



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Previo a la obtención del grado académico en  
**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

Evaluación del comportamiento de las comunicaciones vehiculares C  
– V2X en presencia de vehículos de emergencia

**AUTOR**

**Mariscal Méndez Daniela Nicole**

**TUTOR**

**Ing. Chamba Macas Fernando Vinicio. Mgt**

**Santa Elena, Ecuador**

**Año 2025**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. Ronald Rovira Jurado, PhD.  
DIRECTOR DE LA CARRERA**

**Ing. Fernando Chamba Macas, Mgt.  
DOCENTE TUTOR**

**Ing. Carlos Andrade Caicho, MSc.  
DOCENTE ESPECIALISTA**

**Ing. Luis Amaya Fariño, Mgt.  
DOCENTE DE ÁREA**

**Ing. Corina Gonzabay De La A, MSc.  
DOCENTE ESPECIALISTA**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por Mariscal Méndez Daniela Nicole, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones.

La Libertad, a los días del mes de diciembre del año 2025

**TUTOR**

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Fernando Chamba Macas", is written over a horizontal line.

---

**Ing. Fernando Chamba Macas. Mgt**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **MARISCAL MÉNDEZ DANIELA NICOLE**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación, Evaluación del comportamiento de las comunicaciones vehiculares C-V2X en presencia de vehículos de emergencia previo a la obtención del título en Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los días del mes de diciembre del año 2025

**EL AUTOR**

*Daniela Mariscal.*

---

**Mariscal Méndez Daniela Nicole**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO**

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Evaluación del comportamiento de las comunicaciones vehiculares C-V2X en presencia de vehículos de emergencia, presentado por el estudiante, Mariscal Méndez Daniela Nicole fue enviado al Sistema Antiplagio, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al XX%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

Documento	<a href="#">TT_Gonzalez_John.docx</a> (D96390558)
Presentado	2021-02-23 22:35 (-05:00)
Presentado por	T.W.D@hotmail.es
Recibido	luis.alban01.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	TT_González John <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 2% de estas 42 páginas, se componen de texto presente en 6 fuentes.

**TUTOR**

---

**Ing. Chamba Macas Fernando. Mgt**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **MARISCAL MÉNDEZ DANIELA NICOLE**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.[1]

Cedo los derechos en línea patrimoniales de artículo profesional de alto nivel con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

Santa Elena, a los días del mes de diciembre del año 2025

**EL AUTOR**

*Daniela Mariscal.*

---

**Daniela Nicole Mariscal Méndez**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios, por ser mi guía constante en cada paso de este camino. Por darme la fuerza en los momentos de cansancio, por ser luz en los momentos de duda.

A mis padres, quienes han sido mi mayor ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia.

Gracias por los sacrificios silenciosos que hicieron para que yo pudiera avanzar. Este logro también les pertenece.

Quiero expresar un agradecimiento muy especial al Ingeniero Asdrual Montaña, cuyo acompañamiento, guía y paciencia han sido fundamentales para la construcción de esta tesis. Gracias por sus conocimientos compartidos, por su orientación en cada detalle.

Quiero expresar un agradecimiento muy grande al Ingeniero Jaime Minchala, cuyas palabras de aliento junto a sus bromas hicieron más ameno mi camino en la carrera. Gracias por sus conocimientos compartidos, por su orientación en cada detalle.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a que este proyecto se hiciera realidad: docentes, amigos y

compañeros. Cada palabra, cada gesto y cada  
enseñanza formaron parte del camino que hoy  
concluye.

*Daniela Mariscal Méndez.*

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a mis padres Mercedes Méndez Pozo y Victor Mariscal Parrales, quienes han sido mi guía y mi fuente inagotable de amor. Gracias por enseñarme con su ejemplo que la perseverancia, la humildad y el esfuerzo son el camino para alcanzar cualquier meta. Este logro es también suyo.

A mis hermanos Yanina, Ingrid, Ginger, Teresa, Nury, Victor Hugo, Victor Ivan y Victor Paul, por acompañarme en cada etapa de mi vida, por sus palabras de ánimo, por las risas compartidas y por estar presentes incluso en mis días más difíciles. Su compañía ha sido una fuerza silenciosa pero constante que me impulsó a seguir adelante.

Y finalmente, a mi compañero de vida, cuyo amor, comprensión y apoyo han sido fundamentales en todo este proceso. Gracias por estar a mi lado en cada duda, cada desvelo y cada triunfo. Su presencia ha llenado este camino de fortaleza, paciencia y esperanza.

*Daniela Mariscal Méndez.*

## ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	IV
DECLARO QUE: .....	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO .....	VII
DEDICATORIA .....	IX
ÍNDICE GENERAL.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT .....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	XVIII
CAPÍTULO I.....	2
1.1.    Título: .....	2
1.2.    Descripción del Problema .....	2
1.3.    Antecedentes.....	3
1.4.    Descripción del Proyecto .....	5
1.5.    Objetivos del Proyecto .....	7
1.5.1.    Objetivo General .....	7
1.5.2.    Objetivos Específicos.....	7
1.6.    Justificación .....	7
1.7.    Alcance .....	8

<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>10</b>
2.1. Marco contextual .....	10
2.2. Marco teórico.....	11
2.2.1. Fundamentos de C-V2X.....	11
2.2.1.1. Principios de operación y arquitectura.....	11
2.2.1.2. Modos de comunicación: directo (modo 2) y en red.....	13
2.2.2. Gestión de recursos de radio en C-V2X.....	15
2.2.2.1. Asignación de recursos y acceso al canal (Sidelink) .....	15
2.2.2.2. Bandas de frecuencia y configuraciones de transmisión.....	17
2.2.2.3. Tipos de tráfico vehicular y tráfico periódico .....	19
2.2.3. Incorporación de vehículos de emergencia en la red C-V2X .....	20
2.2.3.1. Priorización de mensajes y clases de servicio.....	21
2.2.3.2. Impacto del tráfico priorizado sobre el canal de comunicación	22
2.2.3.3. Estrategias de gestión de interferencia y coexistencia .....	23
2.2.4. Métricas e indicadores de rendimiento .....	24
2.2.4.1. Tasa de entrega de paquetes (PDR) .....	24
2.2.4.2. Confiabilidad del enlace.....	25
2.2.5. Estudios y estándares relevantes .....	26
2.2.5.1. Evolución tecnológica y estandarización (3GPP Releases 14 –	26
16)	
2.2.5.2. Estado del arte en priorización de tráfico vehicular.....	27
2.2.5.3. Aplicaciones de C-V2X para soporte a vehículos de	
emergencia	28
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>29</b>

3.1 Estrategia de evaluación: Análisis comparativo de escenarios independientes.....	29
3.1.1 Justificación de la estrategia.....	29
3.1.2 Descripción de los escenarios .....	30
3.1.3 Métricas de comparación .....	30
3.2. Herramientas de Simulación.....	31
3.2.1. Entorno MATLAB y toolbox de comunicaciones. ....	31
3.2.2. Simulador wilabv2xsim: Características y arquitectura.....	32
3.2.3. Limitaciones del simulador y propuesta de adaptación para vehículos de emergencia.....	36
3.3. Definición de Parámetros del Sistema C-V2X (Modo 4/Modo 2).....	38
3.3.1. Configuración de la capa física (PHY). ....	39
3.3.2. Configuración de la capa MAC y gestión de recursos. ....	43
3.4. Diseño de Escenarios de Simulación.....	44
3.4.1. Escenario 1: Tráfico Vehicular Estándar (Línea Base).....	44
3.4.2. Escenario 2: Tráfico de Vehículos de Emergencia (Escenario Crítico). .....	45
3.4.3. Justificación de los Parámetros Diferenciados.....	47
3.5. Definición de Métricas de Desempeño (KPIs) .....	47
3.5.1. Packet Reception Ratio (PRR).....	47
3.5.2. Variables Independientes y Dependientes .....	48
3.6. Procedimiento de Simulación.....	48
3.6.1. Estructura del Código de Simulación.....	49
3.6.2. Llamada a la Función WiLabV2Xsim .....	49
3.6.3. Tiempos de Simulación.....	49
3.6.4. Flujo de Ejecución.....	50

