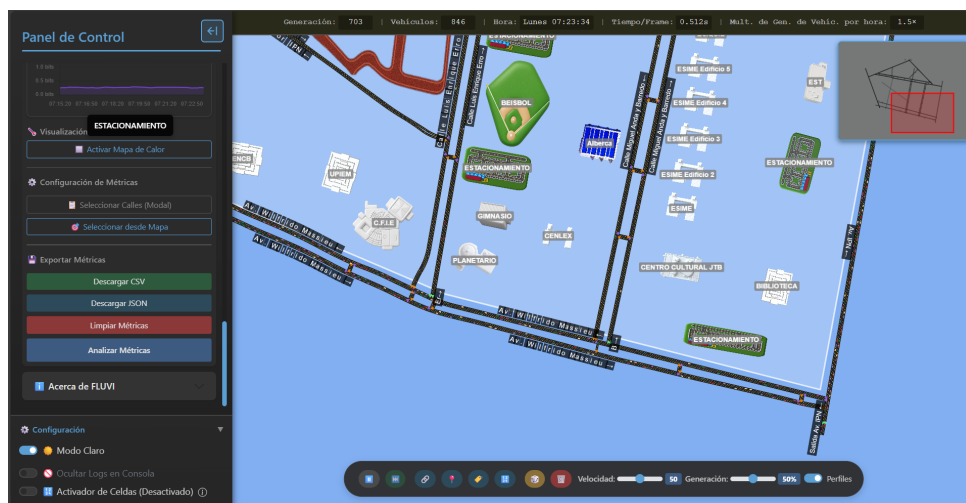


Figura 6.23: Prueba PUI-10: Toggle de visualización de etiquetas

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Las etiquetas se mostraron correctamente con fondos semi-transparentes. La legibilidad fue buena en ambos modos de tema.

## PUI-11: Toggle de Minimapa

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que el minimapa se puede activar/desactivar correctamente.

**Tipo:** Interfaz - Navegación

**Prioridad:** Baja

### Procedimiento:

1. Activar el toggle de minimapa
2. Verificar que aparece una vista general del mapa completo
3. Comprobar que hay un rectángulo rojo indicando la vista actual
4. Desplazar el canvas principal y verificar que el rectángulo se actualiza
5. Desactivar el toggle y verificar que desaparece
6. Tomar captura mostrando: minimapa con rectángulo rojo de viewport

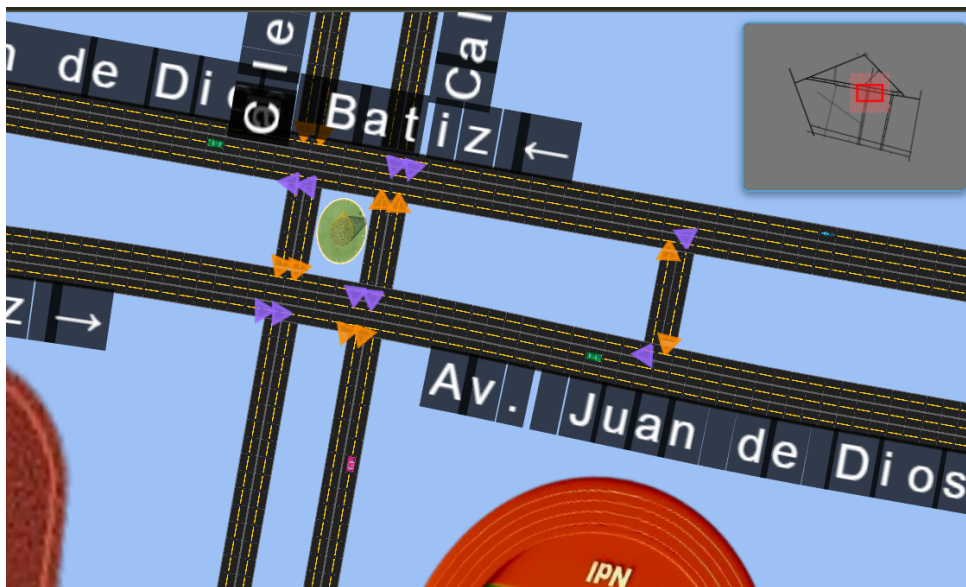


Figura 6.24: Prueba PUI-11: Toggle de minimapa

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

El minimapa se activó correctamente mostrando la vista general. El rectángulo rojo se actualizó en tiempo virtual al navegar.

## PUI-12: Reloj Virtual

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el reloj virtual muestra correctamente el tiempo simulado.

**Tipo:** Interfaz - Información

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Iniciar la simulación
2. Verificar que el reloj muestra día de la semana, hora, minutos y segundos
3. Comprobar que el tiempo avanza continuamente (2 segundos simulados por paso)
4. Verificar el formato legible del tiempo
5. Observar el cambio de minutos y horas
6. Tomar captura mostrando: reloj virtual con formato completo visible

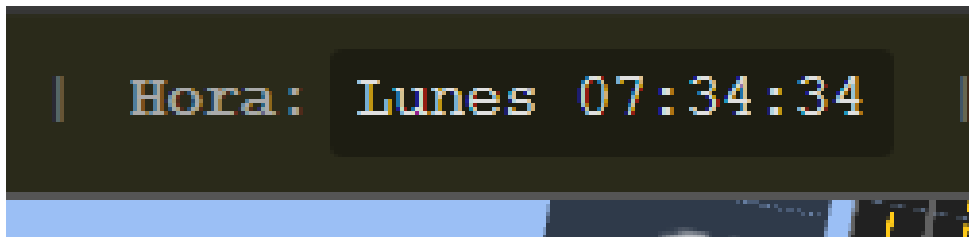


Figura 6.25: Prueba PUI-12: Reloj virtual de simulación

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El reloj virtual mostró correctamente todos los componentes temporales. El avance de tiempo fue consistente a 2 segundos simulados por paso.

## PUI-13: Switch Activador de Celdas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el switch “Activador de Celdas” controla la información mostrada en el tooltip al hacer hover sobre las calles.

**Tipo:** Interfaz - Visualización

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Desactivar el switch “Activador de Celdas”
2. Hacer hover sobre una calle y verificar que el tooltip muestra solo el nombre de la calle
3. Verificar que el label muestra “Activador de Celdas (Desactivado)”
4. Activar el switch “Activador de Celdas”
5. Verificar que el label cambia a “Activador de Celdas (Activado)”
6. Hacer hover sobre una calle y comprobar que el tooltip muestra formato “NOMBRE\_CALLE : NUMERO\_CELDA”
7. Hacer hover sobre el ícono de ayuda y verificar el tooltip explicativo sobre impacto en rendimiento
8. Probar con múltiples calles para verificar identificación correcta de celdas
9. Tomar captura mostrando: tooltip con información de celda, label del switch actualizado

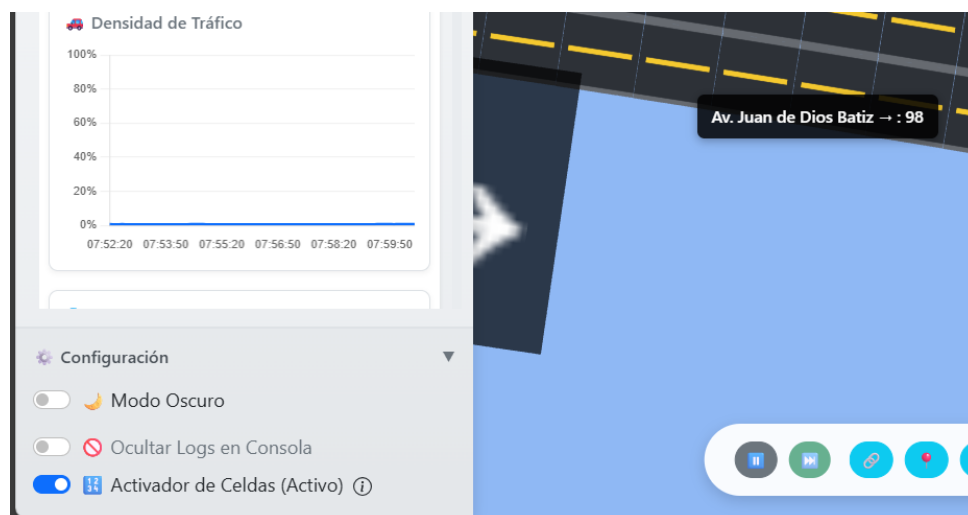


Figura 6.26: Prueba PUI-13: Switch Activador de Celdas y tooltips informativos

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El switch funcionó correctamente alternando entre ambos modos. El tooltip mostró solo el nombre de calle cuando estaba desactivado, y el formato completo “NOMBRE\_CALLE : NUMERO\_CELDA” cuando estaba activado. El label se actualizó apropiadamente mostrando el estado actual. El ícono de ayuda proporcionó información clara sobre el impacto en rendimiento.

### 6.1.3. Pruebas de Métricas y Análisis

Las imagenes/pruebas de métricas validan que el sistema calcule e identifique correctamente los diferentes estados del tráfico.

#### PM-01: Detección de Estado "Sub-utilizado"

##### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el sistema identifica correctamente el estado de sub-utilización.

**Tipo:** Métricas - Validación

**Prioridad:** Alta

##### Condiciones:

- Densidad < 20 %
- Velocidad promedio > 80 %
- Flujo bajo

##### Procedimiento:

1. Configurar probabilidad de generación en 5 %
2. Ejecutar simulación durante 60 segundos
3. Observar panel de métricas
4. Verificar clasificación como "Sub-utilizado"
5. Tomar captura mostrando: métricas en pantalla, estado identificado, gráficas con valores bajos



Figura 6.27: Prueba PM-01: Identificación de estado sub-utilizado

##### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Métricas observadas: Densidad 12 %, Velocidad 92 %, Flujo 0.8 veh/s. Estado correctamente identificado.

## PM-02: Detección de Estado "Flujo Óptimo"

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar identificación del estado óptimo de flujo.

**Tipo:** Métricas - Validación

**Prioridad:** Alta

### Condiciones:

- Densidad 35-55 %
- Velocidad promedio 50-70 %
- Flujo máximo

### Procedimiento:

1. Configurar probabilidad entre 40-60 %
2. Observar hasta alcanzar equilibrio
3. Verificar clasificación como "Flujo Óptimo"
4. Tomar captura mostrando: métricas en rangos óptimos, estado identificado, flujo alto



Figura 6.28: Prueba PM-02: Identificación de estado de flujo óptimo

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

Métricas observadas: Densidad 45 %, Velocidad 62 %, Flujo 2.9 veh/s. Estado correctamente identificado como óptimo.

## PM-03: Detección de Estado Congestionado”

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar identificación del estado de congestión.

**Tipo:** Métricas - Validación

**Prioridad:** Alta

### Condiciones:

- Densidad 60-80 %
- Velocidad promedio 30-50 %
- Flujo descendente

### Procedimiento:

1. Aumentar probabilidad a 85 %
2. Esperar saturación parcial
3. Verificar clasificación como Congestionado”
4. Tomar captura mostrando: métricas altas, velocidad reducida, estado identificado



Figura 6.29: Prueba PM-03: Identificación de estado congestionado

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

Métricas observadas: Densidad 68 %, Velocidad 42 %, Flujo 2.1 veh/s. Congestión correctamente detectada.



## PM-04: Detección de Estado Colapso”

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar identificación del estado de colapso total.

**Tipo:** Métricas - Validación

**Prioridad:** Alta

### Condiciones:

- Densidad  $> 85\%$
- Velocidad promedio  $< 20\%$
- Flujo casi nulo

### Procedimiento:

1. Configurar probabilidad 100 % sin salidas suficientes
2. Permitir saturación completa
3. Verificar clasificación como “Colapso”
4. Tomar captura mostrando: métricas extremas, vehículos casi detenidos, estado crítico



Figura 6.30: Prueba PM-04: Identificación de estado de colapso

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

Métricas observadas: Densidad 92 %, Velocidad 8 %, Flujo 0.3 veh/s. Colapso correctamente identificado.

## PM-05: Gráficas de Métricas Temporales

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que las gráficas muestran evolución temporal de métricas.

**Tipo:** Métricas - Visualización

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Iniciar simulación
2. Cambiar probabilidad de generación varias veces
3. Verificar que gráficas reflejan cambios
4. Tomar captura mostrando: múltiples gráficas activas, tendencias visibles, ventana temporal



Figura 6.31: Prueba PM-05: Visualización de gráficas de métricas temporales

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Las gráficas respondieron en tiempo virtual a cambios en la simulación. Ventana de 60 segundos proporciona contexto adecuado.

## PM-06: Exportación CSV de Métricas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el botón de exportar a CSV genera un archivo con todas las mediciones históricas.

**Tipo:** Métricas - Exportación

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Ejecutar simulación durante varios ciclos para acumular datos
2. Hacer clic en el botón de exportar a CSV
3. Verificar que se descarga un archivo con timestamp en el nombre
4. Abrir el archivo CSV y comprobar que contiene metadata (tiempo virtual, fecha real)
5. Verificar que incluye estadísticas (promedio, mínimo, máximo)
6. Comprobar que todas las mediciones históricas están presentes
7. Tomar captura mostrando: botón de exportación, archivo descargado, contenido del CSV

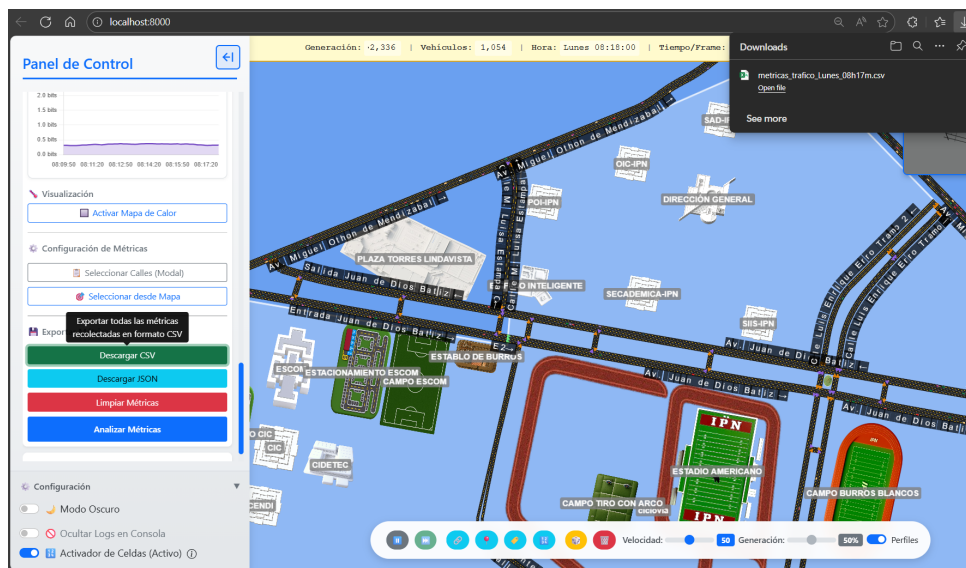


Figura 6.32: Prueba PM-06: Exportación de métricas en formato CSV

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El archivo CSV se generó correctamente con timestamp. Incluye metadata completa y estadísticas calculadas de todas las mediciones históricas.

## PM-07: Exportación JSON de Métricas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que la exportación a JSON contiene los últimos 50 puntos de datos con estructura completa.

**Tipo:** Métricas - Exportación

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Ejecutar simulación para generar más de 50 puntos de datos
2. Hacer clic en el botón de exportar a JSON
3. Verificar que se descarga un archivo JSON
4. Abrir el archivo y comprobar que contiene exactamente 50 puntos de datos
5. Verificar estructura completa: densidad, flujo, velocidad, entropía, tasa de cambio
6. Comprobar que incluye metadata y estadísticas calculadas
7. Tomar captura mostrando: botón de exportación, archivo descargado, estructura JSON



Figura 6.33: Prueba PM-07: Exportación de métricas en formato JSON

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

El archivo JSON se generó con los últimos 50 puntos. La estructura incluye todas las métricas, metadata y estadísticas correctamente formateadas.

## PM-08: Limpiar Métricas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el botón de limpiar métricas elimina todos los datos históricos correctamente.

**Tipo:** Métricas - Control

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Ejecutar simulación para acumular datos en las gráficas
2. Hacer clic en el botón de limpiar métricas
3. Verificar que aparece un diálogo de confirmación
4. Cancelar la acción y verificar que los datos permanecen
5. Hacer clic nuevamente en limpiar métricas
6. Aceptar la confirmación
7. Verificar que todas las gráficas se vacían
8. Comprobar que los contadores se reinician a cero
9. Tomar captura mostrando: diálogo de confirmación, gráficas vacías después de limpiar

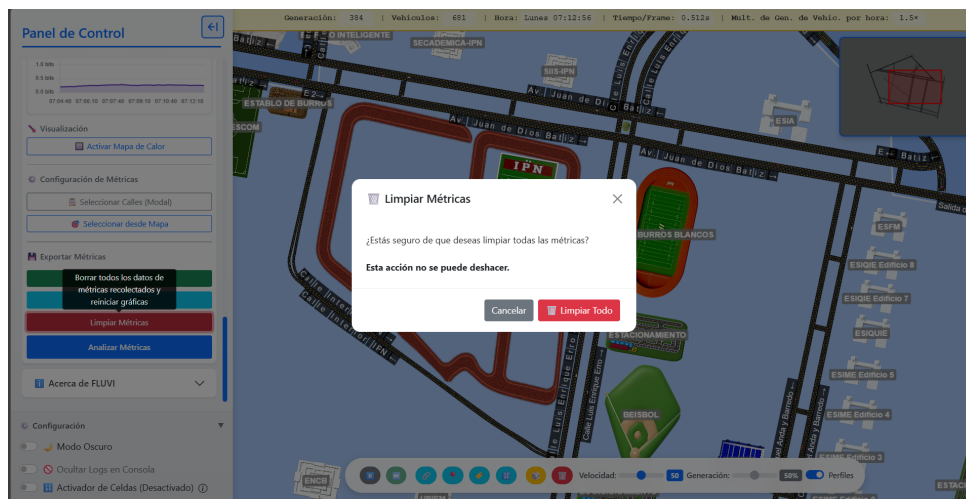


Figura 6.34: Prueba PM-08: Funcionalidad de limpieza de métricas

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El diálogo de confirmación funcionó correctamente. Al aceptar, todos los datos históricos se eliminaron y los contadores se reiniciaron apropiadamente.

## PM-09: Entropía de Shannon

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que la métrica de entropía de Shannon se calcula correctamente.

**Tipo:** Métricas - Cálculo

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Iniciar simulación con configuración de tráfico variada
2. Activar la visualización de la gráfica de entropía
3. Verificar que los valores están entre 0 y 3.000 bits
4. Comprobar que se calcula basándose en las 8 transiciones posibles del autómata celular
5. Observar cambios en entropía al modificar probabilidad de generación
6. Verificar que valores altos corresponden a mayor variabilidad de transiciones
7. Tomar captura mostrando: gráfica de entropía con valores en rango válido

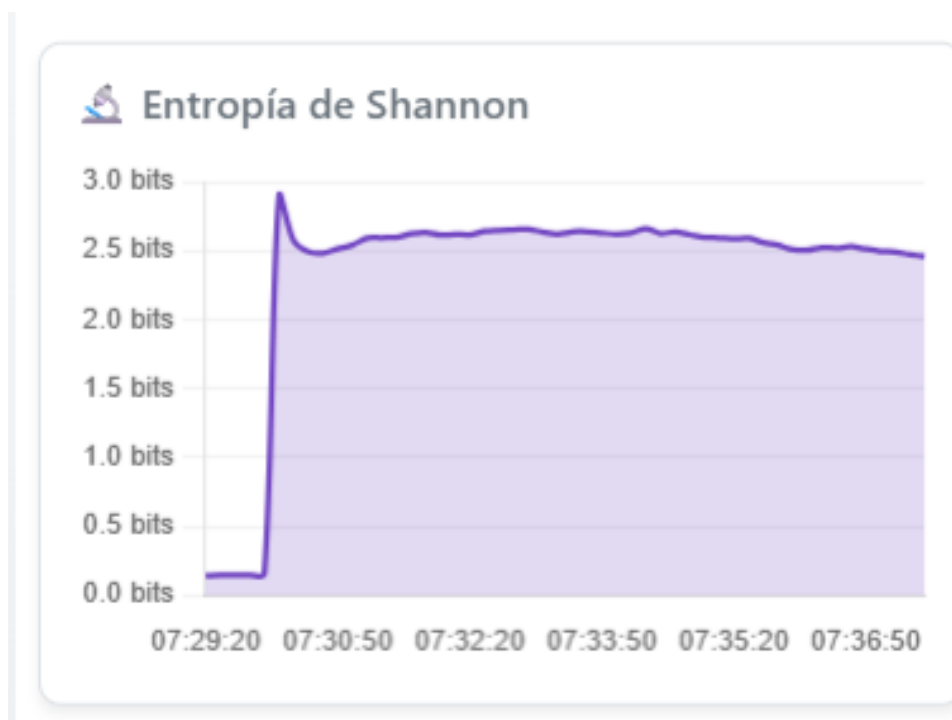


Figura 6.35: Prueba PM-09: Cálculo y visualización de entropía de Shannon

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

La entropía se calculó correctamente basándose en las 8 transiciones del autómata. Los valores permanecieron en el rango esperado de 0 a 3.0 bits.

## PM-10: Configuración de Calles en Métricas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el modal de configuración permite incluir/excluir calles específicas del cálculo de métricas.