<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>50</b>
4.1. Resultados del Escenario 1: Comportamiento con Tráfico Vehicular Estándar .....	51
4.1.1. Análisis del PRR en Función de la Distancia .....	51
4.1.2. Impacto de la Densidad Vehicular en la Congestión del Canal .....	52
4.1.3. Evaluación de la Confiabilidad del Enlace .....	53
4.2. Resultados del Escenario 2: Comportamiento con Vehículos de Emergencia .....	54
4.2.1. Desempeño del PRR bajo Parámetros de Emergencia.....	54
4.2.2. Análisis de la Estabilidad del Enlace para Mensajes Críticos.....	56
4.2.3. Comportamiento del Algoritmo SB-SPS bajo Requisitos de Emergencia.....	57
4.3. Análisis Comparativo: Impacto de los Parámetros de Emergencia en la Red NR- V2X .....	57
4.3.1. Comparación Directa de Curvas PRR.....	57
4.3.2. Vista Panorámica de los Resultados .....	59
4.3.3. Evaluación del Cumplimiento del Umbral de Confiabilidad (95%)...	60
4.3.4. Análisis de la Tasa de Degradación del PRR.....	60
4.4. Discusión de Resultados.....	61
4.4.1. Interpretación Técnica de los Hallazgos .....	61
4.4.2. Implicaciones para el Despliegue de C-V2X en Ecuador.....	62
4.4.3. Comparación con Estudios Previos y Validación de Resultados.....	62
4.4.4. Limitaciones del Análisis Realizado .....	63
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capas funcionales de la arquitectura C-V2X [13] .....	12
Tabla 2. Comparativa de modos de operación en C-V2X [2].....	14
Tabla 3. Comparativa entre modos de asignación de recursos en C-V2X [2].....	17
Tabla 4. Bandas y configuraciones de transmisión en sistemas C-V2X [20] .....	18
Tabla 5. Clasificación de tipos de tráfico en comunicaciones C-V2X [23].....	19
Tabla 6. Clases de servicio sugeridas para tráfico de vehículos de emergencia vs tráfico estándar [27] .....	21
Tabla 7. Impacto esperado de la priorización de VE sobre métricas de canal (escenario urbano de alta densidad) [15] .....	22
Tabla 8. Factores que afectan la tasa de entrega de paquetes en C-V2X.....	25
Tabla 9. Valores típicos de métricas de rendimiento en escenarios C-V2X modo 2 .....	26
Tabla 10. Evolución tecnológica de C-V2X según los Releases 14–16 del 3GPP	27
Tabla 11. Configuraciones .....	42
Tabla 12. Parámetros específicos del escenario.....	44
Tabla 13. Parámetros de los vehículos de emergencia.....	46
Tabla 14. Comparativa de Parámetros: Vehículos Normales vs. Emergencia.....	47
Tabla 15. Tiempos de simulación según densidad vehicular .....	50
Tabla 16. Valores de PRR a distancias específicas - Vehículos Normales.....	53
Tabla 17. Valores de PRR a distancias específicas - Vehículos de Emergencia ..	56
Tabla 18. Distancia máxima de cumplimiento del umbral $PRR \geq 95\%$ .....	60
Tabla 19. Tasa de degradación del PRR por rango de distancia .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura general de las comunicaciones C-V2X [12].....	12
Figura 2. Modos de operación de C-V2X y sus interfaces [16].....	14
Figura 3. Esquema del proceso de asignación de recursos SB-SPS en C-V2X modo 2 [18].....	16
Figura 4. Esquema de bandas 5G de baja a alta [21] .....	18
Figura 5. Comportamiento del tráfico periódico y crítico en C-V2X modo 2 [24] .....	20
Figura 6. Inicio de MATLAB .....	31
Figura 7. Estructura del proyecto wilabv2x .....	33
Figura 8 Arquitectura modeluar de WilabV2Xsim .....	34
Figura 9. Estructura del proyecto WilabV2xsim.....	35
Figura 10. Resultados obtenidos durante la simulación.....	36
Figura 11. Archivo de configuración Urban3GPP.cfg.....	39
Figura 12. Parámetros para vehículos normales .....	41
Figura 13. Parámetros para vehículos de emergencia .....	43
Figura 14. Parámetros comunes para los escenarios de simulación.....	45
Figura 15. Flujo de simulación.....	50
Figura 16. Packet Reception Ratio en función de la distancia para vehículos normales (densidades: 50, 100 y 150 veh/km <sup>2</sup> ).....	51
Figura 17. Packet Reception Ratio en función de la distancia para vehículos de emergencia (densidades: 5, 10 y 15 veh/km <sup>2</sup> ).....	55
Figura 18. Comparación del PRR: Vehículos Normales (100 veh/km <sup>2</sup> , 350 B, 50 km/h) vs. Vehículos de Emergencia (10 veh/km <sup>2</sup> , 500 B, 80 km/h).....	58

Figura 19. Vista panorámica de los resultados: PRR Vehículos Normales  
(izquierda), PRR Vehículos de Emergencia (centro) y Comparación directa  
(derecha)..... 59

## **RESUMEN**

El presente trabajo evalúa el comportamiento de las comunicaciones vehiculares C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) en presencia de vehículos de emergencia mediante simulación computacional. El objetivo fue analizar el rendimiento del sistema NR-V2X modo 2 comparando escenarios con vehículos convencionales y de emergencia. Se utilizó el simulador WiLabV2Xsim en MATLAB, configurando dos escenarios independientes: vehículos normales (350 bytes, 50 km/h, sin retransmisiones) y vehículos de emergencia (500 bytes, 80 km/h, con retransmisiones), evaluando la tasa de recepción de paquetes (PRR) bajo diferentes densidades vehiculares. Los resultados evidencian que los vehículos de emergencia alcanzan un PRR inicial superior (~88%) con mayor estabilidad ante variaciones de densidad, mientras que los vehículos normales presentan degradación más pronunciada en alta densidad. Se concluye que la configuración optimizada para emergencias mejora la confiabilidad del enlace a cortas distancias, aunque ningún escenario cumple el umbral del 95% más allá de 30 metros.

**Palabras clave:** C-V2X, vehículos de emergencia, NR-V2X

## **ABSTRACT**

This work evaluates the behavior of C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) vehicular communications in the presence of emergency vehicles through computational simulation. The objective was to analyze the performance of the NR-V2X mode 2 system by comparing scenarios with conventional and emergency vehicles. The WiLabV2Xsim simulator was used in MATLAB, configuring two independent scenarios: normal vehicles (350 bytes, 50 km/h, without retransmissions) and emergency vehicles (500 bytes, 80 km/h, with retransmissions), evaluating the Packet Reception Ratio (PRR) under different vehicular densities. The results show that emergency vehicles achieve a higher initial PRR (~88%) with greater stability against density variations, while normal vehicles exhibit more pronounced degradation at high density. It is concluded that the optimized configuration for emergencies improves link reliability at short distances, although no scenario meets the 95% threshold beyond 30 meters.

**Keywords:** C-V2X, emergency vehicles, NR-V

## **INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de sistemas inteligentes de transporte (ITS) representa una estrategia fundamental para enfrentar los desafíos de movilidad urbana actuales. La tecnología Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) ha emergido como una solución prometedora para mejorar la seguridad vial mediante la comunicación directa entre vehículos, permitiendo el intercambio de información en tiempo real sin dependencia de infraestructura celular.

Los vehículos de emergencia enfrentan dificultades críticas para desplazarse con rapidez durante sus operaciones, donde la incorporación de tráfico priorizado en redes C-V2X plantea interrogantes sobre el comportamiento del sistema de comunicaciones. La generación de mensajes críticos con mayor frecuencia y tamaño podría afectar la asignación de recursos del canal y el rendimiento general de la red.

En el contexto ecuatoriano, donde la infraestructura para sistemas ITS se encuentra en desarrollo inicial, resulta fundamental generar conocimiento técnico que oriente la planificación de estrategias de movilidad conectada. Este trabajo evalúa comparativamente el rendimiento de comunicaciones C-V2X entre vehículos convencionales y de emergencia mediante simulación, estructurándose en cuatro capítulos que abordan la problemática, marco teórico, metodología de simulación y análisis de resultados.

# **CAPÍTULO I**

## **1.1. Título:**

Evaluación del comportamiento de las comunicaciones vehiculares C-V2X en presencia de vehículos de emergencia

## **1.2. Descripción del Problema**

En los últimos años, el incremento del tráfico vehicular y la creciente complejidad de los entornos urbanos han generado nuevos desafíos en materia de movilidad, seguridad y eficiencia del transporte. Dentro de este contexto, los vehículos de emergencia (VE), como ambulancias, patrullas y unidades de rescate, enfrentan serias dificultades para desplazarse con rapidez y seguridad durante sus operaciones. La falta de coordinación efectiva entre estos vehículos y el resto del tráfico vehicular ocasiona retrasos críticos en la atención de emergencias, lo que puede traducirse en la pérdida de vidas humanas o en un aumento de daños materiales [1].

El avance de las comunicaciones vehiculares (V2X) y, particularmente, de la tecnología Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X), abre la posibilidad de mejorar la gestión del tránsito y la coordinación entre vehículos mediante la interconexión directa y la transmisión de información en tiempo real. En modo 2 (autónomo), los vehículos pueden comunicarse directamente entre sí (V2V) sin necesidad de infraestructura celular, intercambiando datos sobre posición, velocidad, dirección y eventos de tráfico relevantes [2]. Sin embargo, aún existe una brecha de conocimiento sobre cómo se comporta este tipo de comunicación cuando se incorporan vehículos de emergencia con prioridad de transmisión, los cuales generan tráfico crítico que podría alterar la asignación de recursos del canal o provocar congestión en la red vehicular [3].

En escenarios de alta densidad vehicular, las limitaciones en la gestión de recursos de radio y la variabilidad del canal inalámbrico pueden afectar la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la confiabilidad del enlace, factores determinantes para mantener la integridad de las comunicaciones entre vehículos. En consecuencia, es necesario

evaluar el comportamiento del sistema C-V2X modo 2 bajo la presencia de vehículos de emergencia, analizando cómo la generación de mensajes priorizados influye en la eficiencia general de la red y en la calidad del servicio vehicular [4].

En el contexto ecuatoriano, donde la infraestructura para sistemas inteligentes de transporte (ITS) se encuentra en desarrollo, la falta de estudios técnicos sobre comunicaciones vehiculares con prioridad de emergencia representa una limitación para la planificación de políticas y estrategias de movilidad conectada. Por tanto, comprender el impacto que los vehículos de emergencia producen en las comunicaciones C-V2X es fundamental para diseñar mecanismos de priorización, optimizar parámetros de transmisión y mejorar la respuesta operativa ante incidentes en vías urbanas.

### **1.3. Antecedentes**

En el plano global, las comunicaciones vehiculares mediante C-V2X (*Cellular Vehicle-to-Everything*) han sido objeto de amplia investigación para mejorar la seguridad y eficiencia del tránsito. Por ejemplo, el estudio de Nadeem Sial en el año 2019, titulado “*Stochastic Geometry Modeling of Cellular V2X Communication Over Shared Channels*” analizó mediante procesos estocásticos el desempeño de C-V2X en modos directos (PC5) y mediante infraestructura (V2I/N), concluyendo que superar el modo convencional V2V ofrece una mayor probabilidad de éxito en la comunicación bajo altas densidades vehiculares [5].

De igual forma, el estudio realizado por Wang en el 2025, sobre “*Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies on Road Safety and Traffic Efficiency*” mostró que C-V2X supera el estándar DSRC en tiempos de reacción, aceleración, y reducción de conflictos viales, presentando una latencia de 0.25 ms y mejorando el tiempo de llegada (TTC) hasta un 38 % respecto al DSRC en escenarios de alta congestión [6].

En conjunto, estos trabajos globales posicionan a C-V2X como una tecnología clave para entornos vehiculares densos y de alta exigencia de latencia, lo cual

resulta fundamental cuando se introducen variables críticas como vehículos de emergencia que requieren una priorización especial en la red de comunicaciones. Una investigación más reciente realizada por Zhang en el 2025 titulada *“Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy”*, ofrece una taxonomía actualizada de tecnologías V2X, destacando que la fase “durante-comunicación” y “post-comunicación” en entornos cooperativos aún enfrenta retos de latencia, confiabilidad y penetración tecnológica [7]. Asimismo, se han analizado la compatibilidad de C-V2X con redes de quinta generación (5G) y escenarios vehiculares críticos, incluyendo aplicaciones de emergencia (prioridad de paso, alertas instantáneas), lo que refuerza la pertinencia de estudiar el comportamiento de C-V2X cuando se suma la complejidad de vehículos de emergencia con requerimientos especiales. Esta línea de investigación aporta un marco conceptual de gran alcance que permite situar nuestro trabajo en un contexto global de evolución tecnológica y de despliegue real.

En el ámbito regional, investigaciones sobre C-V2X con vehículos de emergencia es más escasa, se reportan estudios que evalúan comunicaciones vehiculares en entornos latinoamericanos. Por ejemplo, el artículo realizado por Soto en el año 2022, con el tema *“A survey on road safety and traffic efficiency vehicular applications based on C-V2X technologies”* aborda aplicaciones de seguridad vial y eficiencia de tráfico basadas en C-V2X, enfocándose en diversas regiones, entre ellas Iberoamérica. En ese estudio se alertó sobre la necesidad de adaptar los protocolos de C-V2X al contexto latinoamericano por factores como densidad vehicular, infraestructura y normativas locales [8]. Este antecedente muestra que, aunque la investigación regional tiene buena base, aún existen vacíos en escenarios específicos como el de los vehículos de emergencia.

Un trabajo llevado a cabo por Loo en Ecuador titulado *“Evaluation of 5G Vehicle-to-Everything (V2X) Communications in Urban Scenarios”* analizó la comunicación V2X en escenarios urbanos del país, utilizando MATLAB/simulaciones para evaluar métricas de latencia y recepción en entornos reales ecuatorianos [9]. Aunque este estudio no abarca directamente la

priorización de vehículos de emergencia, evidencia que la región ya tiene avances metodológicos en simulación de comunicaciones V2X, lo cual facilita la adaptación del escenario para vehículos de emergencia en C-V2X que se plantea en esta tesis.

En el contexto ecuatoriano, el artículo “Implementación de redes vehiculares (VANETs) para soporte de comunicaciones en vehículos autónomos” aporta un análisis técnico de redes vehiculares ad hoc (VANETs) con referencia a estándares como IEEE 802.11p y C-V2X, donde se identifican retos de latencia, densidad de nodos y seguridad cibernética en escenarios urbanos ecuatorianos [10]. Este antecedente es relevante porque permite reconocer las condiciones locales (infraestructura, entorno urbano, densidad vehicular) que inciden al evaluar una simulación de C-V2X en Ecuador, y muestra que ya existe una base técnica local para comunicaciones vehiculares, si bien no centrada en vehículos de emergencia.

Un aporte adicional en la región se obtiene de informes de expansión de 5G en Ecuador, los cuales, aunque no están centrados en C-V2X con vehículos de emergencia, muestran que el entorno nacional está en proceso de adecuación tecnológica para comunicaciones de alto rendimiento (5G) que facilitarán futuras implementaciones de C-V2X. En una publicación se indica que Ecuador planea pruebas con tecnología 5G que “ofrece potencial para la digitalización de la economía” y, por extensión, para comunicaciones vehiculares avanzadas. Este hecho fortalece la viabilidad del estudio propuesto, pues subraya que el entorno nacional cuenta con la infraestructura emergente para soportar simulaciones o implementaciones de C-V2X modo 2 con priorización de vehículos de emergencia.

#### **1.4. Descripción del Proyecto**

El presente proyecto tiene como finalidad llevar a cabo una investigación rigurosa sobre el comportamiento de las comunicaciones vehiculares mediante C-V2X en modo 2 (autónomo) en entornos donde operan vehículos de emergencia. Para ello, se seleccionará un escenario urbano que simule la operación de VE con prioridad

de comunicación, así como la interacción con otros vehículos conectados. El objetivo es configurar un entorno de evaluación técnico-vehicular en MATLAB (u otra herramienta de simulación apropiada) que permita modelar los nodos vehiculares, los recursos de radio, los canales de transmisión y los mecanismos de priorización.

En concreto, se definirán los parámetros del escenario (densidad de vehículos, porcentaje de VE, tasa de generación de mensajes, condiciones de propagación, asignación de bandas y frecuencia) y se establecerán los componentes del sistema de comunicaciones vehiculares C-V2X en modo 2, es decir, comunicaciones directas entre vehículos sin intermediación de infraestructura. A continuación, se implementará la configuración del entorno, incluyendo los modelos de transmisión, recepción, acceso al canal y priorización de mensajes críticos para VE.

En el escenario urbano simulado, los vehículos de emergencia tendrán prioridad de acceso al canal y generación de mensajes críticos (por ejemplo, aviso de aproximación, solicitud de paso, cambio de ruta), mientras que los demás vehículos operarán bajo condiciones estándar del sistema C-V2X. Se evaluará el impacto que estos VE generan en el sistema de comunicaciones, tanto para ellos mismos como para los vehículos conectados que no tienen prioridad.