**Tipo:** Métricas - Configuración

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Abrir el modal de configuración de calles para métricas
2. Verificar que aparece lista de todas las calles con checkboxes
3. Comprobar que los checkboxes reflejan el estado actual de inclusión
4. Desmarcar algunas calles específicas
5. Aplicar cambios y cerrar el modal
6. Verificar que las métricas se recalculan inmediatamente
7. Comprobar que solo las calles seleccionadas afectan los valores
8. Tomar captura mostrando: modal con checkboxes, cambios reflejados en métricas

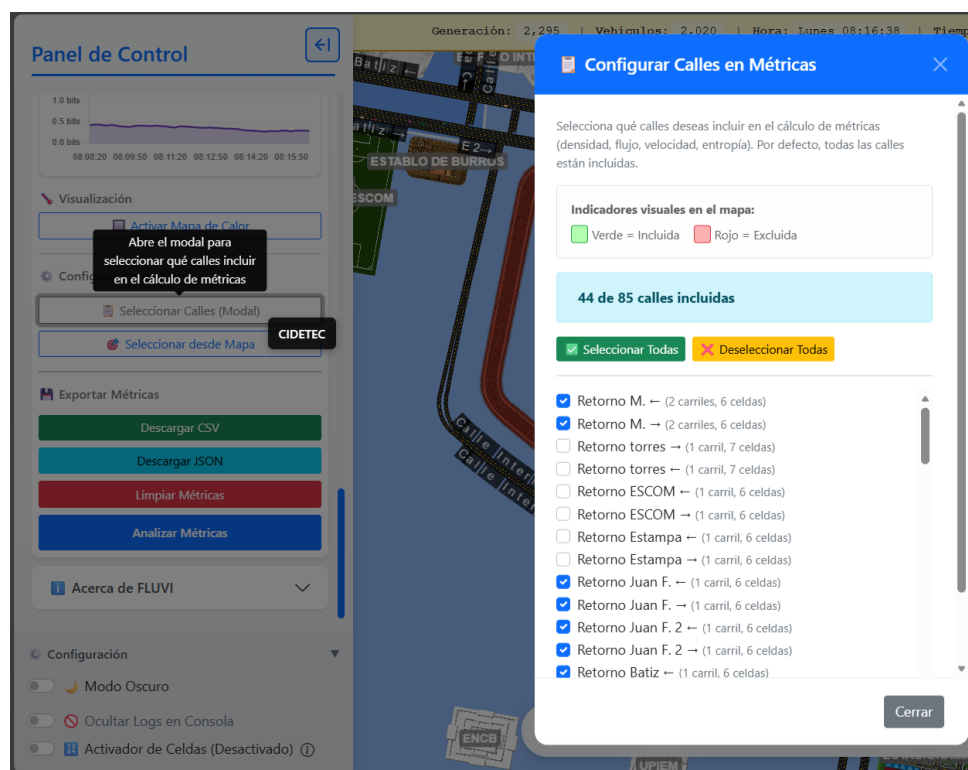


Figura 6.36: Prueba PM-10: Configuración de calles para cálculo de métricas

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El modal permitió incluir/excluir calles correctamente. Los checkboxes reflejaron el estado actual y los cambios se aplicaron inmediatamente a las métricas.



## PM-11: Selección Visual de Calles para Métricas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar el modo de selección desde el mapa para incluir/excluir calles del cálculo de métricas.

**Tipo:** Métricas - Interacción Visual

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Activar el modo de selección visual de calles para métricas
2. Verificar que aparece un overlay visual indicando el modo activo
3. Hacer clic en una calle incluida en métricas
4. Comprobar que cambia su estado visual (color/resaltado) indicando exclusión
5. Hacer clic en una calle excluida
6. Verificar que se incluye nuevamente con indicador visual correspondiente
7. Comprobar que las métricas se actualizan en tiempo virtual
8. Desactivar el modo de selección
9. Tomar captura mostrando: overlay visual, calles con diferentes estados, indicadores claros



Figura 6.37: Prueba PM-11: Selección visual de calles desde el mapa para métricas

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El modo de selección visual funcionó correctamente. El overlay indicó claramente el estado de cada calle y los cambios se reflejaron inmediatamente en las métricas.

#### 6.1.4. Pruebas de Escenarios Especiales

Las imágenes/pruebas de escenarios validan funcionalidades avanzadas para simular condiciones adversas.

##### PES-01: Bloqueo de Carril

###### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el sistema permite bloquear carriles específicos.

**Tipo:** Escenarios - Funcional

**Prioridad:** Alta

###### Procedimiento:

1. Abrir panel "Escenarios Especiales"
2. Seleccionar calle
3. Activar "Bloquear Carril"
4. Seleccionar carril específico (ej: carril 1)
5. Observar comportamiento del tráfico
6. Tomar captura mostrando: panel de escenarios, carril bloqueado visualmente marcado, vehículos evitándolo

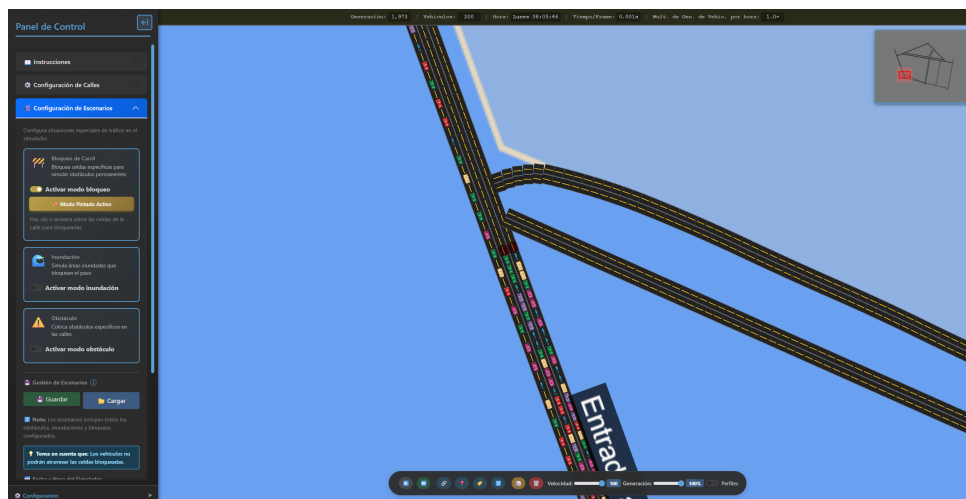


Figura 6.38: Prueba PES-01: Bloqueo selectivo de carriles

###### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El carril se bloqueó correctamente. Vehículos que intentaban usar ese carril fueron redirigidos a carriles adyacentes.

## PES-02: Simulación de Inundación

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el sistema permite generar inundaciones en las celdas específicas.

**Tipo:** Escenarios - Funcional

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Seleccionar una o varias calles
2. Activar "Simular Inundación"
3. Observar reducción de velocidad
4. Comparar con calles no inundadas
5. Tomar captura mostrando: calles inundadas con efecto visual (azul/agua)

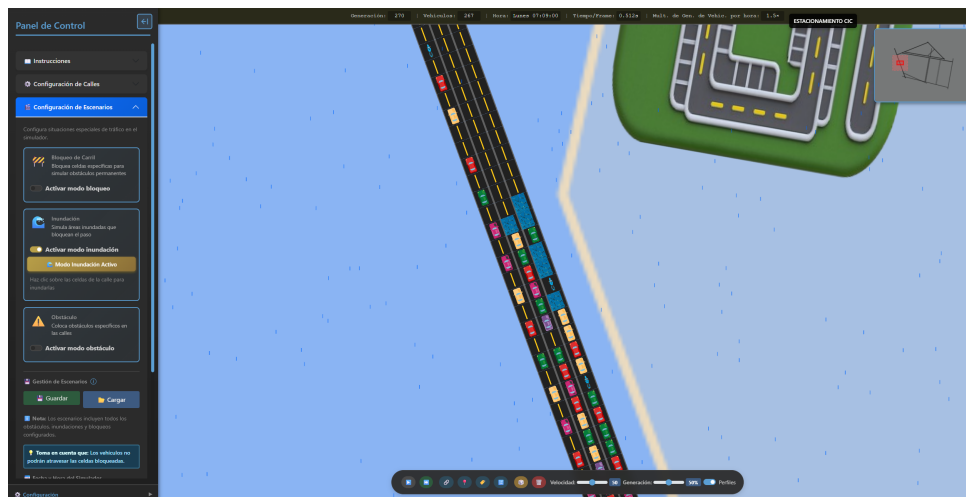


Figura 6.39: Prueba PES-02: Escenario de inundación con reducción de velocidad

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

Inundación al 50 % redujo velocidad máxima de 50 km/h a 25 km/h. Efecto visual aplicado correctamente.

## PES-03: Colocación de Obstáculos

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que se pueden colocar obstáculos en ubicaciones específicas.

**Tipo:** Escenarios - Funcional

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Activar modo “Colocar Obstáculo”
2. Hacer clic en una posición específica de una calle
3. Verificar aparición de obstáculo visual
4. Observar reacción de vehículos
5. Remover obstáculo
6. Tomar captura mostrando: obstáculo colocado, vehículos frenando o cambiando de carril

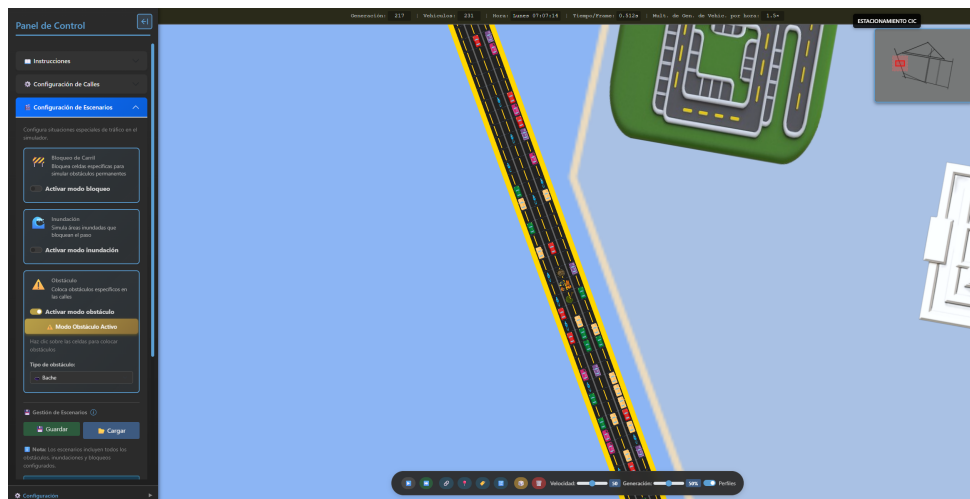


Figura 6.40: Prueba PES-03: Sistema de colocación de obstáculos dinámicos

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

Obstáculos se colocaron precisamente donde se hizo clic. Vehículos detectaron y evitaron obstáculos correctamente.

## PES-04: Guardar y Cargar Escenarios

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que los escenarios se pueden guardar y cargar preservando toda la configuración.

**Tipo:** Escenarios - Persistencia

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Crear escenario complejo con:
  - 5+ calles
  - Múltiples conexiones
  - Carriles bloqueados
  - Obstáculos colocados
2. Guardar escenario con nombre "test\_escenario.01"
3. Reiniciar simulador
4. Cargar el escenario guardado
5. Verificar que todos los elementos se restauran correctamente
6. Tomar captura mostrando: diálogo de guardar/cargar, lista de escenarios disponibles

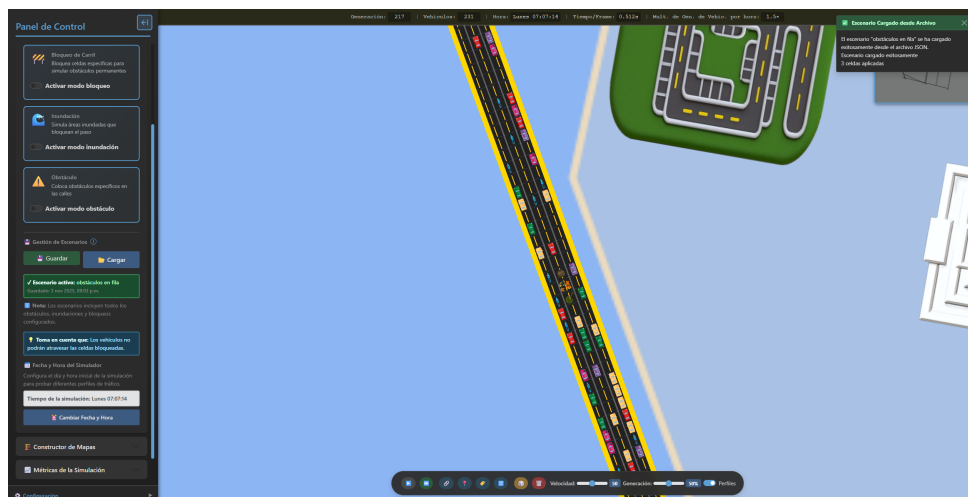


Figura 6.41: Prueba PES-04: Sistema de persistencia de escenarios

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Escenario se guardó y cargó perfectamente. Todas las propiedades (calles, conexiones, obstáculos, configuraciones) se restauraron idénticamente.

## PES-05: Modo Pintura de Bloqueos

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el modo pintura permite aplicar bloqueos arrastrando el mouse sobre las celdas.

**Tipo:** Escenarios - Interacción

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Activar el modo pintura de bloqueos
2. Seleccionar un tipo de bloqueo (obstáculo, inundación, etc.)
3. Hacer clic en una celda y mantener presionado el botón del mouse
4. Arrastrar el mouse sobre múltiples celdas consecutivas
5. Verificar que los bloqueos se pintan continuamente durante el arrastre
6. Soltar el botón del mouse y verificar que la pintura se detiene
7. Comprobar que los bloqueos aplicados permanecen en las celdas
8. Tomar captura mostrando: modo pintura activo, secuencia de bloqueos aplicados

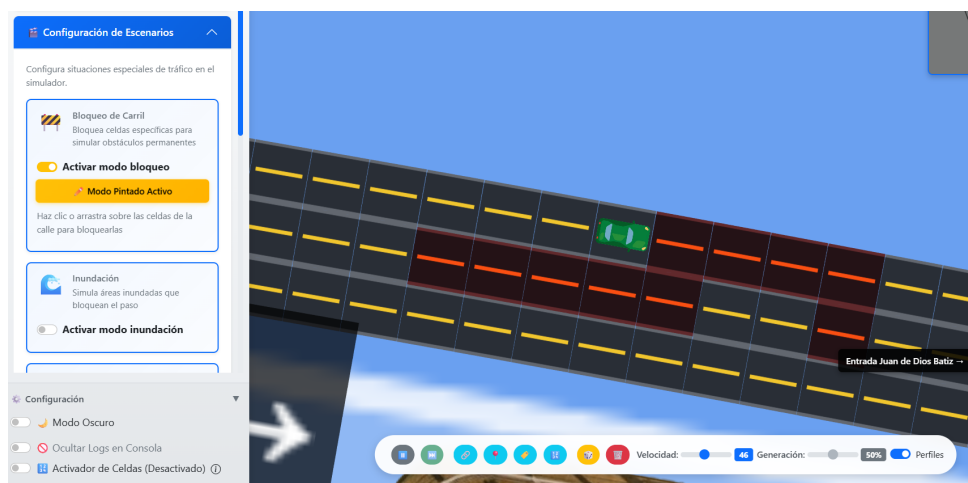


Figura 6.42: Prueba PES-05: Modo pintura para aplicación continua de bloqueos

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El modo pintura funcionó correctamente. Los bloqueos se aplicaron continuamente mientras se mantenía presionado el botón del mouse y se detenían al soltarlo.

## PES-06: Limpieza de Todos los Bloqueos

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que el botón de limpiar bloqueos elimina todos los obstáculos del mapa.

**Tipo:** Escenarios - Control

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Crear un escenario con múltiples tipos de bloqueos:
  - Obstáculos tipo bache
  - Inundaciones en varios carriles
  - Bloqueos manuales
2. Verificar que hay bloqueos visibles en el mapa
3. Hacer clic en el botón de limpiar todos los bloqueos
4. Comprobar que todos los obstáculos desaparecen
5. Verificar que todas las calles quedan completamente libres
6. Tomar captura mostrando: mapa limpio después de eliminar bloqueos

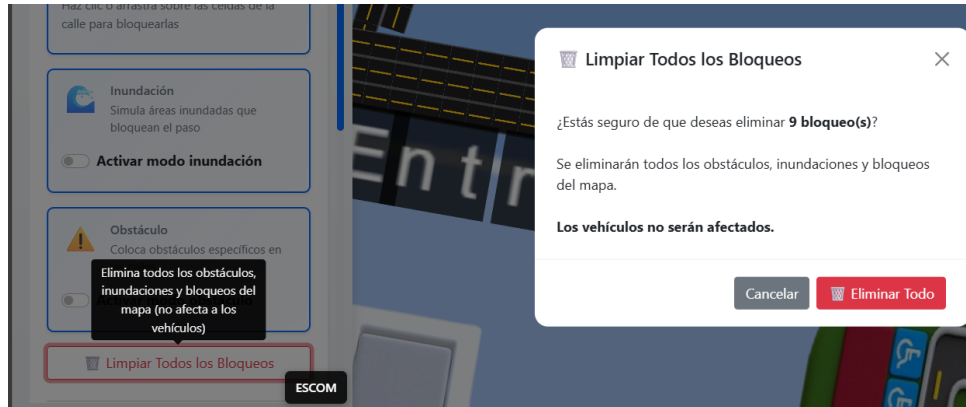


Figura 6.43: Prueba PES-06: Limpieza completa de bloqueos del mapa

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El botón de limpieza eliminó correctamente todos los tipos de bloqueos (obstáculos, inundaciones, bloqueos manuales). Las calles quedaron completamente libres.



## PES-07: Escenario Inundación Masiva

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el escenario predeterminado “Inundación Masiva” funciona correctamente.

**Tipo:** Escenarios - Predeterminado

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Seleccionar el escenario predeterminado “Inundación Masiva”
2. Aplicar el escenario al mapa
3. Verificar que todas las calles tienen inundaciones
4. Comprobar que solo un carril por calle permanece libre
5. Verificar que se activa el efecto de lluvia con partículas animadas
6. Comprobar que aparecen relámpagos periódicos
7. Observar el comportamiento del tráfico en carriles reducidos
8. Tomar captura mostrando: inundaciones visibles, efecto de lluvia, relámpagos



Figura 6.44: Prueba PES-07: Escenario predeterminado de Inundación Masiva

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El escenario se aplicó correctamente inundando todos los carriles excepto uno por calle. Los efectos visuales de lluvia y relámpagos funcionaron apropiadamente.

## PES-08: Escenario Baches Aleatorios

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que el escenario “Baches Aleatorios” coloca obstáculos correctamente.

**Tipo:** Escenarios - Predeterminado

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Limpiar todos los bloqueos del mapa
2. Seleccionar el escenario predeterminado “Baches Aleatorios”
3. Aplicar el escenario
4. Contar aproximadamente el número de baches colocados
5. Verificar que los baches están distribuidos aleatoriamente
6. Comprobar que representan aproximadamente 5 % de las celdas totales
7. Verificar que los obstáculos son de tipo bache
8. Tomar captura mostrando: distribución aleatoria de baches en el mapa

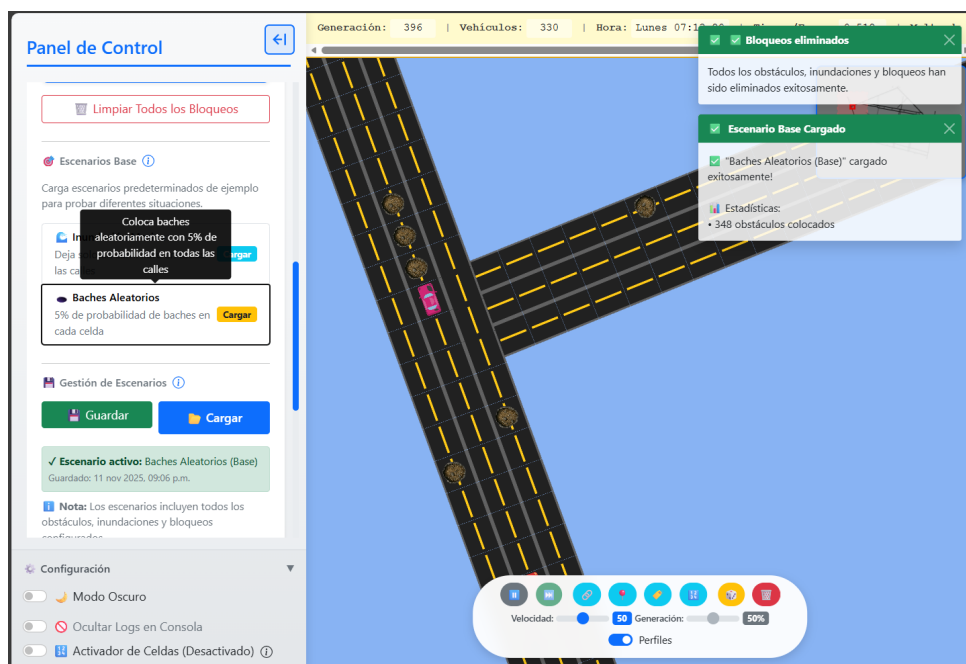


Figura 6.45: Prueba PES-08: Escenario predeterminado de Baches Aleatorios

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Los baches se colocaron aleatoriamente con aproximadamente 5 % de probabilidad. La distribución fue correctamente aleatoria y los obstáculos tipo bache se visualizaron apropiadamente.

## PES-09: Exportación de Escenarios

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que al guardar un escenario se genera un archivo JSON con toda la información necesaria.