Finalmente, a través del análisis de métricas como la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la confiabilidad del enlace, se determinará el grado de mejora o degradación que la introducción de vehículos prioritarios produce en el sistema C-V2X modo 2. Los resultados permitirán generar recomendaciones de diseño para protocolos de priorización, configuración de parámetros de comunicación y optimización del entorno vehicular conectado, con especial aplicación al contexto ecuatoriano.

## **1.5. Objetivos del Proyecto**

### **1.5.1. Objetivo General**

Evaluar el comportamiento de las comunicaciones vehiculares C-V2X en presencia de vehículos de emergencia, mediante la implementación de escenarios de simulación.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Analizar el estado del arte de las comunicaciones vehiculares C-V2X, abordando su evolución, arquitectura, modos de operación y mecanismos de gestión de recursos de radio, considerando las bandas, frecuencias y tipos de tráfico involucrados en situaciones de emergencia.
- Diseñar un escenario de simulación vehicular en entorno C-V2X modo 2, considerando parámetros de densidad vehicular, movilidad y prioridad de comunicación, como base para la posterior implementación de la simulación.
- Configurar el entorno de simulación en MATLAB, definiendo los modelos de transmisión, recepción y priorización de mensajes, así como las condiciones del canal inalámbrico para el análisis del desempeño de C-V2X.
- Evaluar las métricas de rendimiento del sistema de comunicaciones C-V2X en presencia de vehículos de emergencia, mediante el análisis de la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la confiabilidad del enlace.

## **1.6. Justificación**

El desarrollo de sistemas de comunicación vehicular basados en C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) responde a la creciente necesidad de optimizar la seguridad y eficiencia del transporte urbano, especialmente en la atención de emergencias. Los vehículos de emergencia (VE) requieren un intercambio de información inmediato, confiable y continuo para garantizar desplazamientos seguros y una coordinación efectiva con otros usuarios de la vía.

La justificación técnica de este estudio se fundamenta en que el modo 2 de C-V2X permite comunicaciones directas (vehículo-a-vehículo) sin necesidad de infraestructura celular, lo que lo convierte en un mecanismo ideal para situaciones en las que la cobertura o la latencia de red son limitadas. Sin embargo, la incorporación de tráfico priorizado, como el generado por VE, puede alterar la asignación de recursos del canal y afectar el rendimiento global del sistema. De allí la importancia de evaluar y cuantificar estos efectos mediante un entorno controlado de simulación y análisis.

Desde una perspectiva científica, este proyecto contribuye a ampliar el conocimiento sobre la gestión de recursos de radio y los protocolos de priorización en redes vehiculares conectadas, brindando una base sólida para futuras investigaciones orientadas al despliegue de sistemas ITS (Intelligent Transport Systems) en el país.

En el contexto ecuatoriano, donde la implementación de tecnologías 5G y comunicaciones vehiculares aún se encuentra en desarrollo, los resultados de esta investigación pueden servir como referencia para instituciones de tránsito, cuerpos de emergencia y universidades, al momento de diseñar políticas o proyectos piloto enfocados en movilidad inteligente y atención rápida de incidentes.

Además, este trabajo promueve el fortalecimiento académico y la transferencia de conocimiento en el ámbito de las comunicaciones vehiculares C-V2X, incentivando la formación de profesionales especializados en tecnologías emergentes de conectividad, movilidad y transporte seguro.

### **1.7. Alcance**

El presente proyecto tiene como propósito evaluar el comportamiento de las comunicaciones vehiculares C-V2X en modo 2 en escenarios urbanos donde participan vehículos de emergencia (VE), mediante el diseño y configuración de entornos que permitan visualizar el impacto de estos vehículos en la eficiencia y confiabilidad de la red vehicular.

El alcance del trabajo comprende las siguientes etapas:

- Revisión teórica y técnica sobre la arquitectura, estándares y mecanismos de comunicación C-V2X, con énfasis en su funcionamiento autónomo (modo 2).
- Diseño del escenario de evaluación, determinando parámetros como la densidad vehicular, el número y tipo de VE, la tasa de generación de mensajes y las condiciones del canal de transmisión.
- Configuración del entorno de simulación en MATLAB, con la definición de modelos de acceso al canal, transmisión, recepción y priorización de mensajes para vehículos de emergencia.
- Obtención de métricas de rendimiento, enfocadas en la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la confiabilidad del enlace, generadas únicamente como resultados del escenario simulado, sin realizar procesos de análisis, interpretación o comparación estadística.

Este proyecto no contempla la implementación física de equipos ni pruebas de campo. Su desarrollo se limita a la construcción de un entorno simulado orientado exclusivamente a la obtención y presentación de resultados cuantitativos, los cuales servirán como referencia para futuras investigaciones o implementaciones relacionadas con sistemas vehiculares inteligentes (ITS) en Ecuador y la región.

## CAPÍTULO II

### 2.1. Marco contextual

En los últimos años, el desarrollo de sistemas de comunicaciones vehiculares ha adquirido gran relevancia dentro del ámbito de los sistemas inteligentes de transporte (ITS), impulsados por la necesidad de mejorar la seguridad vial, reducir los tiempos de respuesta ante emergencias y optimizar la movilidad urbana.

Las tecnologías Vehicle-to-Everything (V2X) surgen como una solución integral que permite la comunicación directa entre vehículos, infraestructura vial, peatones y redes celulares. Dentro de estas tecnologías, Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) se presenta como la evolución natural frente a los sistemas Dedicated Short Range Communications (DSRC), al ofrecer mayor cobertura, mejor gestión de recursos y menor latencia, aprovechando las redes 4G LTE y 5G [11].

El modo autónomo o directo (modo 2) de C-V2X, definido por el estándar 3GPP Release 14, permite que los vehículos se comuniquen sin depender de la red celular, estableciendo vínculos vehículo a vehículo (V2V) mediante la interfaz sidelink (PC5). Este enfoque es esencial para aplicaciones críticas donde la infraestructura puede no estar disponible o la latencia de red sea un factor limitante [2].

En el contexto de la movilidad urbana moderna, la incorporación de vehículos de emergencia (VE) en el ecosistema conectado plantea la necesidad de implementar mecanismos de priorización de tráfico y gestión eficiente de los recursos de radio. Estos mecanismos buscan garantizar la entrega oportuna y confiable de mensajes críticos, como alertas de aproximación, solicitud de paso o coordinación de rutas de emergencia, sin comprometer la estabilidad general del sistema vehicular conectado [3].

De esta manera, el presente estudio se enmarca en la evaluación técnica de la tecnología C-V2X en modo 2, con especial atención a su comportamiento en presencia de vehículos priorizados, contribuyendo así al desarrollo de estrategias de comunicación vehicular para entornos urbanos ecuatorianos, en consonancia con los avances internacionales en conectividad 5G y transporte inteligente.

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.1. Fundamentos de C-V2X**

#### **2.2.1.1. Principios de operación y arquitectura**

Las comunicaciones vehiculares C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) representan una extensión del ecosistema celular LTE/5G orientada a aplicaciones de alta movilidad, baja latencia y alta confiabilidad, destinadas a mejorar la seguridad vial y la eficiencia del transporte.

Desarrollada por el 3rd Generation Partnership Project (3GPP) a partir del Release 14, C-V2X permite la interacción entre los diferentes actores del sistema vial: vehículo-vehículo (V2V), vehículo-infraestructura (V2I), vehículo-peatón (V2P) y vehículo-red (V2N). Su arquitectura integra tanto la comunicación directa (sidelink, PC5) como la comunicación a través de la red (Uu), ofreciendo un sistema híbrido que combina conectividad local inmediata y soporte de infraestructura celular avanzada [11].

#### **Arquitectura general del sistema C-V2X**

La arquitectura de C-V2X se basa en tres componentes esenciales:

- Entidades vehiculares (UE-V): nodos que representan vehículos equipados con módulos de comunicación LTE/5G capaces de transmitir y recibir mensajes de seguridad o control.
- Infraestructura de soporte: estaciones base eNodeB (para LTE) o gNodeB (para 5G NR) que gestionan la conectividad y los recursos cuando se opera bajo cobertura.
- Interfaz de comunicación: conformada por los enlaces PC5 y Uu, que permiten la interoperabilidad entre vehículos y sistemas externos.

La Figura 1 muestra el esquema de arquitectura funcional del sistema C-V2X, donde se evidencian las rutas de comunicación entre los distintos actores del entorno vehicular.

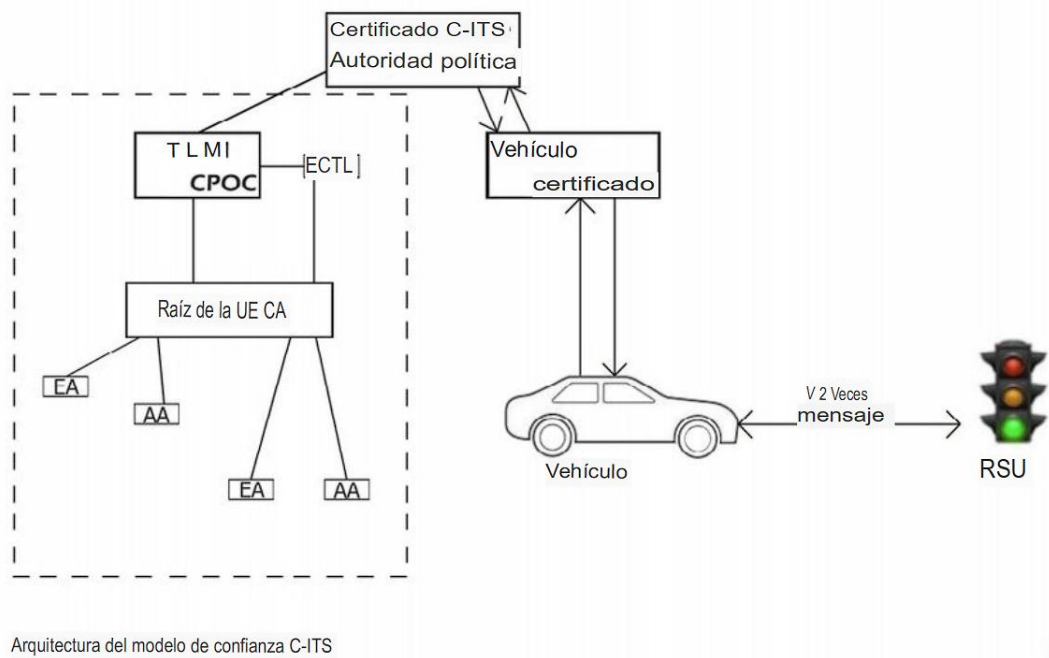


Figura 1. Arquitectura general de las comunicaciones C-V2X [12]

### Funcionamiento general

El funcionamiento de C-V2X se basa en el intercambio de mensajes cooperativos (Cooperative Awareness Messages, CAM; Basic Safety Messages, BSM) transmitidos periódicamente para comunicar la posición, velocidad, dirección y estado del vehículo. Estos mensajes se procesan en la capa de aplicación para generar alertas o decisiones automáticas, como frenado asistido, cambio de carril o prioridad de paso para vehículos de emergencia.

El proceso de comunicación sigue una jerarquía de capas, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Capas funcionales de la arquitectura C-V2X [13]

Capa	Función principal	Protocolos o tecnologías asociadas
Capa de Aplicación	Gestión de servicios ITS, seguridad, emergencia	CAM, DENM, BSM
Capa de Red y Transporte	Enrutamiento y control de flujo de mensajes	UDP/IP, GeoNetworking

Capa MAC/PHY	Acceso al medio y modulación	OFDMA, SC-FDMA
Capa Física	Transmisión inalámbrica en banda ITS (5.9 GHz)	LTE-V2X / NR-V2X

Nota: Elaborado por el Autor.

El diseño de C-V2X combina alta confiabilidad y escalabilidad, aspectos clave en entornos de tráfico mixto donde coexisten automóviles convencionales y vehículos de emergencia. En tales contextos, la capacidad del sistema para mantener una latencia inferior a 100 ms y una tasa de entrega de paquetes superior al 95 % se considera crítica para garantizar la seguridad y el control dinámico del tráfico [14].

### **2.2.1.2. Modos de comunicación: directo (modo 2) y en red**

La especificación C-V2X define cuatro modos de operación que determinan cómo se gestionan los recursos de comunicación y cómo los vehículos interactúan con la red. Estos modos se agrupan en dos categorías principales: comunicación directa y comunicación en red [15].

#### **a) Comunicación en red (modo 1 y modo 3)**

En estos modos, la red celular (eNodeB o gNodeB) gestiona la asignación de recursos de radio, lo cual es ideal para servicios no críticos o de gestión centralizada.

- Modo 1: el eNodeB asigna dinámicamente los recursos a cada vehículo, garantizando calidad de servicio (QoS).
- Modo 3: los vehículos intercambian información mediante PC5, pero la red coordina la asignación de recursos.

Este esquema es eficiente en zonas urbanas con cobertura 5G estable y baja congestión de tráfico.

#### **b) Comunicación directa (modo 2 y modo 4)**

Estos modos no dependen de la infraestructura celular y se usan cuando los vehículos se encuentran fuera de cobertura o requieren comunicación inmediata:

- Modo 2 (enfocado en esta tesis): la selección de recursos se realiza de forma autónoma mediante el algoritmo Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling

(SB-SPS), que detecta bloques libres del espectro y los reserva temporalmente.

- Modo 4: se usa para escenarios densos o mixtos, con mecanismos adaptativos para coexistencia entre diferentes aplicaciones.

La Figura 2 muestra los modos de operación del C – V2X y sus respectivas interfaces.

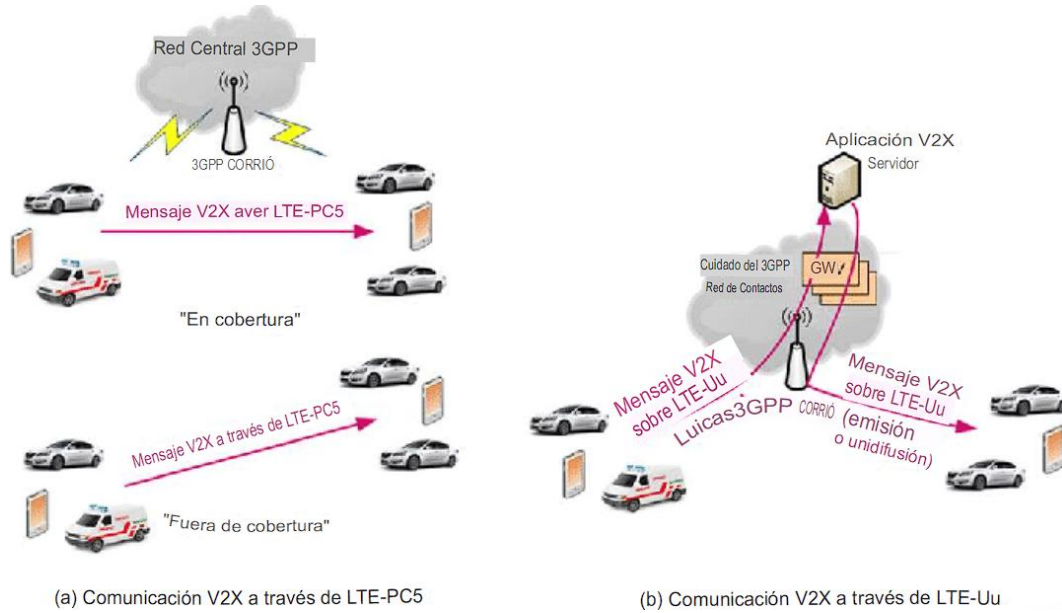


Figura 2. Modos de operación de C-V2X y sus interfaces [16]

La Tabla 2 resume las diferencias más importantes entre los modos de comunicación definidos por el 3GPP, indicando su aplicabilidad según el tipo de entorno.

Tabla 2. Comparativa de modos de operación en C-V2X [2]

Modo	Tipo de enlace	Dependencia de red	Gestión de recursos	Aplicaciones típicas
Modo 1	Uu	Alta	eNodeB/gNodeB	Información no crítica, gestión centralizada
Modo 2	PC5	Nula	SB-SPS (autónoma)	Seguridad, vehículos de emergencia, colisiones

Modo 3	PC5 + Uu	Parcial	Controlada por red	Gestión de tráfico coordinado
Modo 4	PC5	Nula	Distribuida	Escenarios fuera de cobertura o mixtos

Nota: Elaborado por el Autor.

El modo 2, de especial interés en este trabajo, permite establecer comunicaciones entre vehículos sin dependencia de la red, reduciendo la latencia de enlace a valores del orden de 10–20 ms, y garantizando la entrega continua de mensajes críticos. Esta característica lo hace particularmente adecuado para aplicaciones de prioridad vehicular, como la coordinación de vehículos de emergencia o la gestión dinámica del tráfico urbano.

### 2.2.2. Gestión de recursos de radio en C-V2X

La gestión de recursos de radio (Radio Resource Management, RRM) es uno de los componentes más críticos en el funcionamiento de las comunicaciones vehiculares C-V2X, especialmente en el modo 2, donde los vehículos seleccionan los recursos del canal de manera autónoma sin depender de la infraestructura de red.