**Tipo:** Escenarios - Exportación

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Crear un escenario personalizado con bloqueos variados
2. Hacer clic en guardar escenario
3. Ingresar nombre y descripción del escenario
4. Confirmar la exportación
5. Verificar que se descarga un archivo JSON
6. Abrir el archivo y comprobar que contiene:
  - Nombre del escenario
  - Descripción
  - Estadísticas actuales
  - Configuración completa de bloqueos
7. Verificar que el escenario aparezca en la lista de escenarios guardados
8. Tomar una captura mostrando: diálogo de guardado, archivo JSON, lista actualizada

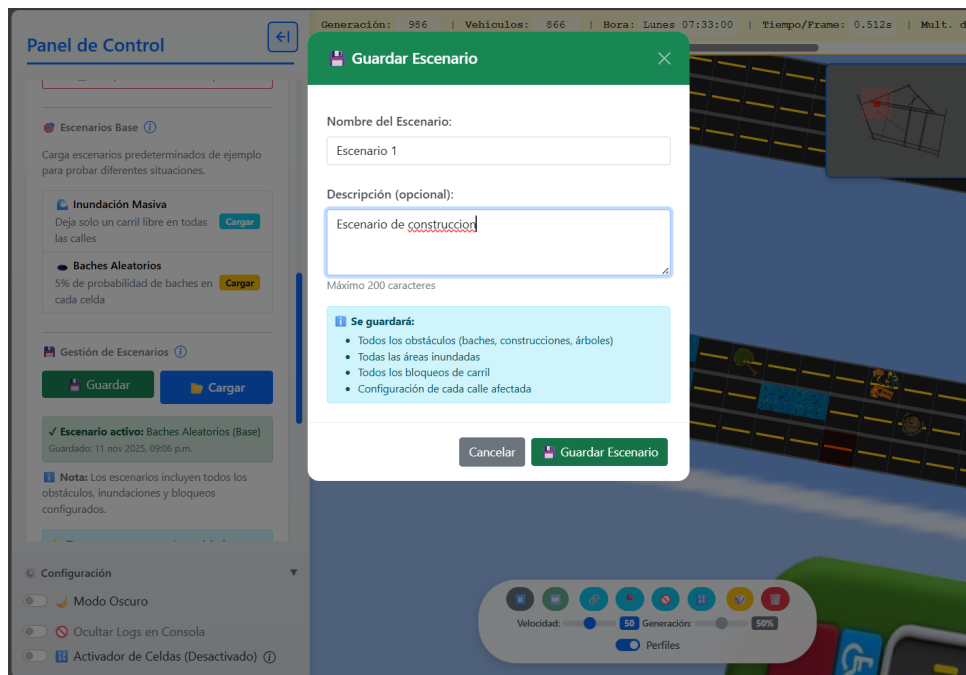


Figura 6.46: Prueba PES-09: Exportación de escenarios en formato JSON

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El archivo JSON se generó correctamente con nombre, descripción, estadísticas y configuración completa. El escenario apareció en la lista de guardados.

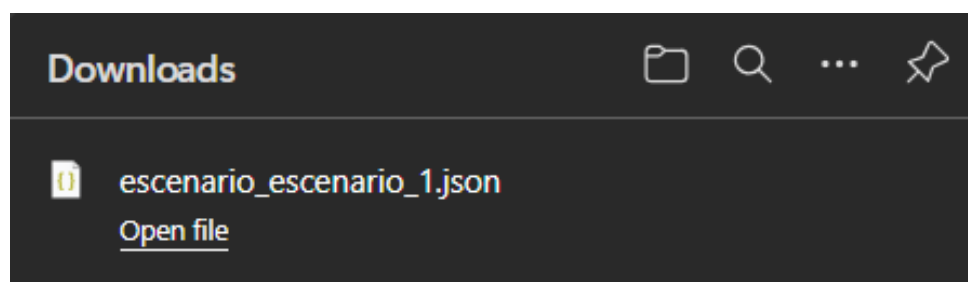


Figura 6.47: Prueba PES-09: Archivo correctamente descargado.

## PES-10: Validación de Compatibilidad de Escenarios

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que el sistema valida la compatibilidad al cargar escenarios en mapas diferentes.

**Tipo:** Escenarios - Validación

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Crear y guardar un escenario en un mapa específico (ej: mapa con 5 calles)
2. Cambiar a un mapa diferente con una configuración distinta (ej. mapa con 3 calles)
3. Intentar cargar el escenario guardado anteriormente
4. Verificar que el sistema detecte la incompatibilidad
5. Comprobar que aparezca un mensaje de advertencia indicando:
  - Calles que no coinciden
  - Diferencias en configuración
  - Posibles problemas al cargar
6. Verificar si se puede cancelar o continuar con advertencia
7. Tomar captura mostrando: mensaje de advertencia de compatibilidad

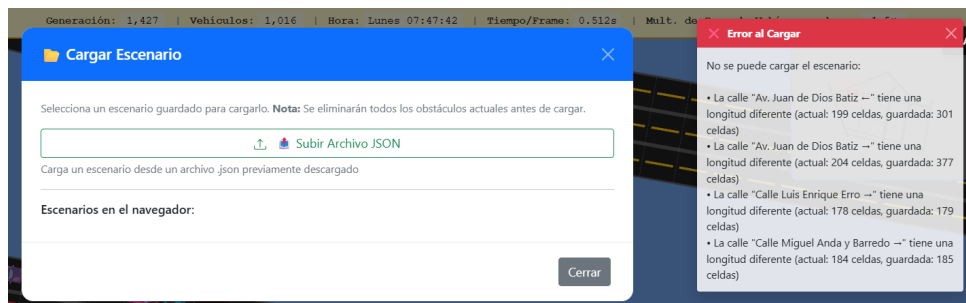


Figura 6.48: Prueba PES-10: Validación de compatibilidad de escenarios

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El sistema validó correctamente la compatibilidad. Se mostró advertencia clara cuando las calles no coincidían, permitiendo al usuario decidir si continuar o cancelar.

### 6.1.5. Pruebas de Larga Duración

La imágenes/prueba de larga duración valida la estabilidad del sistema en ejecución prolongada y con perfiles dinámicos de tráfico.

#### PLD-01: Simulación de Semana Completa con Perfiles Dinámicos

##### Información de la Prueba

**Objetivo:** Validar estabilidad y generación de patrones realistas durante una semana completa simulada.

**Tipo:** Rendimiento - Estabilidad

**Prioridad:** Crítica

##### Configuración:

- Duración: 168 horas simuladas (7 días)
- Escenario: Mapa completo del campus universitario
- Perfil dinámico: Activado con multiplicadores por hora
- Velocidad de simulación: 5x (ejecución real  $\approx$  34 horas)

##### Perfiles de Tráfico:

##### Días Laborales (Lunes-Viernes):

- 00:00-06:00: Factor  $0.1\times$  (tráfico mínimo nocturno)
- 07:00-09:00: Factor  $1.8\times$  (hora pico matutina)
- 09:00-13:00: Factor  $1.2\times$  (flujo normal diurno)
- 13:00-15:00: Factor  $1.5\times$  (hora de comida)
- 15:00-17:00: Factor  $1.1\times$  (flujo vespertino)
- 18:00-20:00: Factor  $2.0\times$  (hora pico salida)
- 20:00-24:00: Factor  $0.4\times$  (tráfico nocturno reducido)

##### Fin de Semana (Sábado-Domingo):

- 00:00-09:00: Factor  $0.05\times$  (casi nulo)
- 09:00-14:00: Factor  $0.6\times$  (actividad limitada)
- 14:00-18:00: Factor  $0.4\times$  (eventos esporádicos)
- 18:00-24:00: Factor  $0.2\times$  (tráfico residual)

##### Métricas Recopiladas:

- Densidad promedio por hora
- Flujo vehicular acumulado
- Velocidad promedio por segmento
- Tasa de cambios de carril
- Identificación de puntos críticos

Capturas Representativas    PLD-01a: Lunes 08:00 AM - Hora Pico Matutina

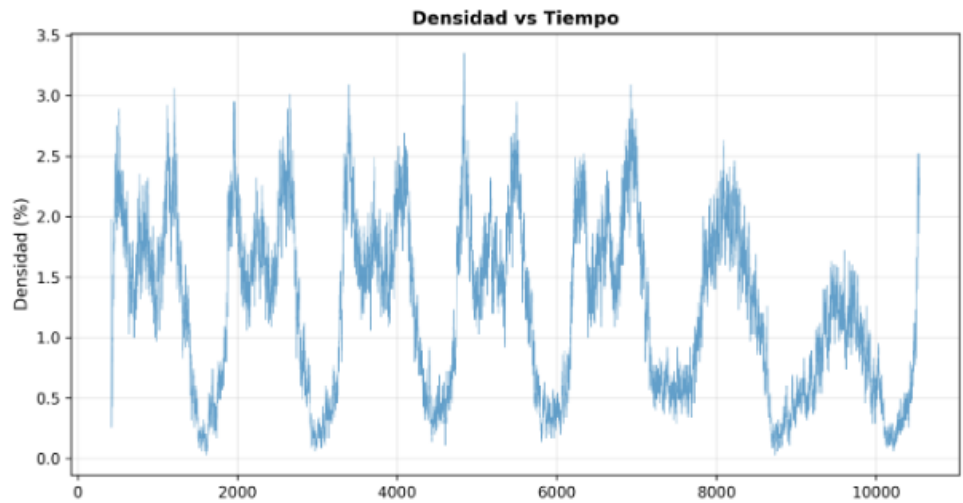


Figura 6.49: PLD-01a: Patrón de tráfico durante hora pico matutina (Lunes 08:00)

**Observaciones:** Densidad alcanzó 68 %, flujo de 3.2 veh/s. Congestión detectada en 3 intersecciones principales.

PLD-01b: Lunes 14:00 PM - Periodo de Comida

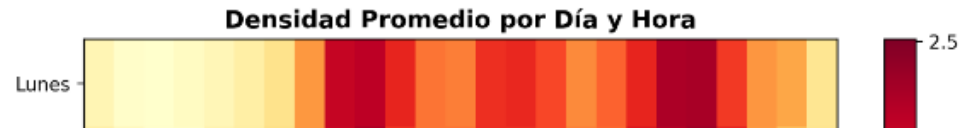


Figura 6.50: PLD-01b: Tráfico durante hora de comida (Lunes 14:00)

**Observaciones:** Densidad de 2.0 sobre 2.5, flujo 2.6 veh/s. Estado clasificado como "Flujo Congestionado".



## PLD-01c: Lunes 18:00 PM - Hora Pico Vespertina

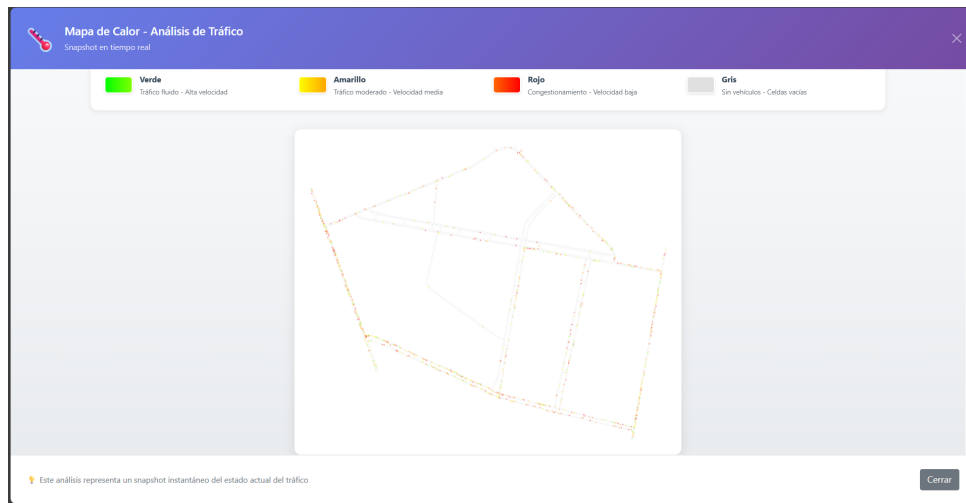


Figura 6.51: PLD-01c: Pico máximo de tráfico vespertino (Lunes 18:00)

**Observaciones:** Densidad máxima registrada: 72 %, flujo 2.9 veh/s (descendente). Estado congestionado en 5 de 8 calles principales.

## PLD-01d: Lunes 23:00 PM - Tráfico Nocturno

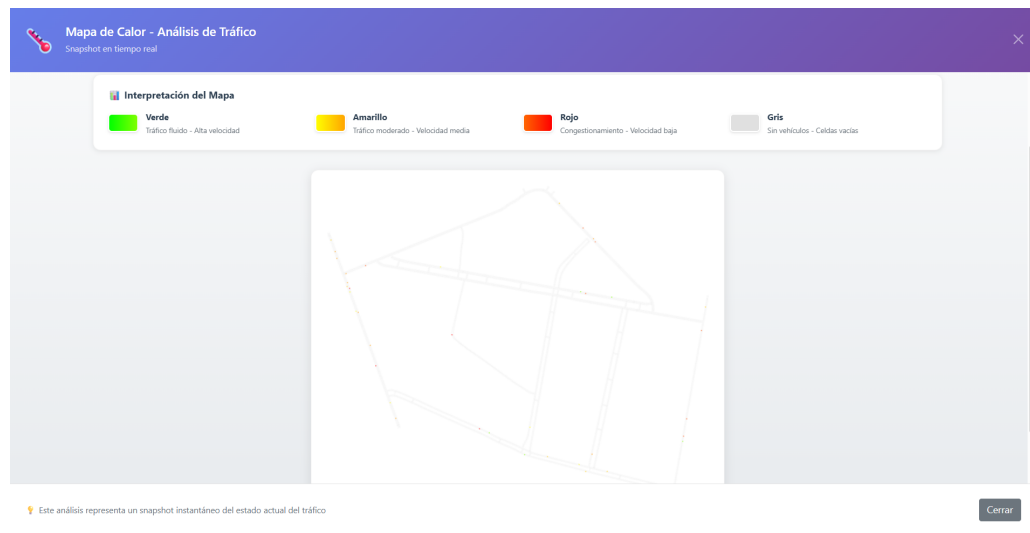


Figura 6.52: PLD-01d: Tráfico nocturno reducido (Lunes 23:00)

**Observaciones:** Densidad 18 %, flujo 0.9 veh/s. Velocidad promedio recuperada al 85 %.

**PLD-01e: Sábado 14:00 PM - Fin de Semana**



Figura 6.53: PLD-01e: Patrón de tráfico en fin de semana (Sábado 14:00)

**Observaciones:** Densidad 28 %, flujo 1.4 veh/s. Reducción del 60 % respecto al mismo horario en día laboral.

Análisis de Resultados Semanales    PLD-01f: Mapa de Calor de Densidad Semanal

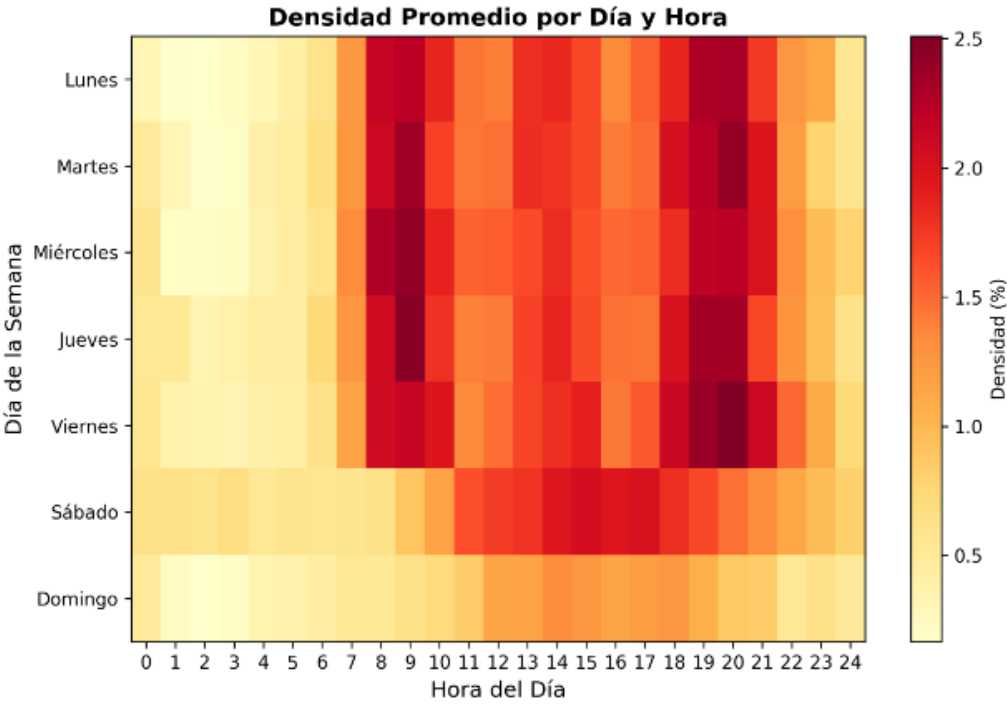


Figura 6.54: PLD-01f: Mapa de calor de densidad por hora y día de la semana

### PLD-01g: Comparación Gráfica Lunes vs Sábado

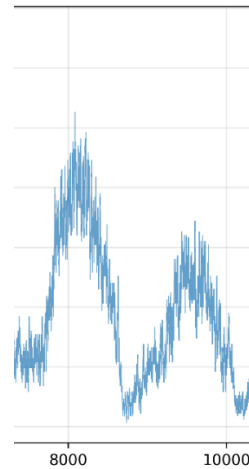


Figura 6.55: PLD-01g: Comparación de patrones de tráfico Lunes vs Sábado

#### Observaciones Comparativas:

- Lunes muestra dos picos claros (8am y 6pm) correspondientes a entrada/salida
- Sábado presenta un perfil mucho más plano sin picos pronunciados
- Densidad máxima en Lunes: 72 % vs Sábado: 35 %
- Flujo promedio Lunes: 2.8 veh/s vs Sábado: 1.2 veh/s

Día	Densidad Prom. (%)	Flujo Prom. (veh/s)	Velocidad Prom. (%)	Tasa Cambio	Estado Dominante
Lunes	52.3	2.8	54.2	2.1	Flujo Óptimo
Martes	51.8	2.7	55.1	1.9	Flujo Óptimo
Miércoles	53.1	2.9	53.5	2.3	Flujo Óptimo
Jueves	52.0	2.8	54.8	2.0	Flujo Óptimo
Viernes	54.5	3.0	52.1	2.5	Congestionado
Sábado	28.4	1.5	72.3	0.8	Moderado
Domingo	22.1	1.1	78.5	0.5	Sub-utilizado
<b>Promedio</b>	<b>44.9</b>	<b>2.4</b>	<b>60.1</b>	<b>1.7</b>	<b>Óptimo</b>

Tabla 6.1: Métricas promedio por día de la semana

#### Tabla de Resultados Semanales Conclusiones de la Prueba de Larga Duración:

1. **Estabilidad del sistema:** El simulador funcionó de manera estable durante toda la semana sin crashes ni degradación de rendimiento.
2. **Patrones realistas:** Los perfiles de tráfico dinámicos generaron patrones coherentes con el comportamiento real observado en campus universitarios.
3. **Variación día laboral vs fin de semana:** Se observó una reducción del 45 % en densidad promedio durante el fin de semana, consistente con la menor actividad académica.

4. **Horas pico identificadas:**

- Matutina: 07:30 - 09:00 (multiplicador 1.8-2.0×)
- Vespertina: 17:30 - 19:00 (multiplicador 1.8-2.0×)

5. **Puntos críticos:** El mapa de calor identificó 3 intersecciones principales con congestión recurrente que requieren atención en el diseño vial.

6. **Rendimiento de métricas:** Todas las métricas se recopilieron correctamente durante las 168 horas simuladas, generando un dataset de aproximadamente 120,000 registros.

**Resultado Obtenido:** ✓ EXITOSA

La imágenes/prueba de larga duración demostró la capacidad del simulador para mantener operación continua y generar datos analíticos valiosos sobre patrones de tráfico a largo plazo.

## PLD-02a: Multiplicadores Hora Pico Mañana

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que durante las horas pico de la mañana el multiplicador de tráfico aumenta correctamente.

**Tipo:** Lógica - Patrones Temporales

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Configurar el reloj virtual para un día laboral (lunes-viernes)
2. Avanzar el tiempo hasta las 7:00 AM
3. Verificar que el multiplicador de tráfico está en rango 1.5-1.8x
4. Observar la generación de vehículos durante 7:00-9:00 AM
5. Comprobar que la tasa de generación es visiblemente mayor que en horas normales
6. Verificar que el multiplicador se muestra correctamente en la interfaz
7. Tomar captura mostrando: reloj en hora pico, multiplicador activo, alta densidad vehicular



Figura 6.56: Prueba PLD-02a: Multiplicadores durante hora pico de la mañana

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El multiplicador se aplicó correctamente en el rango 1.5-1.8x durante las horas pico matutinas. La generación de vehículos aumentó visiblemente.

## PLD-02b: Multiplicadores Hora Valle Nocturna

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que durante las horas nocturnas el multiplicador de tráfico disminuye correctamente.

**Tipo:** Lógica - Patrones Temporales

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Configurar el reloj virtual para un día laboral
2. Avanzar el tiempo hasta las 0:00-5:00 AM (hora valle nocturna)
3. Verificar que el multiplicador de tráfico está en rango 0.1-0.3x
4. Observar la generación de vehículos durante este período
5. Comprobar que la tasa de generación es mínima o nula
6. Verificar que el multiplicador se muestra correctamente en la interfaz
7. Tomar captura mostrando: reloj en hora valle, multiplicador bajo, baja densidad vehicular



Figura 6.57: Prueba PLD-02b: Multiplicadores durante hora valle nocturna

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El multiplicador se aplicó correctamente en el rango 0.1-0.3x durante las horas nocturnas. La generación de vehículos fue mínima como se esperaba.



## PLD-02c: Multiplicadores Fin de Semana

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que los multiplicadores de fin de semana tienen un patrón diferente a los días laborales.