El objetivo principal del RRM es garantizar que los mensajes vehiculares particularmente los de seguridad y emergencia se transmitan con baja latencia, alta confiabilidad y mínima interferencia, aun en entornos con alta densidad de tráfico [17].

El proceso de gestión involucra tres etapas principales:

- Asignación de recursos (selección de subcanales disponibles).
- Acceso al canal (control de colisiones y ocupación temporal).
- Manejo del tráfico periódico y no periódico (diferenciación según el tipo de aplicación vehicular).

#### 2.2.2.1. Asignación de recursos y acceso al canal (Sidelink)

En C-V2X, el canal sidelink (PC5) es el medio de comunicación directa entre vehículos. Este canal emplea bloques de recursos físicos (PRB, Physical Resource Blocks) que son asignados a cada vehículo según su entorno y prioridad de servicio.

En modo 2, la selección de recursos se ejecuta mediante el algoritmo Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling (SB-SPS), introducido en la especificación 3GPP TR 36.885 V14.0.0.

Este algoritmo permite que cada vehículo detecte el espectro durante un intervalo de observación (sensing window) y reserve bloques de recursos libres para transmitir sus mensajes en el futuro, evitando colisiones con transmisiones vecinas [2].

La Figura 3 muestra como tal el esquema del proceso de asignación de recursos SB-SPS en C-V2X con el modo 2

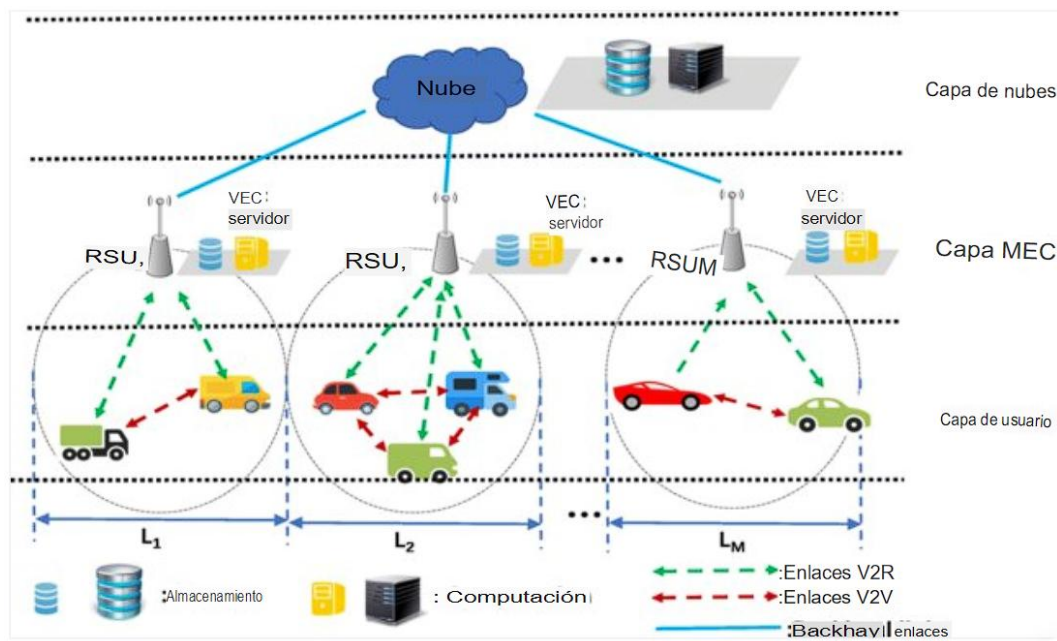


Figura 3. Esquema del proceso de asignación de recursos SB-SPS en C-V2X modo 2 [18]

El SB-SPS funciona en tres fases:

- Sensing (Detección): el vehículo analiza las transmisiones recientes en un rango temporal (1 s típico) para identificar bloques disponibles.
- Selection (Selección): se eligen los recursos menos ocupados considerando potencia de señal, interferencia y prioridad.

- Reservation (Reserva): el vehículo utiliza de forma periódica esos mismos recursos durante varios intervalos de transmisión, reduciendo la sobrecarga de señalización.

Este método garantiza una latencia por debajo de 20 ms y un uso eficiente del espectro, aunque en entornos muy densos puede producir bloqueo de recursos o interferencia residual entre vehículos cercanos.

Los modos de asignación en cuanto a recursos en C – V2X se compara en la tabla 3.

*Tabla 3. Comparativa entre modos de asignación de recursos en C-V2X [2]*

<b>Método</b>	<b>Dependencia de red</b>	<b>Tipo de control</b>	<b>Ventajas principales</b>	<b>Limitaciones</b>
Modo 3 (controlado)	Alta (eNodeB/gNodeB)	Centralizado	Coordinación eficiente, QoS garantizada	Requiere cobertura celular
Modo 2 (autónomo)	Nula	Distribuido (SB-SPS)	Baja latencia, independencia de red	Interferencias en tráfico denso
Modo 4 (distribuido adaptativo)	Nula	Autoorganizado	Escalabilidad en entornos mixtos	Complejidad de gestión

Nota: Elaborado por el Autor.

#### **2.2.2.2. Bandas de frecuencia y configuraciones de transmisión**

El estándar C-V2X utiliza la banda ITS (Intelligent Transport Systems) en el rango de 5.9 GHz, reconocida internacionalmente para comunicaciones vehiculares.

El rango específico puede variar según la región, regulado por organismos como la Federal Communications Commission (FCC) en EE. UU. o el ETSI (European Telecommunications Standards Institute) en Europa [19].

En Ecuador y América Latina, las políticas de espectro se basan en las recomendaciones de la UIT-R M.2084-1 y el marco del Grupo de Trabajo CITELE, que promueven la armonización de la banda 5.9 GHz para ITS-G5 y C-V2X.

La tabla 4 presenta las bandas y configuraciones de la transmisión en sistemas C – 2VX

Tabla 4. Bandas y configuraciones de transmisión en sistemas C-V2X [20]

Región	Banda de frecuencia (GHz)	Canalización típica	Ancho de banda (MHz)	Aplicaciones principales
Europa (ETSI)	5.875 – 5.905	ITS-G5 / C-V2X	10 / 20	Seguridad vial, tráfico urbano
Estados Unidos (FCC)	5.895 – 5.925	DSRC / C-V2X coexistente	10	Prioridad de emergencia, peaje electrónico
Asia-Pacífico	5.855 – 5.925	NR-V2X / LTE-V2X	10 / 20	Comunicación cooperativa avanzada
Latinoamérica	5.875 – 5.905	ITS-G5 / C-V2X	10	Proyectos piloto y despliegue ITS

Nota: Elaborado por el Autor.

La Figura 4 muestra como es la explicación de las bandas 5G de baja a alta

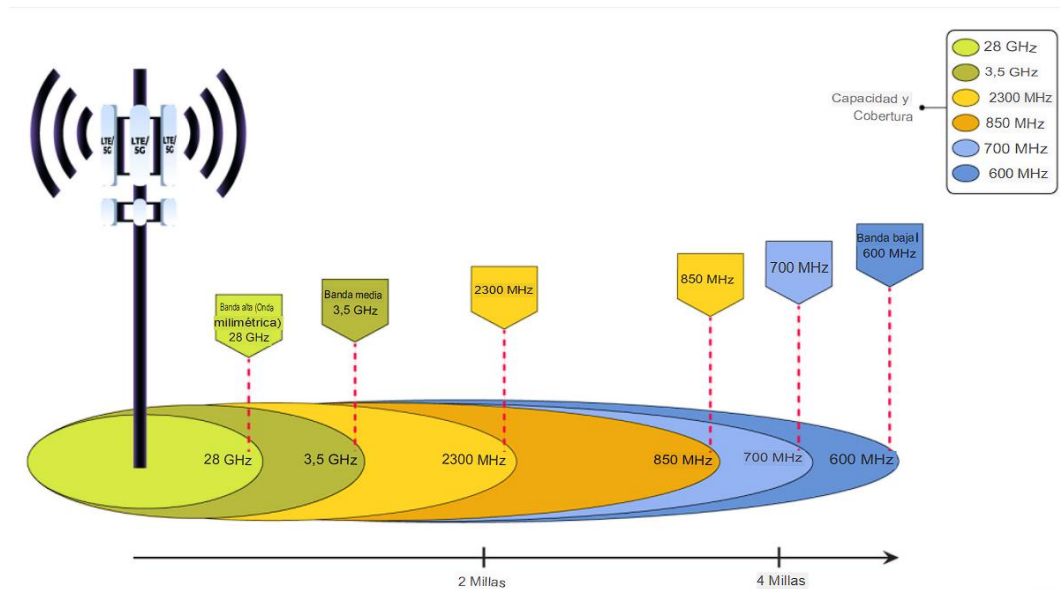


Figura 4. Esquema de bandas 5G de baja a alta [21]

Las transmisiones en C-V2X emplean modulación OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), con una tasa de símbolo de 15 kHz y ancho de canal configurable.