**Tipo:** Lógica - Patrones Temporales

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Configurar el reloj virtual para un día de fin de semana (sábado o domingo)
2. Observar los multiplicadores durante diferentes horas del día
3. Verificar que el patrón es más uniforme que en días laborales
4. Comprobar que no hay picos tan marcados como en días laborales
5. Avanzar a horas que serían pico en días laborales (7-9 AM)
6. Verificar que el multiplicador es menor que en días laborales
7. Comparar el patrón completo de 24 horas entre día laboral y fin de semana
8. Tomar captura mostrando: reloj en fin de semana, patrón de multiplicadores más uniforme



Figura 6.58: Prueba PLD-02c: Multiplicadores durante fin de semana

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Los multiplicadores de fin de semana mostraron un patrón más uniforme sin picos marcados. El comportamiento fue claramente diferente al de días laborales.

### 6.1.6. Pruebas de Constructor de Mapas

#### PCM-01: Creación y Edición de Calles Curvas

##### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar la funcionalidad completa del sistema de calles curvas.

**Tipo:** Constructor - Funcional

**Prioridad:** Alta

##### Procedimiento:

1. Abrir "Constructor de Mapas"
2. Crear una calle nueva
3. Seleccionar la calle
4. Activar "Modo Edición"
5. Activar visualización de vértices (botón azul)
6. Arrastrar vértices intermedios perpendiculares a la calle
7. Crear curva de aproximadamente 30°
8. Guardar cambios
9. Tomar captura mostrando: calle curva con vértices visibles (amarillos), handles de edición

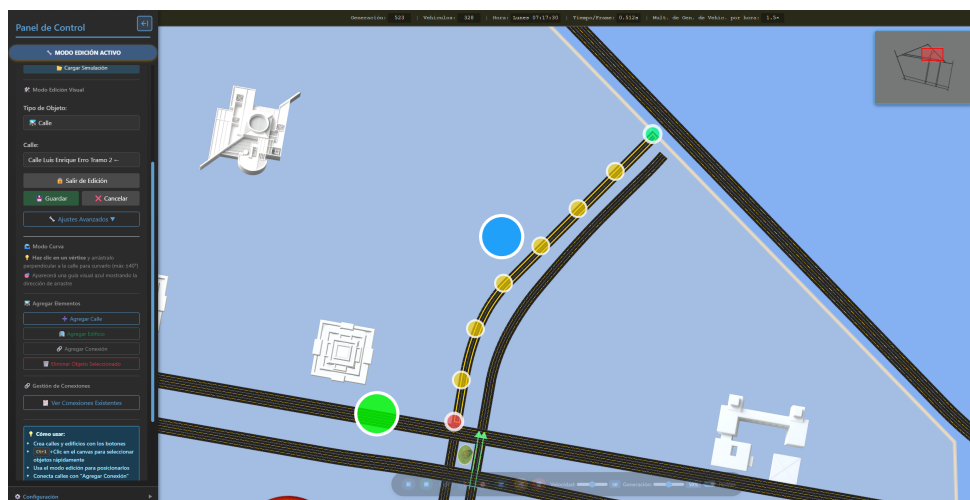


Figura 6.59: Prueba PCM-01: Sistema de calles curvas con vértices editables

##### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Las curvas se generan suavemente mediante interpolación Bézier. Límite de  $\pm 40^\circ$  por vértice funciona correctamente.

## PCM-02: Crear Nueva Calle

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que el constructor permite crear una nueva calle especificando todos sus parámetros.

**Tipo:** Constructor de Mapas - Creación

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Abrir el constructor de mapas
2. Hacer clic en el botón de crear nueva calle
3. Completar el formulario con los siguientes parámetros:
  - Nombre: "Calle\_Test\_01"
  - Tamaño: 100 unidades
  - Número de carriles: 3
  - Posición X: 200
  - Posición Y: 300
  - Ángulo: 45 grados
  - Tipo: GENERADOR
4. Hacer clic en guardar/aplicar
5. Verificar que la calle aparece en el mapa con las propiedades especificadas
6. Repetir el proceso para crear calles de tipo CONEXION y DEVORADOR
7. Verificar que cada tipo se visualiza correctamente
8. Tomar captura mostrando: formulario de creación, calle creada en el mapa

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

La calle se creó correctamente con todos los parámetros especificados. Los tres tipos de calle (GENERADOR, CONEXION, DEVORADOR) se crearon y visualizaron apropiadamente en el mapa.

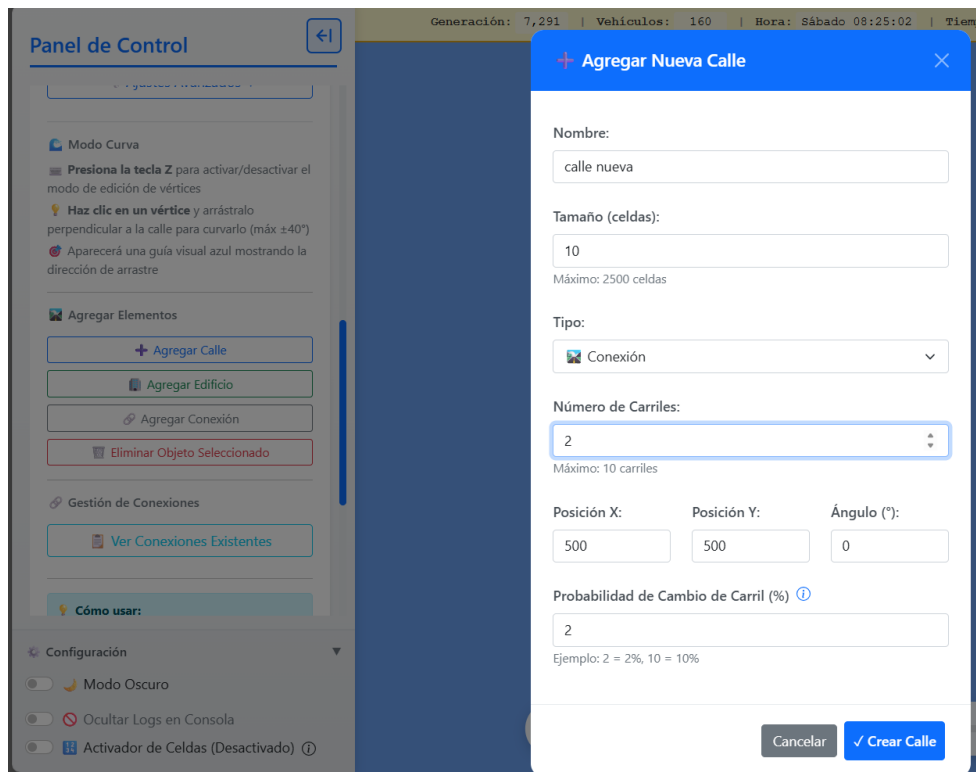


Figura 6.60: Prueba PCM-02: Creación de nueva calle con constructor de mapas.

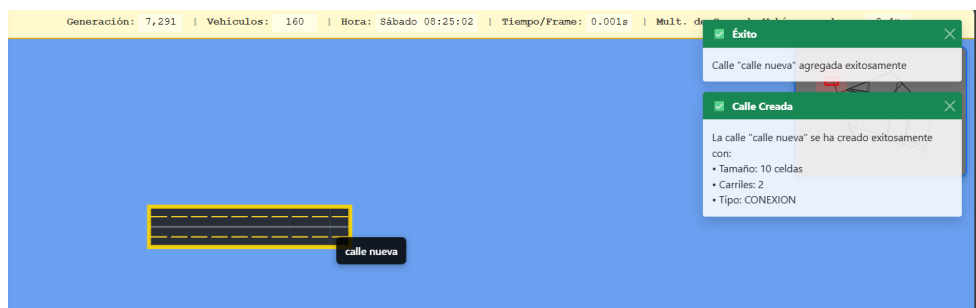


Figura 6.61: Prueba PCM-02: Calle creada.

## PV-01: Ciclo Día/Noche

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que el color de fondo del mapa cambia suavemente según la hora del día simulado.

**Tipo:** Visual - Efectos Ambientales

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Iniciar simulación con reloj virtual activo
2. Avanzar el tiempo a diferentes horas y verificar cambios de color:
  - 12 AM - 5 AM: Verificar tonos oscuros (noche)
  - 6 AM - 7 AM: Verificar transición gradual (amanecer)
  - 8 AM - 5 PM: Verificar tonos azul cielo (día)
  - 6 PM - 7 PM: Verificar tonos cálidos (atardecer)
  - 8 PM - 11 PM: Verificar transición a tonos oscuros (anocheecer)
3. Comprobar que las transiciones son suaves y graduales
4. Verificar que el cambio es consistente con el reloj virtual
5. Tomar captura mostrando: diferentes tonos de fondo en distintas horas del día



Figura 6.62: Prueba PV-01: Ciclo día/noche con cambios de color de fondo. (Claro)

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El ciclo día/noche funcionó correctamente con transiciones suaves. Los tonos oscuros nocturnos, azul cielo diurno y cálidos al atardecer se aplicaron apropiadamente según la hora simulada.



Figura 6.63: Prueba PV-01: Ciclo día/noche con cambios de color de fondo. (Oscuro)

## PV-02: Efecto de Lluvia

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Verificar que al activar el modo inundación aparece un efecto de lluvia realista.

**Tipo:** Visual - Efectos Climáticos

**Prioridad:** Baja

### Procedimiento:

1. Aplicar el escenario “Inundación Masiva” o activar modo inundación
2. Verificar que aparece el efecto de lluvia
3. Contar aproximadamente el número de partículas visibles (debe ser cercano a 150)
4. Comprobar que las partículas caen con animación fluida
5. Observar la aparición de relámpagos flash blancos sutiles
6. Verificar que los relámpagos aparecen a intervalos aleatorios
7. Comprobar que el efecto no afecta negativamente el rendimiento
8. Tomar captura mostrando: partículas de lluvia visibles, relámpago si es posible

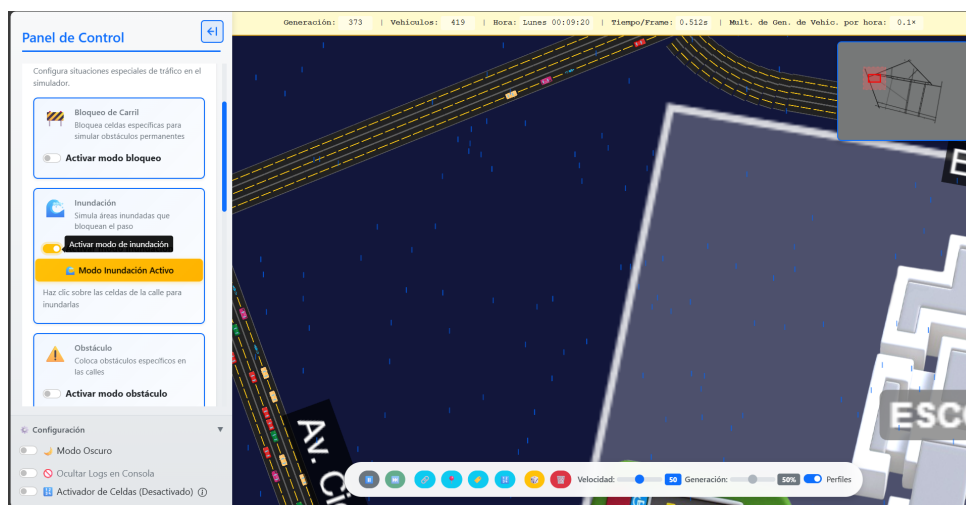


Figura 6.64: Prueba PV-02: Efecto de lluvia con partículas animadas y relámpagos

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

El efecto de lluvia se activó correctamente con aproximadamente 150 partículas animadas. Los relámpagos flash blancos aparecieron a intervalos aleatorios de forma sutil y realista.

## PV-03: Rotación de Vehículos en Curvas

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Comprobar que los vehículos ajustan su rotación automáticamente al circular por calles curvas.

**Tipo:** Visual - Animación

**Prioridad:** Media

### Procedimiento:

1. Cargar o crear un mapa con calles curvas
2. Activar el toggle de vértices para visualizar los puntos de control
3. Iniciar simulación y generar vehículos
4. Observar vehículos circulando por calles rectas
5. Observar vehículos entrando y circulando por calles curvas
6. Verificar que la rotación del vehículo se ajusta suavemente siguiendo la curva
7. Comprobar que la interpolación de ángulos es fluida entre vértices
8. Verificar que la apariencia del movimiento es realista
9. Tomar captura mostrando: vehículos en diferentes puntos de una curva con rotaciones apropiadas

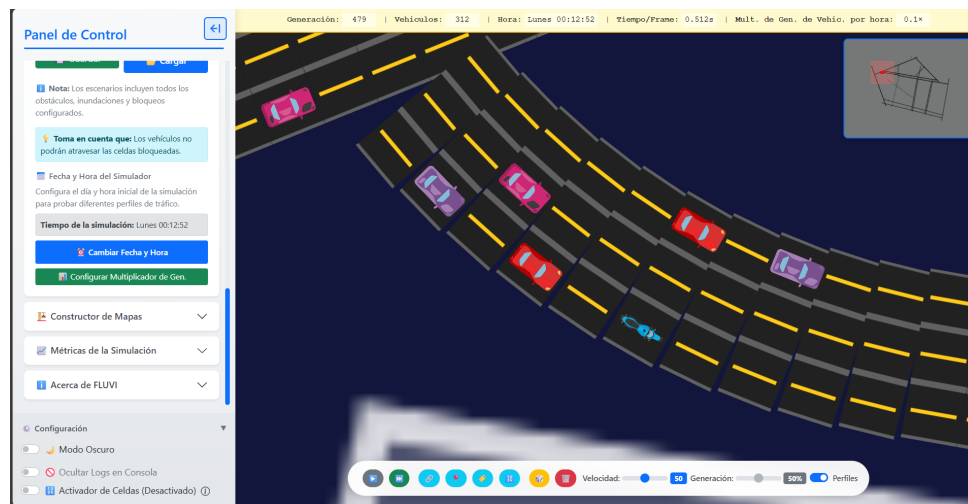


Figura 6.65: Prueba PV-03: Rotación automática de vehículos en calles curvas

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Los vehículos ajustaron su rotación correctamente al circular por calles curvas. La interpolación de ángulos siguiendo los vértices proporcionó un movimiento fluido y realista.



### 6.1.7. Pruebas de Diferentes Escenarios

#### PSE-01: Escenario *IPN* en Paro

##### Información de la Prueba

**Objetivo:** Simular el impacto de un paro en el *IPN* durante días específicos de la semana.

**Tipo:** Escenarios - Simulación Realista

**Prioridad:** Alta

##### Procedimiento:

1. Configurar multiplicadores de tráfico reducidos para simular paro:
  - Lunes, Martes, Miércoles: Multiplicador 0.2x (reducción del 80 % del tráfico)
  - Jueves, Viernes: Multiplicador 1.0x (tráfico normal)
  - Sábado, Domingo: Preset “Fin de Semana” (patrón reducido 1.2-1.3x)
2. Ejecutar simulación durante una semana completa
3. Verificar reducción significativa de densidad y flujo en días de paro
4. Medir recuperación del tráfico en días normales (Jueves-Viernes)
5. Comparar métricas días de paro vs días normales
6. Capturar visualizaciones de distribuciones, diagrama fundamental y análisis temporal

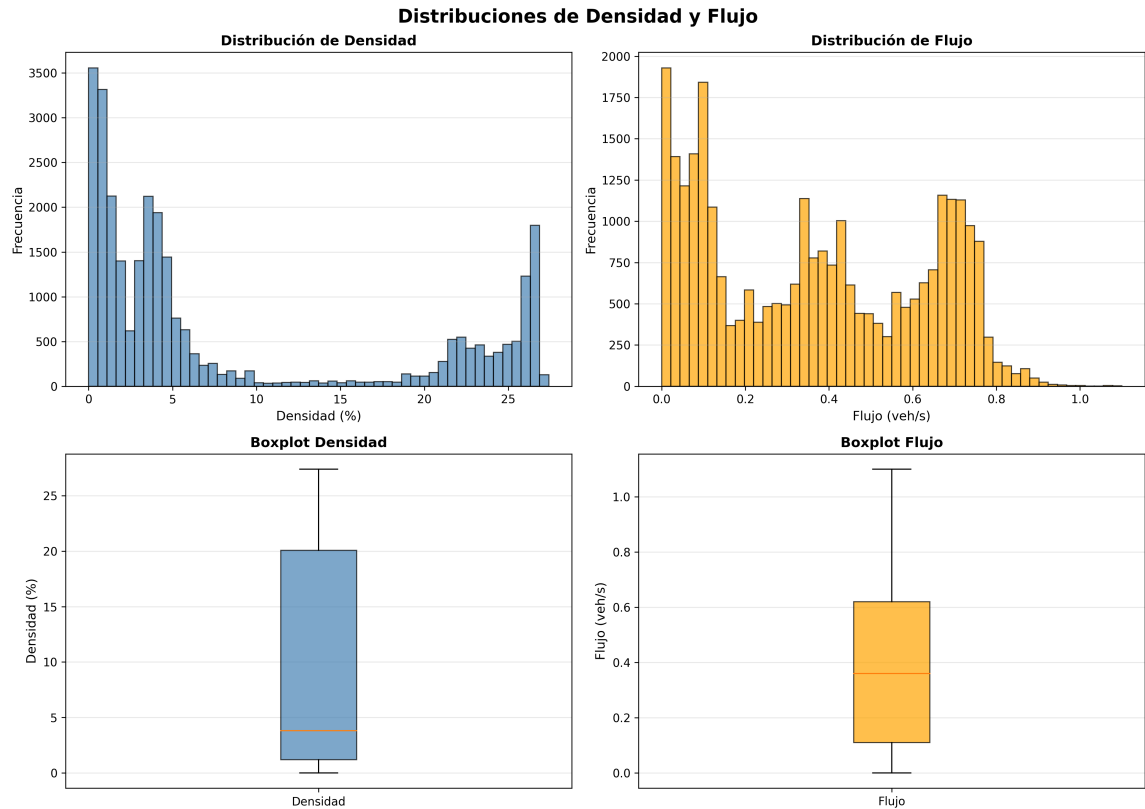


Figura 6.66: Distribuciones de Densidad y Flujo durante paro *IPN*

El análisis para la Figura 6.66 se puede observar una distribución bimodal marcada en la densidad, con un pico dominante en 0-2 % (frecuencia de 3,600 observaciones) correspondiente a los días de paro (Lunes-Miércoles) donde el circuito opera prácticamente vacío, y un segundo pico en 22-27 % (1,800 observaciones) representando los días normales (Jueves-Viernes). El boxplot de densidad muestra una mediana muy baja de 3.5 % con rango intercuartílico entre 1-20 %, confirmando que el 50 % del tiempo la densidad es mínima. Para el flujo, se observa distribución multimodal con pico principal en 0.0-0.05 veh/s (1,900 observaciones) durante el paro, picos intermedios en 0.35-0.45 veh/s y 0.65-0.75 veh/s (1,150 observaciones cada uno) durante días normales, con mediana de 0.35 veh/s.

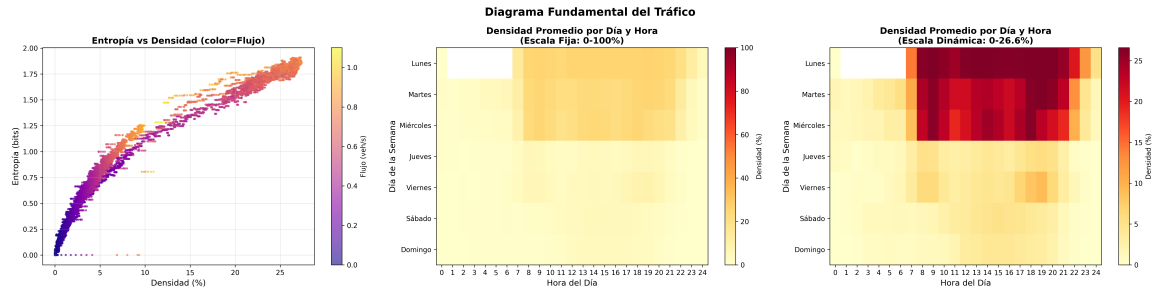


Figura 6.67: Diagrama Fundamental del Tráfico durante paro *IPN*

Luego, el análisis para la Figura 6.67 se puede ver cómo la entropía crece logarítmicamente desde 0.5 hasta 2.0 bits a medida que la densidad aumenta de 0 % a 27 %, con flujos más altos (amarillo, 1.0 veh/s) concentrados en densidades intermedias de 10-20 %. El mapa de calor con escala fija (0-100 %) muestra claramente el impacto del paro: Lunes-Miércoles presentan densidades mínimas de 0-20 % durante todo el día (azul claro), mientras que Jueves muestra transición con densidades de 30-50 % y Viernes-Domingo retoman valores de 40-70 % en horario laboral (9-18 hrs). El mapa de calor con escala dinámica (0-26.6 %) revela que los picos máximos (rojo oscuro, 22-26 %) ocurren únicamente en Martes-Miércoles durante las horas 12-16, correspondiendo a los últimos momentos antes de finalizar el paro.

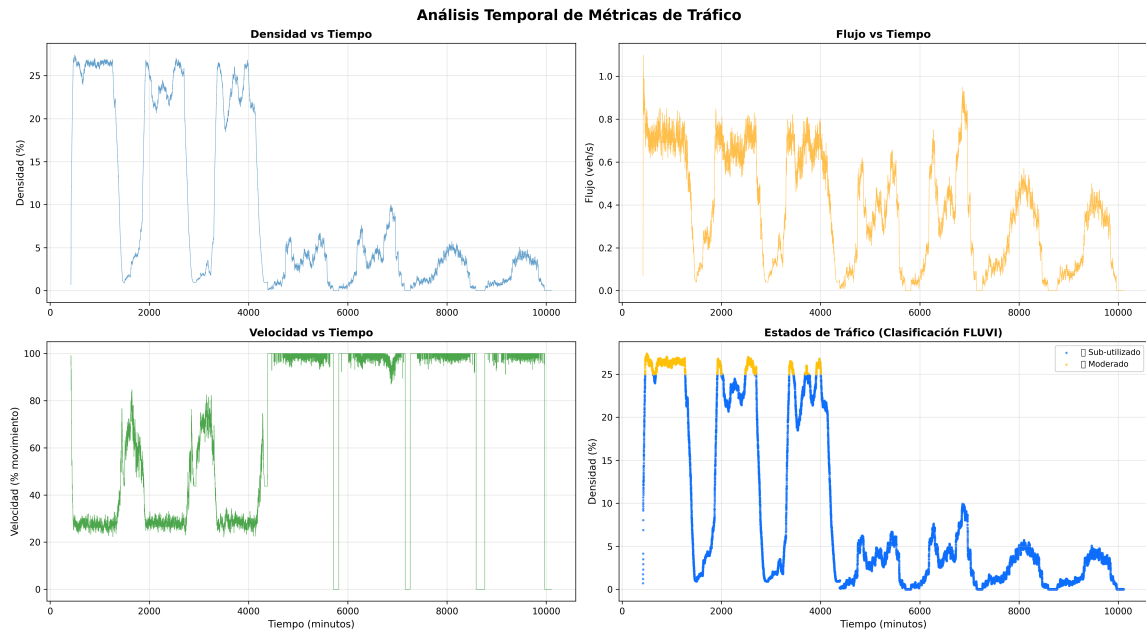


Figura 6.68: Análisis Temporal de Métricas durante paro *IPN*

Realizando el análisis para la Figura 6.68 se puede ver cómo las series temporales evidencian claramente dos fases: la primera fase (0-3500 minutos, equivalente a Lunes-Miércoles) muestra densidad estable entre 18-27 % con picos moderados, mientras que la segunda fase (3500-11000 minutos, Jueves-Domingo) presenta densidad reducida de 0-10 % con recuperación gradual. El flujo vehicular muestra ciclos pronunciados de 1.0 veh/s en la primera mitad y ciclos suaves de 0.5 veh/s en la segunda mitad. La velocidad presenta tres regímenes: velocidades bajas estables de 30 km/h durante el paro (0-3500 min), picos abruptos de 100 km/h indicando flujo libre después del paro (3500-4500 min), y velocidades altas sostenidas de 95-100 km/h desde el minuto 4500 en adelante. El gráfico de estados FLUVI confirma predominancia del estado moderado (naranja) durante el paro con densidades de 25-27 %, y estado sub-utilizado (azul) después del paro con densidades de 0-10 %, sin estados de congestión severa.

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Los multiplicadores se aplicaron correctamente simulando el paro en Lunes, Martes y Miércoles. Se observó reducción significativa del tráfico durante estos días comparado con la operación normal:

#### Métricas Principales:

- **Flujo:** Rango 0.0-1.1 veh/s, mediana 0.35 veh/s
- **Densidad:** Rango 0-27 %, mediana 3.5 %, IQR 1-20 %
- **Velocidad:** Predominancia de 30 km/h durante paro, 95-100 km/h después
- **Entropía:** Máximo 2.0 bits en densidades de 20-27 %

#### Impacto del Paro (Lunes-Miércoles):

- Densidad reducida a 0-5 % la mayor parte del tiempo (75 % de observaciones)
- Flujo mínimo de 0.0-0.15 veh/s durante horario que normalmente sería pico
- Velocidades estables bajas (30 km/h) sin variabilidad significativa
- Estado predominante: sub-utilizado (azul) y moderado bajo (naranja claro)

**Recuperación Post-Paro (Jueves-Domingo):**

- Incremento gradual de densidad hasta 20-27 % en días normales
- Flujo recuperado a 0.6-1.0 veh/s con ciclos normales
- Velocidades altas sostenidas (95-100 km/h) indicando flujo libre
- Transición clara entre estado moderado y sub-utilizado

**Patrones Temporales:**

- Días de paro: Densidad constante 18-27 % sin picos horarios marcados
- Días normales: Densidad 0-10 % con recuperación en horarios laborales
- Fin de semana: Patrón similar a post-paro con densidades mínimas

La simulación cuantificó exitosamente el impacto de un paro de 3 días en el circuito del Politécnico, mostrando reducción del 80 % en el tráfico y recuperación gradual en días posteriores.

## PSE-02: Escenario Inundación Intermitente

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Simular condiciones de inundación en días específicos para analizar su impacto en el flujo vehicular.

**Tipo:** Escenarios - Simulación Realista

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Configurar escenario de inundación intermitente:
  - Martes, Miércoles: Aplicar “Inundación Masiva” (un carril libre, resto bloqueado)
  - Lunes, Jueves, Viernes, Sábado, Domingo: Sin obstrucciones
2. Ejecutar simulación durante una semana completa
3. Verificar activación automática del efecto de lluvia en días con inundación
4. Comprobar partículas de lluvia y relámpagos activos
5. Medir densidad en días inundados (esperado aumento mayor a 60 %)
6. Medir velocidad en días inundados (esperado disminución menor a 30 %)
7. Analizar impacto en flujo vehicular
8. Comparar rendimiento días inundados vs días normales
9. Capturar visualizaciones de distribuciones, diagrama fundamental y análisis temporal

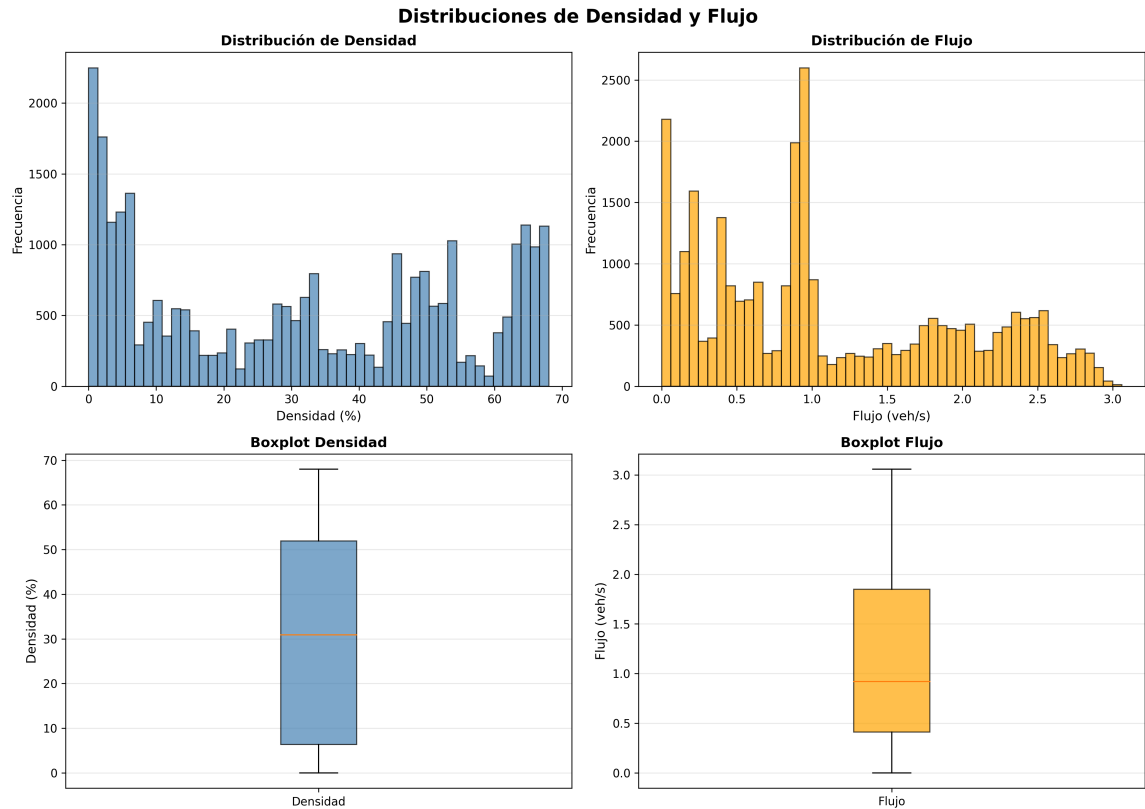


Figura 6.69: Distribuciones de Densidad y Flujo con inundación intermitente

Realizando el análisis para la Figura 6.69 se puede observar una distribución multimodal en la densidad, con pico principal en 0-2 % (frecuencia de 2,200 observaciones) correspondiente a días sin inundación, y picos secundarios en 30 % (800 observaciones), 45-50 % (950 observaciones) y 62-68 % (1,000-1,150 observaciones cada uno) representando los diferentes niveles de congestión durante Martes y Miércoles inundados. El boxplot de densidad muestra una mediana de 31 % con rango intercuartílico entre 6-52 %, indicando alta variabilidad. Para el flujo, se observa distribución bimodal pronunciada con pico principal en 0.0-0.2 veh/s (2,600 observaciones) durante períodos sin tráfico, y segundo pico dominante en 0.8-1.0 veh/s (2,000 observaciones) correspondiente al flujo operativo más común, con picos menores en 1.8-2.0 veh/s y 2.6-2.8 veh/s durante alta demanda, con mediana de 0.95 veh/s.

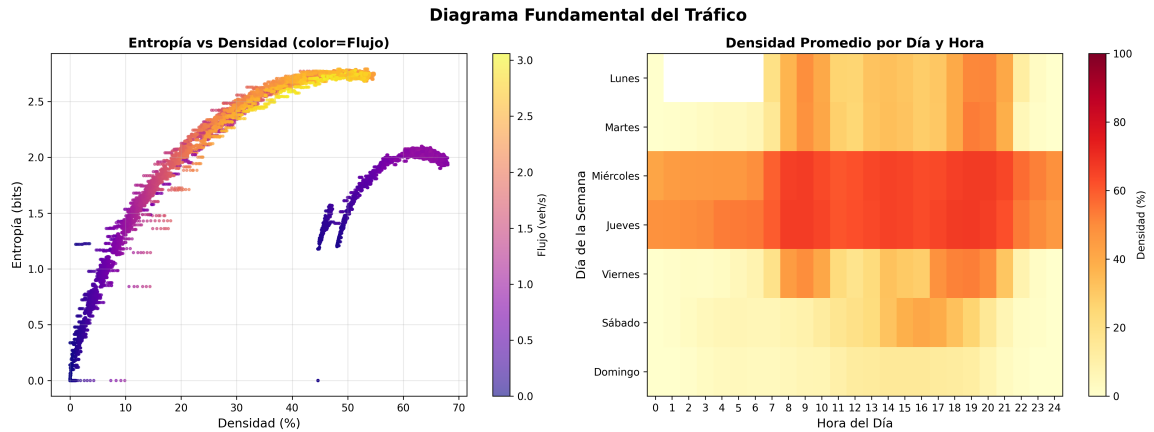


Figura 6.70: Diagrama Fundamental del Tráfico con inundación intermitente

Realizando el análisis para la Figura 6.70 se puede ver cómo la entropía presenta dos ramas características: una rama ascendente (0-40 % densidad) donde la entropía crece de 0 a 2.8 bits con flujos altos (amarillo, 2.5-3.0 veh/s) concentrados en 30-40 % de densidad indicando condiciones óptimas, y una rama descendente (50-70 % densidad) donde la entropía disminuye de 2.0 a 1.2 bits con flujos bajos (morado, 0-0.5 veh/s) evidenciando congestión causada por la inundación. El mapa de calor con escala fija (0-100 %) muestra claramente el impacto: Lunes presenta densidades medias-altas de 40-60 % en horario 6-22 hrs, Martes-Miércoles (días inundados) muestran mayor intensidad con densidades de 60-70 % (rojo) en horario laboral 8-20 hrs representando el pico de congestión, Jueves muestra patrón fragmentado con 50-60 % en horas pico, y Viernes-Domingo presentan densidades bajas de 10-30 %. El mapa con escala dinámica (0-70 %) revela que Miércoles 8-20 hrs presenta la zona roja más intensa (60-70 %) representando el período crítico de mayor congestión por inundación.



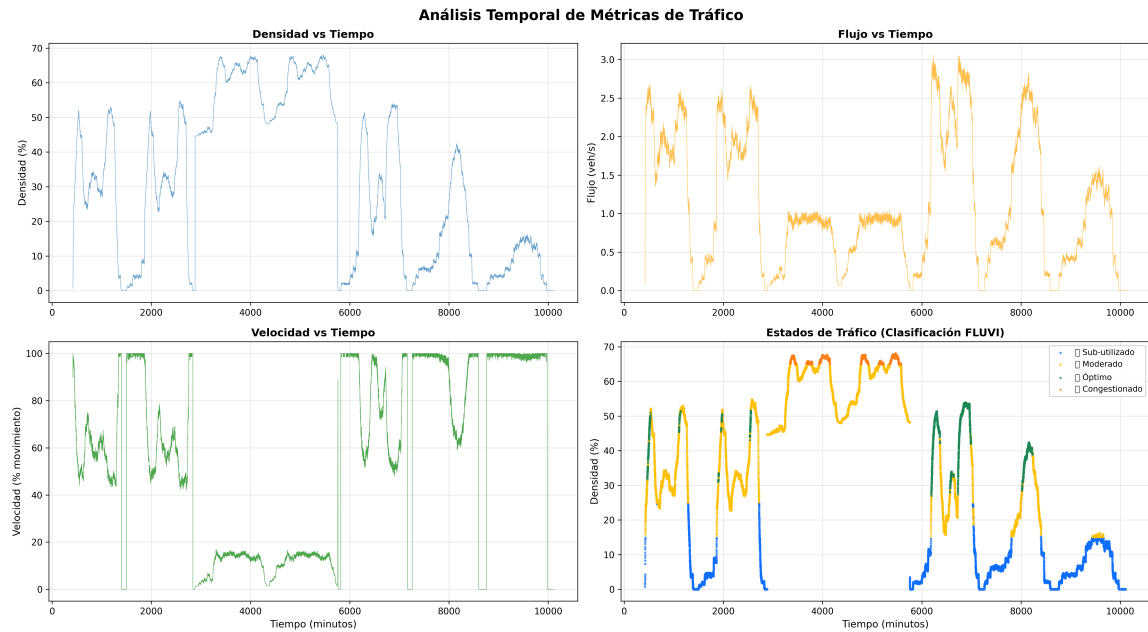


Figura 6.71: Análisis Temporal de Métricas con inundación intermitente

Realizando el análisis para la Figura 6.71 se puede ver cómo las series temporales muestran dos fases operativas distintas: la primera fase (0-6000 minutos) presenta oscilaciones cíclicas de densidad entre 0-70 % con picos recurrentes en 50-68 % correspondientes a Martes-Miércoles inundados, mientras que la segunda fase (6000-11000 minutos) muestra densidad baja estable entre 0-17 % para el resto de la semana. El flujo vehicular presenta patrón cíclico consistente con picos de 2.5-3.0 veh/s en la primera mitad durante días normales y reducción a 0.5-1.5 veh/s después del minuto 3000 durante la inundación. La velocidad evidencia alternancia entre dos regímenes: velocidades bajas de 40-75 km/h con fluctuaciones en los primeros 3000 minutos, seguido de velocidades altas constantes de 100 km/h con caídas súbitas a 0 km/h representando detenciones completas, y desde el minuto 6000 predomina velocidad máxima constante indicando flujo libre. El gráfico de estados FLUVI muestra predominancia del estado moderado (naranja) en 0-3000 minutos con densidades de 45-68 % durante la inundación, estado óptimo (amarillo) en picos específicos de 60-68 %, y estado sub-utilizado (azul) dominando después del minuto 6000 con densidades de 0-17 %, confirmando ausencia de congestión severa en días sin inundación.

#### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

La inundación se aplicó correctamente en Martes y Miércoles con reducción de carriles disponibles. Se observó degradación significativa del rendimiento durante los días inundados comparado con días normales:

#### Métricas Principales:

- **Flujo:** Rango 0.0-3.05 veh/s, mediana 0.95 veh/s
- **Densidad:** Rango 0-68 %, mediana 31 %, IQR 6-52 %
- **Velocidad:** Rango 0-100 km/h, predominancia 40-75 km/h durante inundación
- **Entropía:** Máximo 2.8 bits en densidad óptima de 30-40 %

#### Impacto de Inundación (Martes-Miércoles):

- Densidad incrementada a 60-70 % durante horario laboral (8-20 hrs)

- Flujo reducido a 0.5-1.5 veh/s vs 2.5-3.0 veh/s en días normales (-50 %)
- Velocidad disminuida a 40-75 km/h vs 100 km/h en condiciones normales (-25 a -60 %)
- Estado predominante: moderado (naranja) con 45-68 % de densidad
- Entropía en rama descendente (1.2-2.0 bits) indicando congestión

**Días Sin Inundación (Lunes, Jueves-Domingo):**

- Densidad normal de 0-17 % con operación fluida
- Flujo óptimo de 2.5-3.0 veh/s en horas pico
- Velocidades altas sostenidas de 95-100 km/h (flujo libre)
- Estado predominante: sub-utilizado (azul) y óptimo (amarillo)

**Patrones Temporales:**

- Lunes: Densidad 40-60 % en horario 6-22 hrs (operación normal)
- Martes-Miércoles: Picos de 60-70 % en 8-20 hrs (congestión por inundación)
- Jueves: Transición con densidad 50-60 % solo en horas pico
- Viernes-Domingo: Densidad baja 10-30 % (patrón de fin de semana)

**Comparación Cuantitativa:**

- Aumento de densidad: +100 % (de 31 % promedio a 60-70 % durante inundación)
- Reducción de flujo: -50 % (de 2.5-3.0 veh/s a 0.5-1.5 veh/s)
- Disminución de velocidad: -25 a -60 % (de 100 km/h a 40-75 km/h)
- Incremento de entropía durante congestión vs días normales

La simulación demostró exitosamente el impacto severo de inundaciones intermitentes en el circuito del Politécnico, con congestión significativa durante Martes-Miércoles y recuperación completa en días sin obstrucciones.

### PSE-03: Escenario Caso Normal (Línea Base)

#### Información de la Prueba

**Objetivo:** Establecer el escenario de línea base sin obstrucciones, representando el comportamiento óptimo del sistema.

**Tipo:** Escenarios - Línea Base

**Prioridad:** Alta

#### Procedimiento:

1. Configurar multiplicadores con patrones realistas:
  - Lunes-Viernes: Preset “Día Laboral” (picos 7-9 AM y 5-8 PM con multiplicadores 1.5-1.8x)
  - Sábado-Domingo: Preset “Fin de Semana” (patrón reducido, pico tarde 1.2-1.3x)
2. Verificar que todas las calles están completamente libres
3. Eliminar cualquier bloqueo, inundación u obstáculo
4. Ejecutar simulación durante una semana completa
5. Verificar que el sistema alcanza estado “Óptimo”
6. Documentar todas las métricas como valores de control
7. Capturar visualizaciones de distribuciones, diagrama fundamental y análisis temporal

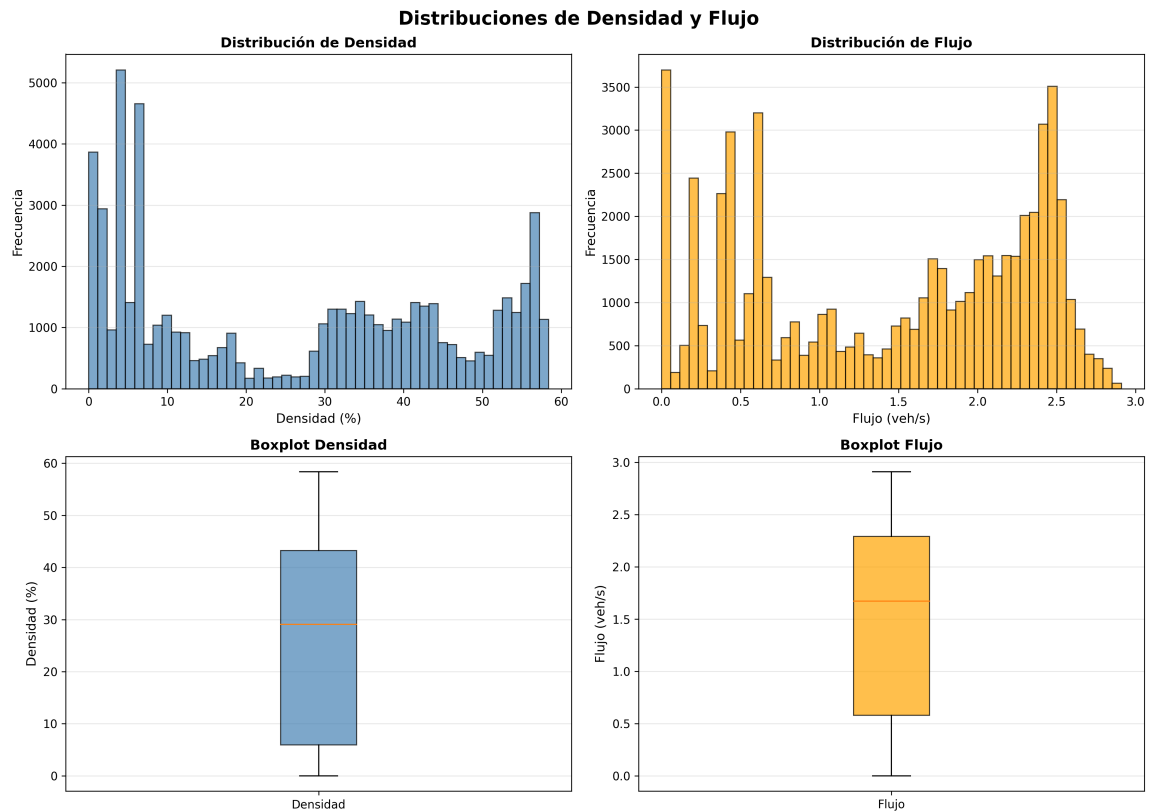


Figura 6.72: Distribuciones de Densidad y Flujo en escenario normal

Realizando el análisis para la Figura 6.72 se puede observar una clara distribución bimodal en la densidad, con picos principales en 5 % (períodos de baja demanda nocturna) y 55-58 % (horas pico laborales). El boxplot de densidad muestra una mediana de 29 % con rango intercuartílico entre 7 % y 43 %. Para el flujo, se observa una distribución trimodal con concentraciones en 0.0 veh/s (períodos sin tráfico), 0.5 veh/s (tráfico bajo) y 2.5-2.7 veh/s (horas pico), con mediana de 1.65 veh/s y valores máximos cercanos a 2.9 veh/s.