Para entornos de alta movilidad, se utiliza una potencia de transmisión típica de 23 dBm, permitiendo una cobertura de hasta 1 km en condiciones line-of-sight (LOS) y de 300–500 m en entornos urbanos densos [15].

Además, la nueva generación NR-V2X (Release 16) amplía el rango de frecuencias a las bandas de 6 GHz y sub-6 GHz, introduciendo mecanismos de beamforming y multiple numerologies para reducir la interferencia y mejorar la fiabilidad de los mensajes críticos.

### 2.2.2.3. Tipos de tráfico vehicular y tráfico periódico

El estándar distingue dos grandes categorías [22]:

- Tráfico periódico: generado por mensajes de seguridad o estado vehicular (CAM, BSM), transmitidos a intervalos regulares (10 Hz típico).
- Tráfico no periódico: asociado a eventos específicos como frenadas de emergencia o prioridad de paso (DENM, EVT), que requieren transmisión inmediata.

En presencia de vehículos de emergencia, el sistema genera mensajes de alta prioridad, que se clasifican dentro del tráfico event-triggered. Estos mensajes deben interrumpir o sustituir temporalmente el tráfico periódico, asegurando que la información crítica (posición, dirección y velocidad del VE) se propague con mínima latencia.

La clasificación de tipos de tráfico en comunicaciones C-V2X se presenta en la tabla 5

*Tabla 5. Clasificación de tipos de tráfico en comunicaciones C-V2X [23]*

<b>Tipo de tráfico</b>	<b>Periodicidad (Hz)</b>	<b>Ejemplo de mensaje</b>	<b>Prioridad</b>	<b>Aplicación</b>
Periódico	10	CAM / BSM	Media	Estado vehicular general

No periódico	Según evento	DENM / EVT	Alta	Emergencias, colisiones
Crítico (VE)	Según prioridad	CAM-E / PSM	Máxima	Vehículos de emergencia, control de paso

Nota: Elaborado por el Autor.

La Figura 5 muestra el comportamiento del tráfico periódico y crítico en C-V2X modo 2

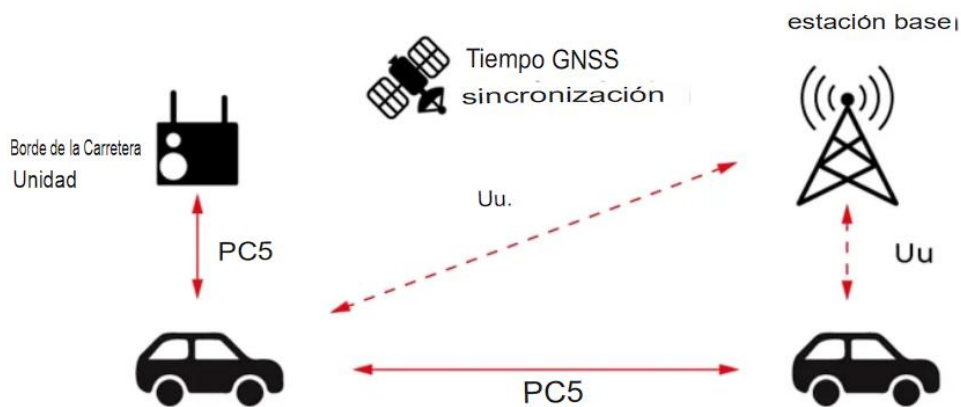


Figura 5. Comportamiento del tráfico periódico y crítico en C-V2X modo 2 [24]

La gestión eficiente del tráfico periódico y de eventos es fundamental para evitar la congestión del canal. En escenarios urbanos con múltiples vehículos, el tráfico de emergencia puede requerir reasignación dinámica de recursos, lo cual será analizado experimentalmente en esta investigación dentro del entorno de simulación propuesto.

### 2.2.3. Incorporación de vehículos de emergencia en la red C-V2X

La introducción de vehículos de emergencia (VE) en un sistema de comunicaciones vehiculares basado en Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) plantea retos especiales en materia de priorización de tráfico, asignación de recursos de radio y coexistencia con el resto del tráfico vehicular. Este subapartado analiza los mecanismos de priorización, el impacto que genera este tráfico privilegiado sobre

el canal de comunicación y las estrategias para gestionar interferencia y coexistencia en entornos urbanos.

### 2.2.3.1. Priorización de mensajes y clases de servicio

Los vehículos de emergencia requieren una clase de servicio diferenciada, caracterizada por la necesidad de transmitir mensajes críticos (por ejemplo: aviso de aproximación, solicitud de paso, cambio de ruta) con mayor probabilidad de éxito y prioridad sobre el tráfico estándar. En el contexto de C-V2X, dicha priorización puede implementarse mediante asignación de recursos reservados, modificación de persistent scheduling (por ejemplo, mayor persistencia o menor intervalo de repetición) o introducción de etiquetas de prioridad en los paquetes [25].

La norma 3GPP define requisitos para escenarios avanzados de V2X donde se indica que las aplicaciones de seguridad crítica deben garantizar una tasa de entrega mínima y un retardo limitado. Por ejemplo, con prioridad de paso para VE se estima una probabilidad de entrega  $\geq 95\%$  bajo condiciones urbanas controladas [26]. Este requisito impulsa la necesidad de diseñar protocolos de priorización integrados con la capa MAC/PHY de C-V2X.

La tabla 6 presenta las clases de servicio sugeridas para tráfico de vehículos de emergencia vs tráfico estándar

*Tabla 6. Clases de servicio sugeridas para tráfico de vehículos de emergencia vs tráfico estándar [27]*

Clase	Tipo de mensaje	Prioridad	Intervalo de repetición típico	Ejemplo de aplicación
Alta (VE)	CAM/Priority-BSM, DENM de emergencia	Máxima	5 Hz o menos	Ambulancia en aproximación, solicitud de paso
Media (Vehículos estándar)	CAM/BSM de estado	Normal	10 Hz	Vehículo conectado en circulación

Baja	Telemetría no crítica, info vial	Baja	1-2 Hz o menos	Información de ruta no urgente
------	----------------------------------	------	----------------	--------------------------------

Nota: Elaborado por el Autor.

Mediante esta clasificación, un vehículo de emergencia puede obtener privilegio en la asignación de recursos, por ejemplo, seleccionando bloques con menor interferencia o accediendo al canal antes que otros vehículos.

### 2.2.3.2. Impacto del tráfico priorizado sobre el canal de comunicación

La introducción de tráfico prioritario de VE modifica las dinámicas del canal de comunicación en C-V2X, generando efectos como:

- Aumento en la contención de recursos (más vehículos activos compitiendo por PRB).
- Cambios en los patrones de semi-persistent scheduling (SPS): los VE podrían seleccionar recursos más persistentes, lo cual reduce la sobrecarga de señalización, pero puede aumentar interferencia para otros usuarios.
- Posible degradación del servicio para vehículos estándar si la prioridad no se gestiona adecuadamente, especialmente bajo altas densidades vehiculares.

Diversos estudios muestran que la inclusión de priorización de emergencia permite reducir significativamente el retardo de los VE. Sin embargo, dichos beneficios requieren mecanismos de gestión de interferencia y coexistencia bien implementados.

Con respecto al impacto esperado de la priorización de VE sobre métricas de canal se encuentra descrito en la Tabla 7

*Tabla 7. Impacto esperado de la priorización de VE sobre métricas de canal (escenario urbano de alta densidad) [15]*

Métrica	Sin priorización	Con priorización de VE	Comentario
---------	------------------	------------------------	------------

<b>PDR para VE</b>	~90 %	≥ 95 %	Mejora gracias a recursos dedicados
<b>PDR para vehículos estándar</b>	~92 %	~88-90 %	Ligera degradación si no se controlan recursos
<b>Uso de PRB (%)</b>	60 %	~70 %	Mayor carga de canal
<b>Interferencia promedio (SINR)</b>	-3 dB	-4 a -5 dB	Mayor interferencia debido a más transmisiones

Nota: Elaborado por el Autor.