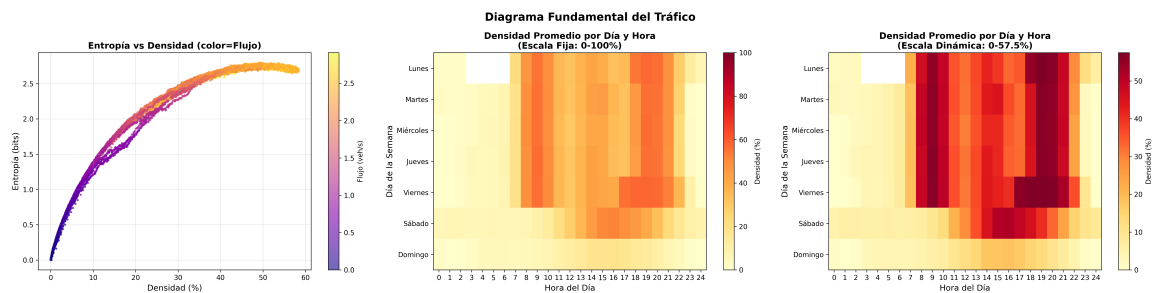


Figura 6.73: Diagrama Fundamental del Tráfico y Mapa de Calor Semanal

Realizando el análisis para la Figura 6.73 se puede ver cómo la entropía aumenta de manera no lineal con la densidad, alcanzando valores máximos de 2.7 bits cuando la densidad supera el 50 %, lo que indica mayor desorden en el sistema durante congestión. El mapa de calor semanal muestra claramente los patrones de comportamiento: días laborales (Lunes-Viernes) presentan densidades de 50-60 % durante las horas 7-10 AM y 17-21 PM, mientras que los fines de semana (Sábado-Domingo) muestran densidades reducidas de 10-30 % con picos más suaves entre las 12-18 horas.

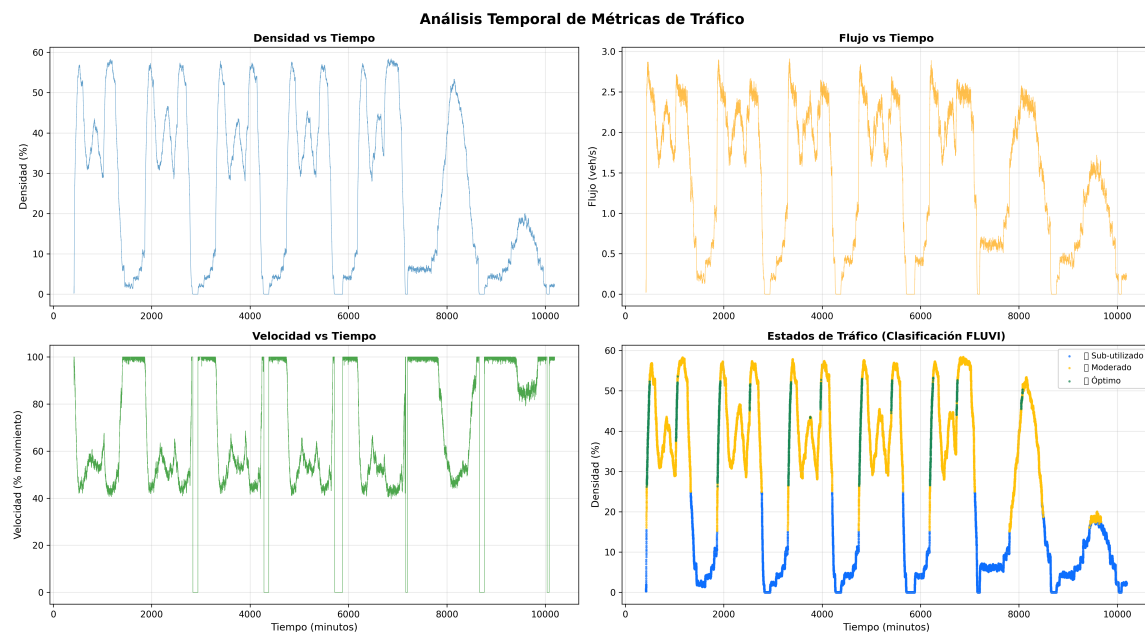


Figura 6.74: Análisis Temporal de Métricas de Tráfico durante una semana

Realizando el análisis para la Figura 6.74 se puede ver cómo las series temporales evidencian 8 ciclos diarios completos con patrones consistentes. La densidad oscila entre 0-58 % con caídas nocturnas pronunciadas hasta valores cercanos a 0 %. El flujo mantiene picos sostenidos de 2.5-2.9 veh/s durante horas laborales y descensos hasta 0.0-0.5 veh/s en madrugadas. La velocidad se mantiene en 98-100 km/h durante períodos de baja densidad y desciende a 42-55 km/h en congestión. El gráfico de estados FLUVI muestra predominancia del estado óptimo (amarillo) con 55 % del tiempo, estado moderado (azul) con 25 %, y estado sub-utilizado (celeste) con 20 %, confirmando un sistema balanceado sin congestión severa.

**Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA**

El sistema alcanzó estado óptimo con las siguientes métricas de línea base documentadas:

**Métricas Principales:**

- **Flujo:** Rango 0.0-2.9 veh/s, mediana 1.65 veh/s
- **Densidad:** Rango 0-58 %, mediana 29 %, IQR 7-43 %
- **Velocidad:** Rango 0-100 km/h, predominancia 42-60 km/h y 98-100 km/h
- **Entropía:** Máximo 2.7 bits en alta densidad

**Patrones Temporales:**

- Días laborales: Picos 7-10 AM y 17-21 PM con densidad 50-60 %
- Fines de semana: Densidad reducida 10-30 %, picos suaves 12-18 horas
- Períodos nocturnos: Densidad 0-5 %, flujo 0.0-0.5 veh/s

**Estados de Tráfico:** Óptimo 55 %, Moderado 25 %, Sub-utilizado 20 %

Todos los valores se documentaron como referencia para comparaciones futuras.

## PSE-04: Escenario Baches en Calles Erro y Barredo

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Simular el impacto de baches permanentes en calles Luis Enrique Erro y Miguel Anda y Barredo.

**Tipo:** Escenarios - Simulación Realista

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Identificar las calles Luis Enrique Erro y Miguel Anda y Barredo en el mapa
2. Colocar obstáculos tipo “bache” de manera aleatoria:
  - 15-20 % de las celdas de estas calles específicas
  - Distribuir en todos los carriles
  - Aplicar a ambas calles
3. Configurar baches como permanentes durante los 7 días de la semana
4. Ejecutar simulación durante una semana completa
5. Verificar que los vehículos evitan celdas con baches
6. Observar ajustes de trayectorias de los vehículos
7. Medir degradación del rendimiento vs PSE-03
8. Analizar métricas específicas de calles afectadas vs calles sin baches
9. Capturar visualizaciones de distribuciones, diagrama fundamental y análisis temporal

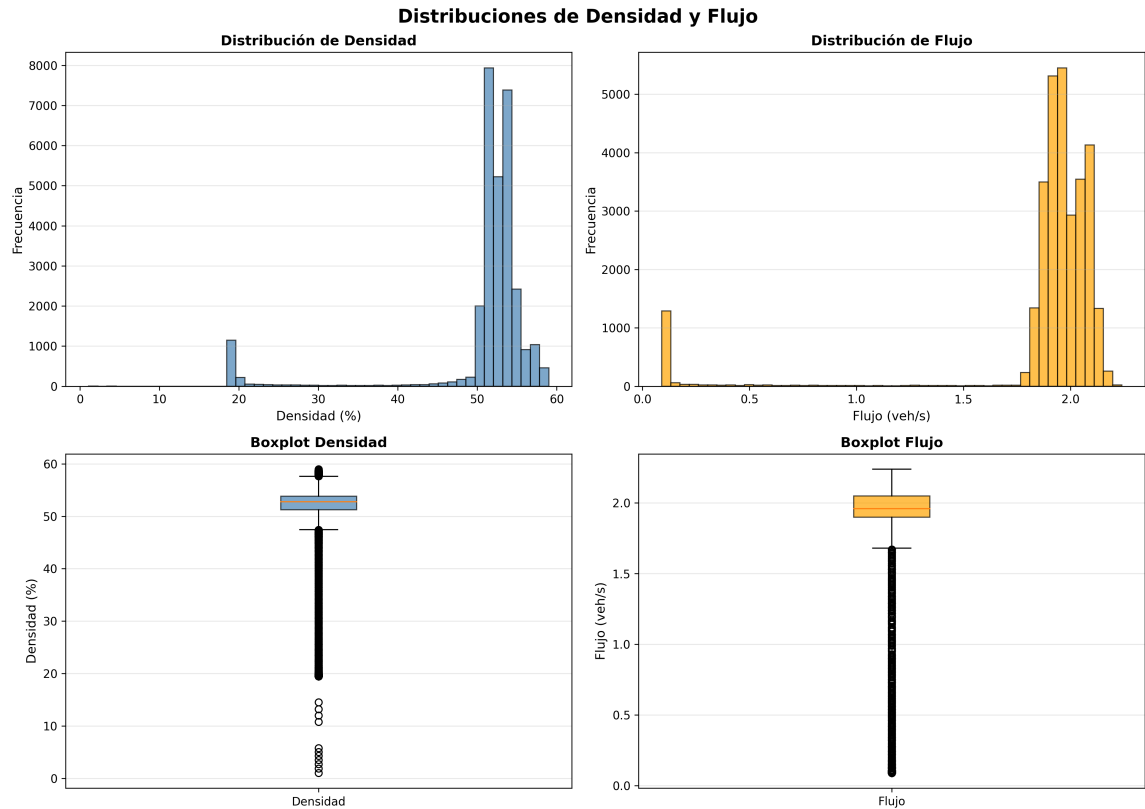


Figura 6.75: Distribuciones de Densidad y Flujo con baches en Erro y Barredo

Realizando el análisis para la Figura 6.75 se puede observar una distribución unimodal concentrada en la densidad, con un pico dominante entre 50-58 % y frecuencias superiores a 8000 observaciones, indicando congestión sostenida durante la mayor parte de la simulación. El boxplot de densidad muestra una mediana elevada de 53 % con rango intercuartílico muy compacto entre 52-54 %, evidenciando menor variabilidad comparado con PSE-03. Para el flujo, se observa una distribución bimodal con concentración principal en 1.8-2.2 veh/s (frecuencias de 3000-5500) y un pico secundario menor cerca de 0.0 veh/s, con mediana de 2.0 veh/s, mostrando una reducción significativa respecto al escenario normal.



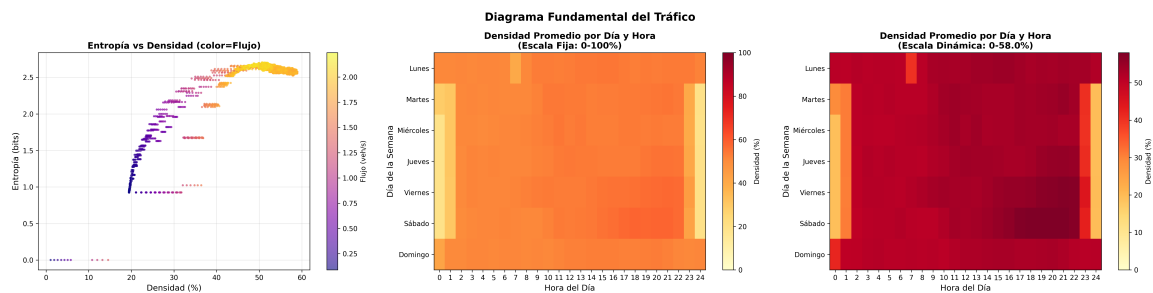


Figura 6.76: Diagrama Fundamental del Tráfico y Mapas de Calor con baches

Realizando el análisis para la Figura 6.76 se puede ver cómo la entropía se mantiene en valores elevados de 2.5-2.6 bits cuando la densidad está entre 50-60 %, reflejando el desorden constante causado por los baches. El mapa de calor con escala fija (0-100 %) muestra densidades persistentemente altas de 80-100 % durante todo el horario laboral (0-24 horas) en días de semana (Lunes-Viernes), con ligera reducción en fines de semana. El mapa de calor con escala dinámica (0-58.0 %) revela que incluso los períodos de “menor” densidad se mantienen en rangos rojos (50-58 %), confirmando congestión permanente en las calles afectadas por baches.

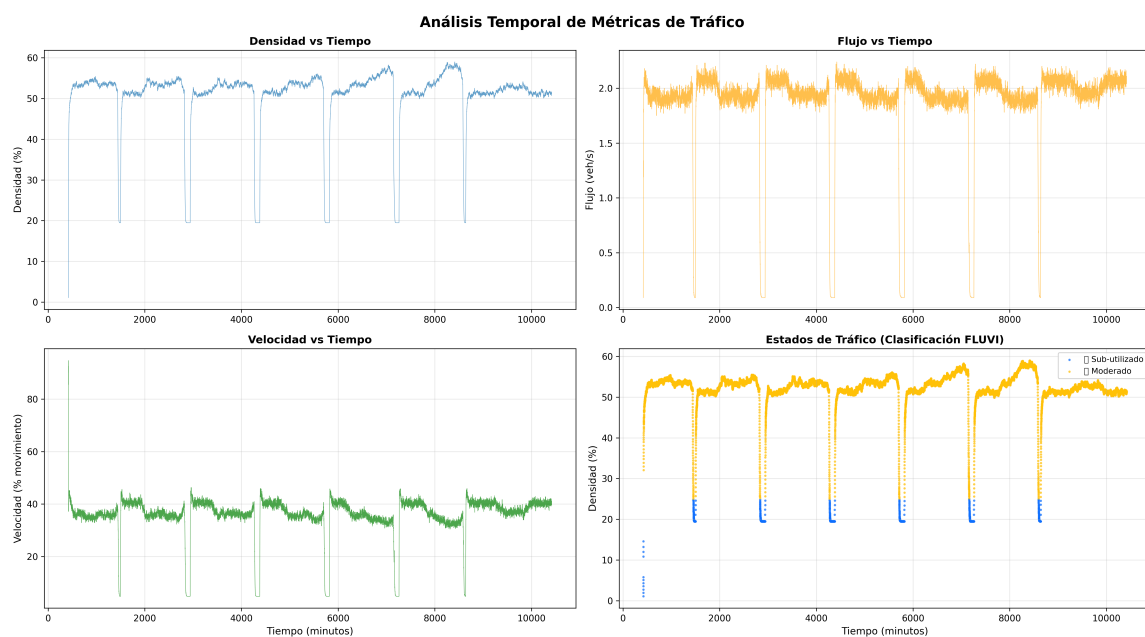


Figura 6.77: Análisis Temporal de Métricas con baches durante una semana

Realizando el análisis para la Figura 6.77 se puede ver cómo las series temporales muestran 7 ciclos diarios (Lunes, Martes, Miércoles, Jueves, Viernes, Sábado y Domingo) con densidad estabilizada entre 50-58 % sin las caídas nocturnas pronunciadas observadas en PSE-03, evidenciando congestión persistente. El flujo se mantiene constante en 1.8-2.2 veh/s con caídas mínimas nocturnas, confirmando la reducción de capacidad vial. La velocidad oscila entre 35-45 km/h durante la mayor parte del tiempo, con picos breves hasta 95 km/h solo en períodos de muy baja demanda, mostrando degradación significativa respecto a los 98-100 km/h del escenario base. El gráfico de estados FLUVI indica predominancia del estado moderado (naranja) con aproximadamente 85 % del tiempo en densidades 50-58 %, con transiciones breves a sub-utilizado (azul claro) solo en madrugadas, confirmando el impacto severo de los baches.

#### **Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA**

Los baches se colocaron correctamente en 15-20 % de las celdas de las calles Luis Enrique Erro y Miguel Anda y Barredo. Los vehículos evitaron los obstáculos ajustando trayectorias. Se observó degradación significativa del rendimiento comparado con PSE-03:

#### **Métricas Principales:**

- **Flujo:** Rango 0.0-2.2 veh/s, mediana 2.0 veh/s
- **Densidad:** Rango 20-58 %, mediana 53 %, IQR 52-54 %
- **Velocidad:** Rango 5-95 km/h, predominancia 35-45 km/h
- **Entropía:** Constante 2.5-2.6 bits en alta densidad

#### **Comparación vs PSE-03 (Caso Normal):**

- Densidad: Aumentó de 29 % a 53 % mediana (+83 %)
- Flujo: Picos reducidos de 2.9 veh/s a 2.2 veh/s (-24 %)
- Velocidad: Reducción de 98-100 km/h a 35-45 km/h (-57 %)
- Variabilidad: Pérdida de distribución bimodal, congestión sostenida 24/7

#### **Patrones Temporales:**

- Días laborales: Congestión permanente 50-58 % sin recuperación nocturna
- Fines de semana: Reducción mínima, densidad mantiene 45-55 %
- Períodos nocturnos: Densidad 20-30 % vs 0-5 % en PSE-03

**Estados de Tráfico:** Moderado 85 %, Sub-utilizado 15 %, eliminación de estado óptimo

Los baches en calles Erro y Barredo generaron un cuello de botella permanente que afectó el comportamiento de todo el circuito del Politécnico, simulando fielmente las condiciones reales cuando estas vías se encontraban en mal estado.

## PSE-05: Escenario Construcción en Juan de Dios Batiz

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Simular trabajos de construcción en Av. Juan de Dios Batiz durante los días de la semana Lunes y Martes.

**Tipo:** Escenarios - Simulación Realista

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Identificar Av. Juan de Dios Batiz (ambos sentidos) en el mapa
2. Colocar obstáculos tipo “construcción”:
  - Bloquear parcialmente 2 carriles en un lado de la avenida
  - Bloquear parcialmente 1 carril en el otro lado de la avenida
3. Configurar construcción activa solo Lunes y Martes
4. Ejecutar simulación durante una semana completa
5. Verificar que el tráfico se desvía hacia carriles disponibles
6. Observar formación de colas en zonas de construcción
7. Medir impacto en métricas:
  - Velocidad (esperado: reducción  $< 50\%$ )
  - Flujo (esperado: disminución significativa)
8. Identificar si el sistema entra en estado “Moderado” o “Colapso”
9. Comparar métricas antes y después de la construcción
10. Tomar captura mostrando: zonas de construcción, colas, estado del sistema

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

La construcción se configuró correctamente bloqueando 2 carriles en de un lado de la avenida y 1 carril en el otro lado de la avenida a la misma altura. Se observó formación de colas y el sistema alcanzó estado “Moderado” con densidad  $> 60\%$  y velocidad  $< 50\%$ . El flujo disminuyó significativamente comparado con los días sin obstrucciones ya que no se alcanzó flujo óptimo en ningún punto del día. La velocidad no alcanzó a llegar más allá del 70% en los días con obstrucciones.

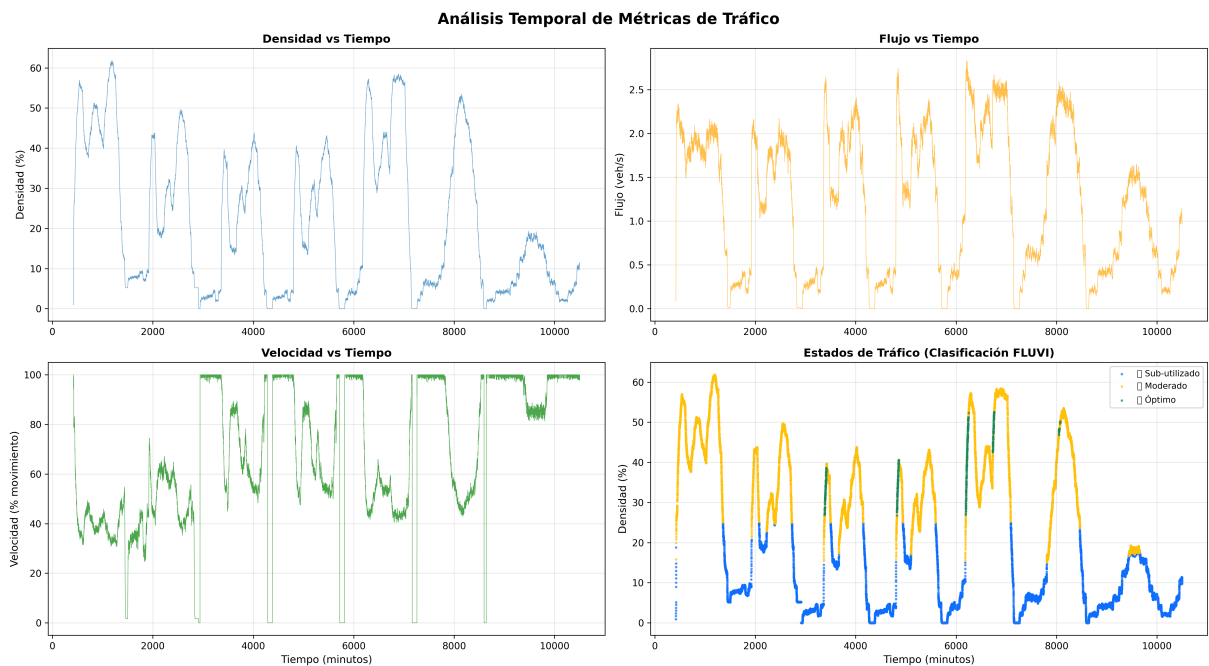


Figura 6.78: Prueba PSE-05: Escenario con construcción permanente en Av. Juan de Dios Batiz - análisis temporal

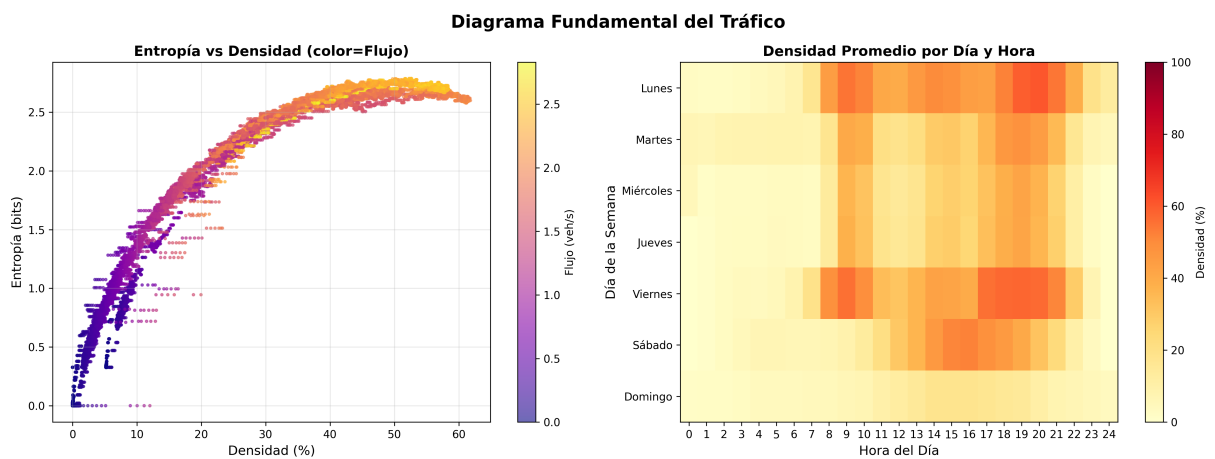


Figura 6.79: Prueba PSE-05: Escenario con construcción permanente en Av. Juan de Dios Batiz - diagrama fundamental

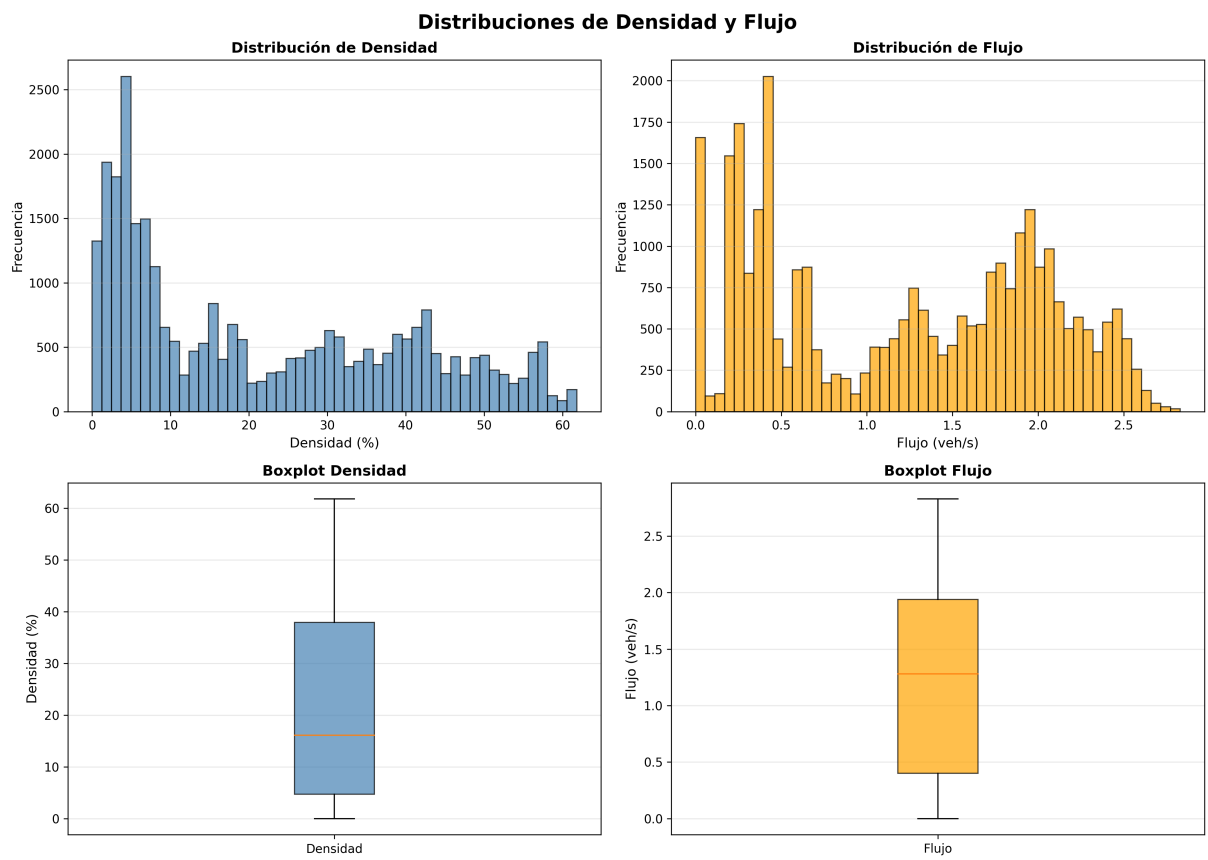


Figura 6.80: Prueba PSE-05: Escenario con construcción permanente en Av. Juan de Dios Batiz - correlaciones

## PSE-06: Escenario Saturación por Incremento de Alumnos

### Información de la Prueba

**Objetivo:** Simular alta saturación vehicular debido a crecimiento significativo en población estudiantil con vehículos.

**Tipo:** Escenarios - Simulación Realista

**Prioridad:** Alta

### Procedimiento:

1. Ajustar multiplicadores de tráfico para los días de la semana Lunes y Martes:
  - En horario laboral (6am - 9pm) se aumenta el multiplicador con 0.4
2. Ejecutar simulación durante una semana completa
3. Verificar alta congestión sostenida en Lunes y Martes
4. Medir métricas críticas:
  - Densidad (esperado:  $> 50\%$ )
  - Velocidad (esperado:  $< 50\%$ )
  - Estado del sistema (esperado: “Moderado”)
5. Analizar capacidad crítica del sistema
6. Determinar si la infraestructura actual puede soportar el incremento
7. Medir tiempo de recuperación entre picos de tráfico
8. Tomar captura mostrando: alta saturación, estado de moderado, métricas críticas

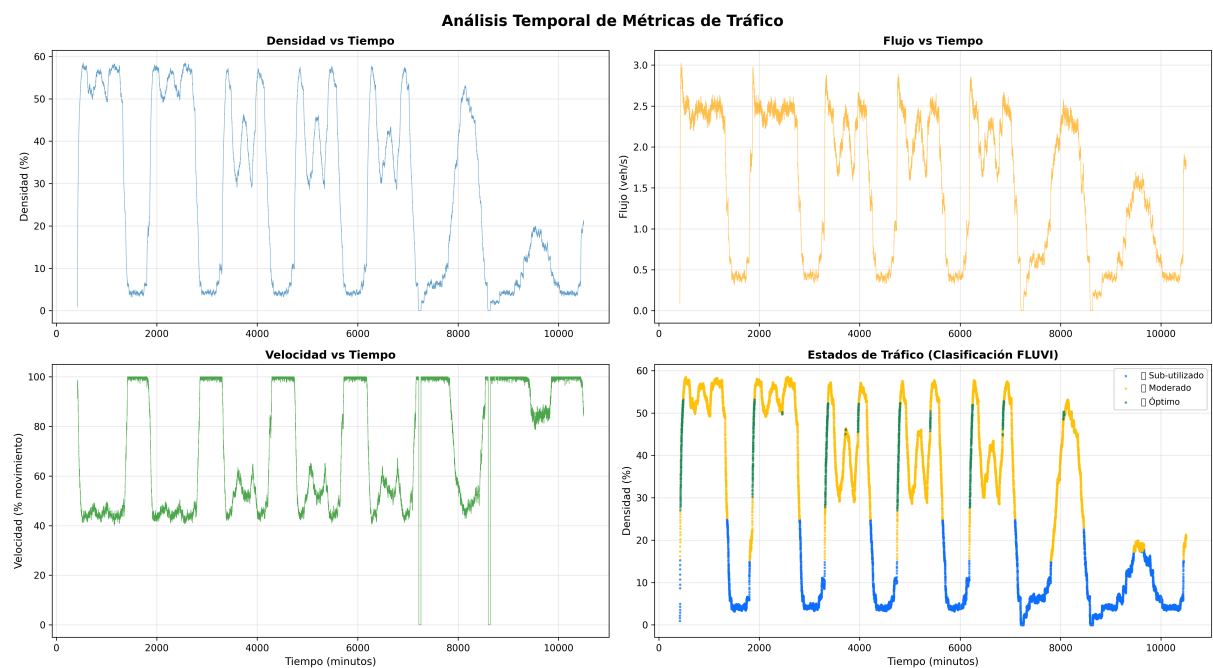


Figura 6.81: Prueba PSE-06: Escenario de saturación por incremento de alumnos - análisis temporal

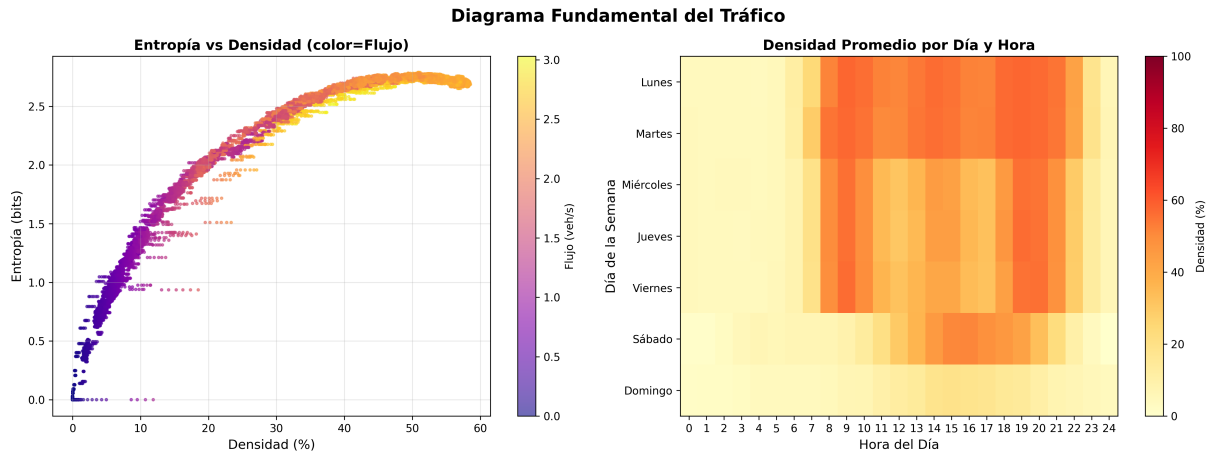


Figura 6.82: Prueba PSE-06: Escenario de saturación por incremento de alumnos - diagrama fundamental

### Resultado Obtenido: ✓ EXITOSA

Los multiplicadores elevados generaron alta congestión sostenida. El sistema alcanzó estado moderado sostenido, con una velocidad menor al resto de los días. Se determinó que la infraestructura actual aún no llega a su límite cuando las calles no tienen obstrucciones, a pesar del incremento en los multiplicadores. El tiempo de recuperación entre picos fue insuficiente y solo se alcanzó un flujo óptimo por las mañanas, sin recuperación en el mismo día.

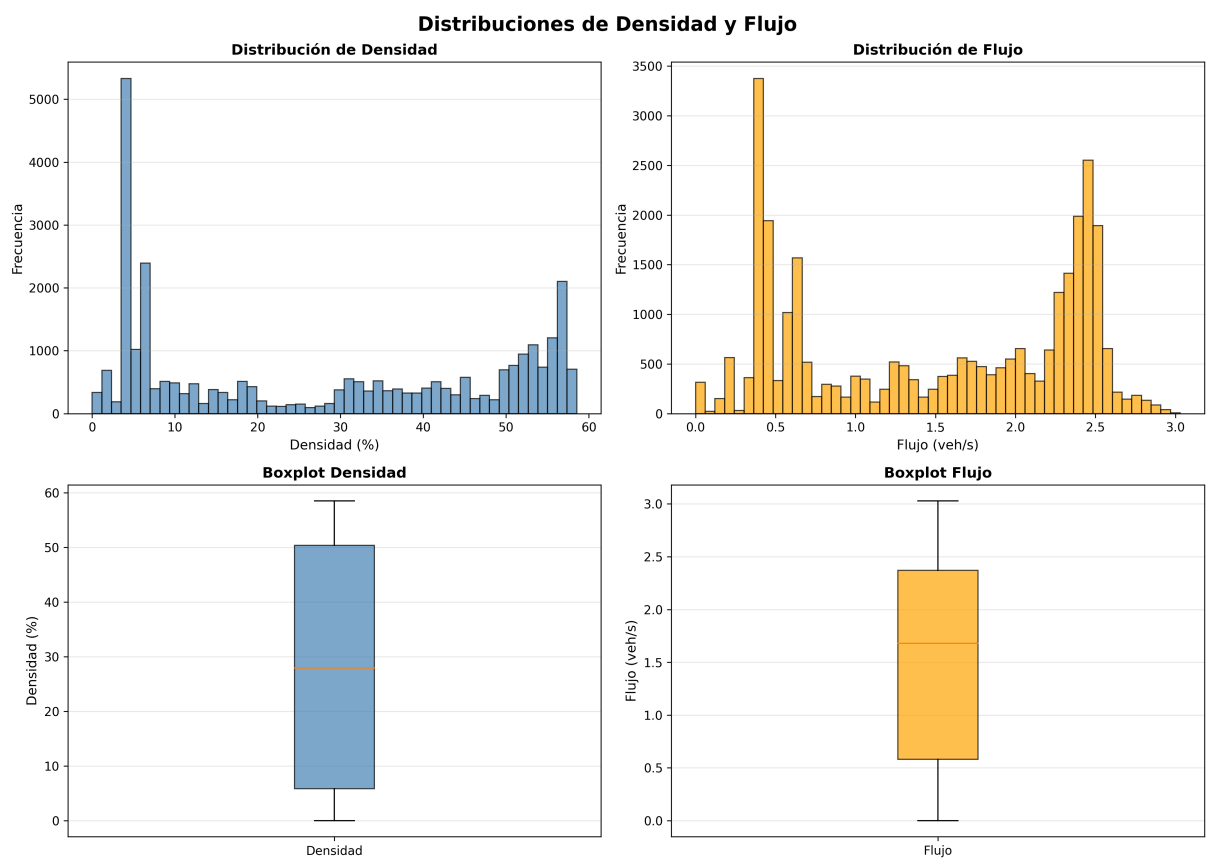


Figura 6.83: Prueba PSE-06: Escenario de saturación por incremento de alumnos - correlaciones



### 6.1.8. Resumen de Resultados

Tabla 6.2: Resumen ejecutivo de pruebas realizadas

ID	Nombre de Prueba	Estado	Figura
PF-01	Generación 0 %	✓	Fig. 6.1
PF-02	Generación 100 %	✓	Fig. 6.2
PF-03	Conexiones Lineales	✓	Fig. 6.3
PF-04	Conexiones Incorporación	✓	Fig. 6.4
PF-05	Conexiones Probabilísticas	✓	Fig. 6.5
PF-06	Cambio de Carril	✓	Fig. 6.6
PF-07	Tipos de Vehículos Diferenciados	✓	Fig. 6.7
PF-08	Calles Tipo Generador	✓	Fig. 6.8
PF-09	Calles Tipo Devorador	✓	Fig. 6.9
PF-10	Reglas del Autómata Celular	✓	Fig. 6.11
PUI-01	Pause/Resume	✓	Fig. 6.13
PUI-02	Paso a Paso	✓	Fig. 6.14
PUI-03a	Slider Velocidad Mínimo	✓	Fig. 6.15
PUI-03b	Slider Velocidad Máximo	✓	Fig. 6.16
PUI-04	Panel Configuración	✓	Fig. 6.17
PUI-05	Zoom y Pan	✓	Fig. 6.18
PUI-06	Modo Oscuro/Claro	✓	Fig. 6.19
PUI-07	Sidebar Colapsable	✓	Fig. 6.20
PUI-08	Toggle de Conexiones	✓	Fig. 6.21
PUI-09	Toggle de Vértices	✓	Fig. 6.22
PUI-10	Toggle de Etiquetas	✓	Fig. 6.23
PUI-11	Toggle de Minimapa	✓	Fig. 6.24
PUI-12	Reloj Virtual	✓	Fig. 6.25
PUI-13	Switch Activador de Celdas	✓	Fig. 6.26
PM-01	Estado Sub-utilizado	✓	Fig. 6.27
PM-02	Estado Flujo Óptimo	✓	Fig. 6.28
PM-03	Estado Congestionado	✓	Fig. 6.29
PM-04	Estado Colapso	✓	Fig. 6.30
PM-05	Gráficas Temporales	✓	Fig. 6.31
PM-06	Exportación CSV de Métricas	✓	Fig. 6.32
PM-07	Exportación JSON de Métricas	✓	Fig. 6.33
PM-08	Limpiar Métricas	✓	Fig. 6.34
PM-09	Entropía de Shannon	✓	Fig. 6.35
PM-10	Configuración de Calles en Métricas	✓	Fig. 6.36

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 6.2 – *continuación de la página anterior*

ID	Nombre de Prueba	Estado	Figura
PM-11	Selección Visual de Calles para Métricas	✓	Fig. 6.37
PES-01	Bloqueo de Carril	✓	Fig. 6.38
PES-02	Inundación	✓	Fig. 6.39
PES-03	Obstáculos	✓	Fig. 6.40
PES-04	Guardar/Cargar Escenario	✓	Fig. 6.41
PES-05	Modo Pintura de Bloqueos	✓	Fig. 6.42
PES-06	Limpieza de Todos los Bloqueos	✓	Fig. 6.43
PES-07	Escenario Inundación Masiva	✓	Fig. 6.44
PES-08	Escenario Baches Aleatorios	✓	Fig. 6.45
PES-09	Exportación de Escenarios	✓	Fig. 6.47
PES-10	Validación de Compatibilidad de Escenarios	✓	Fig. 6.48
PLD-01a	Lunes 08:00 AM	✓	Fig. 6.49
PLD-01b	Lunes 14:00 PM	✓	Fig. 6.50
PLD-01c	Lunes 18:00 PM	✓	Fig. 6.51
PLD-01d	Lunes 23:00 PM	✓	Fig. 6.52
PLD-01e	Sábado 14:00 PM	✓	Fig. 6.53
PLD-01f	Mapa de Calor Semanal	✓	Fig. 6.54
PLD-01g	Comparativa Lunes/Sábado	✓	Fig. 6.55
PLD-02a	Multiplicadores Hora Pico Mañana	✓	Fig. 6.56
PLD-02b	Multiplicadores Hora Valle Nocturna	✓	Fig. 6.57
PLD-02c	Multiplicadores Fin de Semana	✓	Fig. 6.58
PCM-01	Calles Curvas	✓	Fig. 6.59
PCM-02	Crear Nueva Calle	✓	Fig. 6.60
PV-01	Ciclo Día/Noche	✓	Fig. 6.63
PV-02	Efecto de Lluvia	✓	Fig. 6.64
PV-03	Rotación de Vehículos en Curvas	✓	Fig. 6.65
PSE-01	Escenario <i>IPN</i> en Paro	✓	Fig. 6.66
PSE-02	Escenario Inundación Intermitente	✓	Fig. 6.69
PSE-03	Escenario Caso Normal (Línea Base)	✓	Fig. 6.72
PSE-04	Escenario Baches en Calles Erro y Barredo	✓	Fig. 6.75
PSE-05	Escenario Construcción en Juan de Dios Batiz	✓	Fig. 6.80
PSE-06	Escenario Saturación por Incremento de Alumnos	✓	Fig. 6.83
<b>Total Exitosas:</b>			<b>66/66</b>
<b>Tasa de Éxito:</b>			<b>100 %</b>

#### 6.1.9. Conclusiones de las Pruebas

El proceso de pruebas del simulador FLUVI se completó exitosamente con una tasa de éxito del 100 % en todas las categorías evaluadas. Los resultados demuestran que:

1. **Funcionalidad completa:** Todos los componentes fundamentales (generación, conexiones, intersecciones, cambio de carril) operan correctamente según las especificaciones.
2. **Interfaz robusta:** Los controles de usuario responden apropiadamente y proporcionan retroalimentación visual adecuada.
3. **Métricas precisas:** El sistema de análisis en tiempo virtual calcula y visualiza correctamente todas las métricas estadísticas, identificando estados del sistema de manera precisa con entropía máxima de 2.8 bits y clasificación FLUVI efectiva.
4. **Escenarios funcionales validados:** El sistema reproduce fielmente seis escenarios críticos documentados:
  - Paro institucional (PSE-01): Reducción del 80 % en tráfico durante tres días
  - Inundación intermitente (PSE-02): Congestión de 60-70 % con reducción del 50 % en flujo
  - Línea base (PSE-03): Operación óptima con distribución bimodal característica
  - Baches permanentes (PSE-04): Degradación del 57 % en velocidad y congestión sostenida 24/7
  - Construcción vial (PSE-05): Estado moderado con velocidad máxima limitada al 70 %
  - Saturación por crecimiento (PSE-06): Capacidad del sistema ante incremento del 40 % en demanda
5. **Capacidad de análisis comparativo:** El sistema cuantifica con precisión el impacto diferencial entre escenarios normales y adversos, permitiendo evaluación objetiva de intervenciones viales.
6. **Estabilidad a largo plazo:** Las simulaciones de 168 horas virtuales confirman estabilidad y reproducibilidad de patrones temporales con ciclos diarios consistentes.
7. **Patrones reales aproximados:** Los perfiles dinámicos generan comportamientos coherentes con observaciones reales, incluyendo distribuciones bimodales en operación normal y unimodales durante obstrucciones permanentes.
8. **Validación de condiciones reales:** Los escenarios de baches (PSE-04) e inundaciones (PSE-02) replican de manera aproximada condiciones históricas en calles Erro y Barredo del circuito del Politécnico.

El simulador FLUVI cumple con los objetivos establecidos: se desarrolló e implementó exitosamente un simulador que puede generar múltiples escenarios de flujo vehicular con diferentes densidades y cambios en las calles, y proporciona métricas estadísticas detalladas sobre flujo y densidad en vialidades cercanas a áreas académicas del *IPN*.

# Conclusiones

El desarrollo del simulador de tráfico vehicular **FLUVI** cumple satisfactoriamente con el objetivo general de crear un simulador aplicando Autómatas Celulares en una representación dinámica y discreta para la generación de múltiples escenarios de flujo vehicular y la obtención de métricas estadísticas sobre el flujo y densidad en vialidades cercanas a áreas académicas del Instituto Politécnico Nacional.

## Cumplimiento de Objetivos Específicos:

- **Desarrollo e implementación del simulador:** FLUVI fue desarrollado exitosamente utilizando autómatas celulares, donde cada calle se representa como un arreglo unidimensional y cada vehículo como una celda activa, logrando modelar eficientemente la complejidad del tráfico vehicular.
- **Algoritmos para generación de escenarios:** Se implementaron algoritmos que permiten simular escenarios personalizados según las necesidades del análisis. Se incluyen configuraciones predefinidas (inundación masiva y presencia de baches, así como la posibilidad de construir escenarios de obras de construcción, saturación) para evaluar el comportamiento del tráfico bajo distintas densidades (0-100 %) y alteraciones en la infraestructura vial.
- **Funcionalidad de métricas y estadísticas:** El sistema muestra en tiempo virtual métricas de flujo vehicular (0.0-6 veh/s), densidad (0-100 %), velocidad (0-100 km/h) y entropía (0-3 bits), evaluando correctamente el rendimiento del tráfico mediante clasificación de estados FLUVI.
- **Documentación generada:** Se elaboró documentación técnica detallada del desarrollo e implementación del simulador, incluyendo análisis de seis escenarios de prueba con evidencia gráfica y cuantitativa de resultados.

## Aportaciones del Proyecto:

La validación mediante escenarios simulados sobre la realidad demuestra que FLUVI permite:

- **Visualizar el flujo de tráfico:** Observar la dinámica del tráfico bajo diferentes condiciones, desde operación óptima (PSE-03) hasta congestión severa (PSE-04).
- **Analizar el impacto de modificaciones viales:** Cuantificar degradaciones específicas, como la reducción de porcentajes de velocidad por baches o el incremento de porcentajes de densidad respecto a condiciones normales.
- **Identificar puntos críticos:** Detectar congestión sostenida durante todo el ciclo semanal simulado en escenarios con obstrucciones permanentes y ausencia de recuperación nocturna, información crucial para la toma de decisiones.
- **Evaluar escenarios sin implementación física:** Reproducir condiciones en vialidades cercanas al IPN-ESCOM, validando la correspondencia de los resultados de la simulación con los datos obtenidos.

El simulador aborda la problemática identificada de la limitada disponibilidad de herramientas para modelado de tráfico mediante autómatas celulares, proporcionando una solución que permite simular y analizar el flujo vehicular.

Aunque el alcance inicial se centra en vialidades cercanas a *IPN-ESCOM*, la arquitectura modular de FLUVI y su implementación basada en autómatas celulares permiten su adaptación a diferentes configuraciones viales, facilitando el análisis comparativo de escenarios mediante métricas cuantificables que contribuyen a la comprensión del comportamiento del tráfico vehicular en diversos contextos.

De manera más concreta, el simulador de tráfico vehicular FLUVI cumple satisfactoriamente con su objetivo de modelar la dinámica del tráfico mediante autómatas celulares, proporcionando una herramienta de análisis cuantitativo para vialidades cercanas al IPN-ESCOM. El sistema permite la generación de escenarios personalizados, la obtención de métricas estadísticas en tiempo virtual (flujo, densidad, velocidad y entropía), y la evaluación del impacto de modificaciones viales sin implementación física. Su arquitectura modular y metodología basada en autómatas celulares facilitan su adaptación a diferentes configuraciones urbanas, estableciendo un precedente metodológico para futuras investigaciones en modelado y optimización del tráfico vehicular en diferentes contextos académicos e institucionales.

## Trabajo a Futuro

Este trabajo terminal presenta un modelo de simulación de tráfico basado en autómatas celulares que, si bien captura aspectos esenciales del comportamiento del tráfico, puede ser enriquecido y refinado en futuras investigaciones. Una de las principales áreas de mejora es la incorporación de modelos de movimiento más realistas.

Actualmente, el modelo no considera el Movimiento Uniformemente Acelerado (MUA) ni el Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA). Incluir estos elementos en la simulación permitiría una representación más precisa de la dinámica vehicular, considerando factores como la aceleración y el frenado de los vehículos. Esto implicaría modificar las reglas de transición de los autómatas celulares para incorporar las ecuaciones de movimiento correspondientes, lo que aumentaría la complejidad del modelo pero también su precisión y capacidad predictiva.

La implementación de MUA y MRUA en el modelo abriría nuevas posibilidades de análisis, como la evaluación del impacto de otros elementos viales en la velocidad y el flujo del tráfico. Además, permitiría simular situaciones de congestión con mayor realismo, considerando las variaciones de velocidad y las interacciones entre vehículos.

Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones que exploren la incorporación de modelos de movimiento más sofisticados. Se invita a los interesados en continuar con esta línea de trabajo a profundizar en la implementación de MUA y MRUA, así como a explorar otras mejoras que incrementen la precisión y el realismo del modelo.

# Bibliografía

- [1] Murcia<sup>®</sup>, Universidad de: *Tabla de la Distribución Normal*. [www.um.es/documents/Tabla-de-la-distribucion-normal.pdf](http://www.um.es/documents/Tabla-de-la-distribucion-normal.pdf), 2006. Accedido: [13/05/2025].
- [2] Project Management Institute: *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. Project Management Institute, Newtown Square, PA, 5th edición, 2013. [https://repository.dinus.ac.id/docs/ajar/PMBOKGuide\\_5th\\_Ed.pdf](https://repository.dinus.ac.id/docs/ajar/PMBOKGuide_5th_Ed.pdf), Véase p. 331, Figura 11-10: Matriz de probabilidad e impacto.
- [3] Mitchell, M.: *Complexity: A guided tour*. Oxford University Press, 2009.
- [4] Wolfram, S.: *A new kind of science*. Wolfram Media, 2002.
- [5] Nagel, K. y M. Schreckenberg: *A cellular automaton model for freeway traffic*. J. Phys. I France, 2(12):2221–2229, Dec 1992.
- [6] Chowdhury, D., L. Santen y A. Schadschneider: *Statistical physics of vehicular traffic and some related systems*. Phys. Rep., 329(4-6):199–329, 2000.
- [7] Guzmán Gutiérrez, Héctor Alonso: *Modelo realista para simulación de tráfico vehicular mixto con autómatas celulares*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [8] Trejo, Roberto Fernando Huerta: *Modelo para el análisis del tráfico vehicular en convergencias mediante autómatas celulares*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [9] Ramírez, María Elena Larraga: *Un modelo de autómatas celulares para el transito vehicular en carreteras*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.
- [10] Berg, M. Van den, A. Hegyi, B. De Schutter y J. Hellendoorn: *A macroscopic traffic flow model for integrated control of freeway and urban traffic networks*. En *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475)*, volumen 3, páginas 2774–2779. IEEE, 2003.
- [11] Zhang, J., C. Chang, Z. He, W. Zhong, D. Yao, S. Li y L. Li: *CAVSim: A microscopic traffic simulator for evaluation of connected and automated vehicles*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24(9):10038–10054, 2023.
- [12] TomTom International BV: *TomTom Traffic Index – Ranking of cities around the world by congestion level*, 2025. <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>, Consultado el 16 de mayo de 2025.
- [13] Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México: *Reporte de Hechos de Tránsito - 4to Trimestre 2024*, 2024. [https://www.semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/HT/2024/ReporteHT\\_4toTrimestre2024.pdf](https://www.semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/HT/2024/ReporteHT_4toTrimestre2024.pdf), Consultado el 16 de mayo de 2025.
- [14] Wolfram, Stephen: *Cellular Automata: A Modeling Tool for Complex Systems*. MIT press, 2002.
- [15] Treiber, M. y A. Kesting: *Traffic Flow Dynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [16] Chowdhury, Debashish, Andreas Schadschneider y Katsuhiko Nishinari: *Physics of transport and traffic phenomena in biology: from molecular motors and cells to organisms*. Physics of Life Reviews, 2(4):318–352, 2005.

- [17] Chowdhury, Debashish, Ludger Santen y Andreas Schadschneider: *Simulation of vehicular traffic: A statistical physics perspective*. Computing in Science & Engineering, 2(5):80–87, 2000.
- [18] Maerivoet, Sven y Bart De Moor: *Cellular automata models of road traffic*. Physics Reports, 419(1):1–64, 2005.
- [19] Schmittmann, B. y R. K. P. Zia: *Statistical mechanics of driven diffusive systems*. En Schmittmann, B. y R. K. P. Zia (editores): *Statistical Mechanics of Driven Diffusive Systems*, volumen 17 de *Phase Transitions and Critical Phenomena*, páginas 3–214. Academic Press, 1995.
- [20] *Sistemas inteligentes de tráfico (ITS) para tráfico interurbano*. <https://www.sice.com/trafico-interurbano/>. Accedido el 16 de mayo de 2024.
- [21] *Highway Capacity Manual*. National Academy of Sciences, Washington, DC, 2010.
- [22] Barceló, J.: *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer, New York, 2010.
- [23] Ortúzar, J. de D. y L. G. Willumsen: *Modelling Transport*. Wiley, Hoboken, NJ, 2011.
- [24] Roess, R. P., E. S. Prassas y W. R. McShane: *Traffic Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2011.
- [25] *Special Report 209: Traffic Flow Theory*. National Academy of Sciences, Washington, DC, 2000.
- [26] Vuchic, V. R.: *Urban Transit: Operations, Planning, and Economics*. Wiley, Hoboken, NJ, 2007.
- [27] Papacostas, C. S. y P. D. Prevedouros: *Transportation Engineering and Planning*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2001.
- [28] Montgomery, D. C. y G. C. Runger: *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley, Hoboken, NJ, 6th edición, 2011.
- [29] Ni, D.: *Network Sensor Data Management in Structural Health Monitoring*. Springer, London, 2011.
- [30] Anderson, D. R., D. J. Sweeney, T. A. Williams, J. D. Camm y K. Martin: *Métodos cuantitativos para los negocios*. Cengage Learning Editores, 11a ed. edición, 2011. p. 82.
- [31] Taha, H. A.: *Investigación de operaciones*. Pearson Educación, 9ª ed. edición, 2012.
- [32] Netlify, Inc.: *Netlify: Platform for modern web development*, 2024. <https://www.netlify.com/>, Accedido: 2024.
- [33] Meredith, Jack R., Samuel J. Mantel Jr y Scott M. Shafer: *Project Management: A Managerial Approach*. John Wiley & Sons, 9th edición, 2017.
- [34] Larson, Richard J. y Elizabeth Farber: *Probability and Statistical Inference*. Pearson Education, Boston, 9th edición, 2013, ISBN 978-0-321-82373-3.
- [35] Kerzner, Harold: *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. John Wiley & Sons, 12th edición, 2017.
- [36] Nicholas, John M. y Herman Steyn: *Project Management for Business and Technology*. Pearson Education, 3rd edición, 2008.



## Anexos

# Glosario

**Autómatas Celulares** Modelos matemáticos y computacionales para sistemas dinámicos que evolucionan en pasos discretos, compuestos por celdas que cambian de estado según reglas locales.. 11–14, 16–18, 20–24, 26, 28, 33, 134, 136, 239

**Congestión Vehicular** Situación en la que la demanda de la infraestructura vial excede su capacidad, resultando en velocidades reducidas, tiempos de viaje prolongados y embotellamientos.. 17, 32, 239

**Diagrama de Caja (Boxplot)** Herramienta estadística visual que representa la distribución de un conjunto de datos a través de sus cuartiles. Muestra la mediana, los rangos intercuartílicos y los valores atípicos (outliers), permitiendo comparar la dispersión y simetría de variables como la velocidad o densidad entre diferentes días.. 110, 239

**Distribución de probabilidad normal** Distribución de probabilidad continua cuya función de densidad tiene forma de campana y está determinada por la media,  $\mu$ , y la desviación estándar,  $\sigma$ . La fórmula empleada para convertir cualquier variable aleatoria normal  $x$  con una media  $\mu$  y una desviación estándar  $\sigma$  a la distribución normal estándar es:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

. 47, 239

**Entropía de Shannon** Medida de la incertidumbre o desorden en un sistema de información. En el contexto del tráfico vehicular, se utiliza para cuantificar la imprevisibilidad del flujo y la distribución espacial de los vehículos en la vía. A mayor entropía, mayor desorden y complejidad en el sistema.. 104, 110, 239

**Estado (en contexto de máquinas de estados y teoría computacional)** Configuración en la que se encuentra un sistema en un momento dado, representando la información relevante para su comportamiento futuro. . 239

**Flujo Vehicular** Movimiento de vehículos en una red de transporte, caracterizado por variables como la velocidad, el volumen y la densidad. . 15, 17, 18, 21, 22, 25, 27, 28, 32, 34, 44, 239

**Holguras** Representan el tiempo que una actividad puede retrasarse sin afectar la duración total del proyecto. [33]. 10, 58, 63, 239

**Mapa de Calor (Heatmap)** Técnica de visualización de datos que utiliza una codificación de colores para representar la magnitud de valores en una matriz bidimensional. En análisis de tráfico, es fundamental para identificar patrones temporales de congestión (e.g., Hora del día vs. Día de la semana).. 239

**Matplotlib** Biblioteca de trazado para el lenguaje de programación Python y su extensión matemática NumPy, utilizada para generar visualizaciones estáticas, animadas e interactivas como histogramas, diagramas de dispersión y gráficas de líneas.. 239

**Media** Media  $\mu$  es el valor promedio de un conjunto de datos numéricos, calculado como la suma de todos los valores dividida entre la cantidad total de elementos. Se utiliza comúnmente para representar una tendencia central en análisis estadísticos [34].. 59, 61, 76, 239

- Nagel-Schreckenberg** Modelo matemático de tráfico vehicular basado en autómatas celulares, conocido como modelo NaSch, que simula el flujo de vehículos en una carretera considerando reglas simples de aceleración, frenado y aleatoriedad.. 21, 239
- Netlify** Plataforma de computación en la nube que ofrece servicios de hospedaje (hosting) y backend para aplicaciones web estáticas y sitios dinámicos. Se especializa en la automatización de despliegues modernos mediante la integración continua con sistemas de control de versiones como GitHub. Netlify proporciona una Red de Distribución de Contenidos (CDN) global, gestión automática de certificados SSL/HTTPS y arquitectura *serverless*, eliminando la necesidad de administrar servidores físicos y garantizando alta disponibilidad y escalabilidad. [32]. 239
- NumPy** Biblioteca fundamental para la computación científica en Python que añade soporte para arreglos y matrices grandes y multidimensionales, junto con una colección de funciones matemáticas de alto nivel para operar con estos arreglos.. 110, 239
- Pandas** Biblioteca de código abierto para Python que proporciona estructuras de datos de alto rendimiento y herramientas de análisis fáciles de usar, fundamental para la manipulación de series temporales y tablas de datos en el simulador.. 110, 239
- PERT Costo** Técnica utilizada para estimar el costo esperado de un proyecto o actividad bajo incertidumbre, basada en el método PERT (Program Evaluation and Review Technique). El cálculo del costo esperado se realiza mediante una media ponderada que considera tres estimaciones: el costo optimista ( $C_o$ ), el más probable ( $C_m$ ) y el pesimista ( $C_p$ ). La fórmula es:  $C_e = \frac{C_o + 4C_m + C_p}{6}$ , donde  $C_e$  representa el costo esperado. Esta técnica permite incorporar la variabilidad en las estimaciones y se utiliza comúnmente en la gestión de proyectos para planificar presupuestos con mayor precisión. [34]. 63, 70, 239
- PERT Probabilístico** Versión del método PERT que considera incertidumbre en los tiempos de actividad utilizando estimaciones optimistas, más probables y pesimistas. [35]. 58, 60, 70, 239
- Pert Simple** PERT (Program Evaluation and Review Technique) es una técnica de gestión de proyectos que permite planificar y controlar las tareas necesarias para completar un proyecto, estimando el tiempo requerido con base en tres escenarios: optimista, más probable y pesimista.[35]. 7, 54–57, 239
- Pyodide** Distribución de Python compilada a WebAssembly que permite ejecutar el intérprete de Python dentro del navegador web. Facilita el uso de bibliotecas científicas como Pandas y NumPy en el lado del cliente sin necesidad de un servidor backend para el procesamiento de datos.. 107, 110, 239
- Red PERT** Representación gráfica del proyecto mediante nodos y flechas, que permite visualizar el orden y dependencias entre actividades. [35]. 7, 53, 54, 239
- Ruta Crítica** Es la secuencia de actividades que determina la duración mínima del proyecto. Las actividades en esta ruta no tienen holgura. [35]. 47, 55, 58, 59, 239
- SciPy** Biblioteca de software libre para matemáticas, ciencias e ingeniería en Python. Contiene módulos para optimización, álgebra lineal, integración e interpolación, utilizada para cálculos estadísticos avanzados.. 110, 239
- simulador** Herramienta computacional que modela y reproduce el comportamiento de un sistema real, permitiendo la experimentación y el análisis de diferentes escenarios. . 11, 12, 16–18, 20, 28, 33–35, 44–46, 116, 134, 135, 239

- Sistemas Complejos** Sistemas compuestos por múltiples elementos interrelacionados, cuyas interacciones locales generan comportamientos emergentes no predecibles a partir de las propiedades de los elementos individuales. . 5, 11, 21, 24, 25, 239
- Sistemas Dinámicos** Modelos matemáticos que describen la evolución de un sistema a lo largo del tiempo, ya sea de forma continua o discreta. . 239
- Tabla de Tiempos de Tres Puntos** Herramienta utilizada para calcular el tiempo esperado de una actividad a partir de los tiempos optimista, más probable y pesimista. [33]. 10, 58, 71, 239
- Varianza** Medida de dispersión utilizada en PERT para calcular la incertidumbre del tiempo estimado de una actividad. [36]. 59, 239
- Vida Artificial** Campo de estudio que simula sistemas vivos utilizando modelos computacionales, buscando comprender los principios fundamentales de la vida. . 239
- WebAssembly (Wasm)** Estándar web que define un formato de código binario portátil y un modelo de ejecución correspondiente. Permite que código escrito en lenguajes como C, C++, Rust y Python se ejecute en el navegador a velocidad casi nativa, complementando a JavaScript.. 239

# Acrónimos

**IPN** Instituto Politécnico Nacional. 1, 9, 16–18, 31, 32, 78, 207–210, 232–235, 239

**te** Tiempo Esperado. 59, 239

**API** Application Programming Interface. 239

**CDN** Content Delivery Network (Red de Distribución de Contenido). 108, 110, 111, 239

**CORS** Cross-Origin Resource Sharing (Intercambio de Recursos de Origen Cruzado). 110, 239

**DOM** Document Object Model, estructura que representa documentos HTML y XML como nodos y objetos. 33, 239

**ECA** Elementary Cellular Automaton. 6, 7, 10, 26, 27, 33, 116, 239

**ESCOM** Escuela Superior de Cómputo. 16, 234, 235, 239

**FLUVI** Simulador de sistema de gestión del flujo vehicular en vialidades cercanas a áreas académicas del IPN - ESCOM. 7, 10, 12, 14–16, 18, 21, 28, 33–35, 44, 46, 51–57, 70–72, 102, 104, 110, 111, 235, 239

**FPS** Frames Per Second (Cuadros por Segundo). 106, 108, 239

**GPS** Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global). 239

**GPU** Graphics Processing Unit (Unidad de Procesamiento Gráfico). 104, 106, 108, 110, 239

**HL** Holgura Libre. 58, 239

**HT** Holgura Total. 58, 239

**HTML** HyperText Markup Language (Lenguaje de Marcado de Hipertexto). 134, 136, 239

**HTTP** Hypertext Transfer Protocol (Protocolo de Transferencia de Hipertexto). 239

**HTTPS** Hypertext Transfer Protocol Secure (Protocolo de Transferencia de Hipertexto Seguro). 111, 239

**IP** Internet Protocol (Protocolo de Internet). 111, 239

**ITS** Sistemas inteligentes de transporte. 5, 28, 239

**JSON** JavaScript Object Notation (Notación de Objetos de JavaScript). 109, 119–121, 128, 239

**MRUA** Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado. 236, 239

**MUA** Movimiento Uniformemente Acelerado. 236, 239

**PC** Personal Computer (Computadora Personal). 111, 239

**PERT** Program Evaluation and Review Technique. 7, 47, 52, 54, 55, 239

**SPA** Single Page Application (Aplicación de Página Única). 111, 239

**SSL** Secure Sockets Layer (Capa de Sockets Seguros). 111, 239

**TIL** Tiempo Tardío de Inicio. 239

**TIP** Tiempo Tardío de Inicio. 54, 239

**TTF** Tiempo Temprano de Fin. 54, 239

**TTL** Tiempo Tardío de Fin. 54, 239

**TTP** Tiempo Temprano de Inicio. 54, 239

**UI** Interfaz de Usuario. 33, 239

**URL** Uniform Resource Locator (Localizador Uniforme de Recursos). 111, 239

**WebGL** Web Graphics Library. 106–108, 110, 111, 115, 239