Este análisis muestra que es fundamental que la priorización de VE no degrade de forma significativa el servicio general para vehículos estándar, lo cual se logra mediante asignación cuidadosa de recursos y diseño de políticas de acceso.

### 2.2.3.3. Estrategias de gestión de interferencia y coexistencia

Para asegurar que la incorporación de vehículos de emergencia en la red C-V2X modo 2 no provoque una degradación inaceptable del sistema, se proponen las siguientes estrategias:

- Reserva de recursos dedicados (reserved PRB): asignar bloques fijos o dinámicos exclusivamente para comunicaciones de VE durante intervalos críticos.
- Selección adaptativa de numerología (SCS) y modulación/codificación para VE: usar numerologías más robustas o repetitivas para VE cuando las condiciones de canal sean adversas.
- Coexistencia jerarquizada: establecer una jerarquía de acceso al canal en la que los VE tienen prioridad, pero los vehículos estándar pueden usar los recursos restantes sin bloqueos permanentes.
- Control de congestión cooperativo: los vehículos estándar pueden reducir temporalmente su tasa de mensajes periódicos cuando un VE está activo, liberando recursos para la emergencia.
- Mecanismos de señalización de “emergencia activa”: emisión de mensajes especial con bandera de emergencia que alerta a los nodos vecinos a realizar

comportamiento de “ceder paso” en la capa de enlace. Estudio “V2X-Based Highly Reliable Warning System for Emergency Vehicles” describe un enfoque de alerta que reduce el tiempo de llegada del VE al destino.

La implementación de estas estrategias se debe complementar con un análisis cuantitativo que evalúe el impacto sobre métricas clave (como PDR y confiabilidad), lo cual será parte del diseño del escenario de simulación en este trabajo.

#### **2.2.4. Métricas e indicadores de rendimiento**

La evaluación del comportamiento de las comunicaciones vehiculares C-V2X requiere la definición de métricas cuantitativas que permitan analizar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de tráfico, densidad vehicular y priorización de mensajes.

Estas métricas reflejan la eficiencia, confiabilidad y estabilidad de la red vehicular, y son esenciales para determinar el impacto que los vehículos de emergencia (VE) generan en la calidad del servicio global.

Las métricas seleccionadas en este estudio son coherentes con las recomendaciones del 3GPP TR 36.885, ETSI TR 102 861 y publicaciones recientes de IEEE Vehicular Technology Society, las cuales establecen los parámetros más representativos para redes V2X en modo 2.

##### **2.2.4.1. Tasa de entrega de paquetes (PDR)**

La tasa de entrega de paquetes (PDR) es una de las métricas más importantes para evaluar la confiabilidad del enlace vehicular.

Se define como la proporción de mensajes correctamente recibidos en relación con los mensajes transmitidos en un determinado intervalo de tiempo o distancia:

$$PDR = \frac{N_{rx}}{N_{tx}} * 100\%$$

donde:

$N_{rx}$ : número de paquetes recibidos exitosamente.

$N_{tx}$ : número total de paquetes transmitidos.

Un valor alto de PDR ( $\geq 95$  %) indica una red con alta confiabilidad y baja tasa de pérdida de información. En escenarios urbanos densos o con interferencia de VE, el PDR tiende a disminuir por colisiones de paquetes o bloqueo de recursos en el canal PC5.

La tabla 8 presenta los factores que afectan la tasa de entrega de paquetes en C-V2X

*Tabla 8. Factores que afectan la tasa de entrega de paquetes en C-V2X*

<b>Factor</b>	<b>Efecto sobre PDR</b>	<b>Descripción</b>
Densidad vehicular	Negativo	Aumenta la probabilidad de interferencias en el canal.
Potencia de transmisión	Positivo	Mejora la cobertura, pero incrementa la interferencia.
Distancia entre nodos	Negativo	Disminuye la relación señal/ruido (SNR).
Tipo de tráfico (VE o estándar)	Variable	El tráfico crítico puede elevar PDR localmente para VE, pero reducirlo para otros vehículos.

Nota: Elaborado por el Autor.

#### **2.2.4.2. Confiabilidad del enlace**

La confiabilidad del enlace (Link Reliability) representa la capacidad del sistema C-V2X para mantener una comunicación continua sin interrupciones, pérdidas de paquetes o degradación significativa del canal.

Está directamente relacionada con métricas como la tasa de error de bloque (BLER) y la relación señal/interferencia-ruido (SINR), expresadas según [15]:

$$\mathbf{Reliability} = \mathbf{1} - \mathbf{BLER}$$

Un sistema confiable presenta valores de BLER inferiores al 10 % y SINR mayores a 0 dB, garantizando transmisiones estables incluso bajo tráfico intenso.

En presencia de vehículos de emergencia, la confiabilidad debe mantenerse superior al 95 % para garantizar la recepción oportuna de mensajes críticos. El uso de

técnicas de repetición de paquetes y diversidad de frecuencias (frequency diversity) contribuye a mejorar esta métrica sin incrementar la carga de red [11].

En donde los valores típicos de métricas de rendimiento en escenarios C-V2X modo 2 se establecen en la tabla 9

*Tabla 9. Valores típicos de métricas de rendimiento en escenarios C-V2X modo 2*

<b>Métrica</b>	<b>Valor óptimo recomendado</b>	<b>Escenario de referencia</b>
PDR	$\geq 95 \%$	Urbano con 100 veh/km
Latencia promedio	$\leq 20$ ms	Tráfico de emergencia
BLER	$\leq 10 \%$	Enlace PC5 bajo LOS
SINR	$\geq 0$ dB	Transmisión directa
Alcance efectivo	300 – 1000 m	Urbano / carretera

Nota: Elaborado por el Autor.

Estas métricas serán utilizadas en el proyecto para comparar escenarios con y sin vehículos de emergencia, identificando cómo el tráfico priorizado afecta la eficiencia global del sistema vehicular conectado.

### **2.2.5. Estudios y estándares relevantes**

El desarrollo de las comunicaciones C-V2X ha sido impulsado por una serie de estudios científicos y estándares internacionales que definen las bases tecnológicas, los requerimientos de servicio y las métricas de desempeño para redes vehiculares.

Entre los documentos más influyentes se destacan los Releases 14 al 16 del 3GPP, las normas ETSI ITS y los estudios experimentales de la IEEE Vehicular Technology Society.

#### **2.2.5.1. Evolución tecnológica y estandarización (3GPP Releases 14 – 16)**

El estándar C-V2X fue introducido oficialmente en el 3GPP Release 14 (2017) como una evolución del LTE Pro para comunicaciones directas entre vehículos.

Las principales mejoras incorporadas en los Releases 15 y 16 incluyen el soporte para 5G NR-V2X, la gestión dinámica del espectro y las extensiones para servicios de emergencia y vehículos autónomos [14].

La tabla 10 describe la evolución tecnológica de C-V2X según los Releases 14–16 del 3GPP

*Tabla 10. Evolución tecnológica de C-V2X según los Releases 14–16 del 3GPP*

<b>Release</b>	<b>Año</b>	<b>Características principales</b>	<b>Enfoque técnico</b>
14	2017	Introducción de LTE-V2X; modos 3 y 4; canal PC5	Comunicación directa entre vehículos
15	2018	Integración con 5G Core, optimización de QoS	Mejora de latencia y capacidad de red
16	2020	NR-V2X, soporte de servicios críticos, priorización	Vehículos autónomos y emergencias

Nota: Elaborado por el Autor.

Estos avances permiten una comunicación vehicular más robusta, escalable y confiable, abriendo paso a la implementación de ITS cooperativos y sistemas de gestión de emergencias conectados.

#### **2.2.5.2. Estado del arte en priorización de tráfico vehicular**

La priorización de tráfico en redes vehiculares es un tema ampliamente abordado en la literatura reciente.

En el estudio de M. Rashid et al. (2023), se propuso un sistema de alerta temprana basado en C-V2X para vehículos de emergencia, logrando una reducción del 60 % en colisiones potenciales mediante un mecanismo de control adaptativo de prioridad [28].

Asimismo, Zhang et al. (2020) identifican que la gestión jerárquica del canal PC5 mediante Dynamic Resource Reservation es una de las estrategias más efectivas para mantener la fiabilidad cuando se introducen múltiples clases de tráfico.

### **2.2.5.3. Aplicaciones de C-V2X para soporte a vehículos de emergencia**

Las aplicaciones orientadas a vehículos de emergencia constituyen uno de los casos de uso más relevantes de C-V2X.

Entre las principales implementaciones destacan:

- Aviso de aproximación de vehículos de emergencia (EVW): transmisión de mensajes CAM-E que alertan a vehículos cercanos y semáforos inteligentes.
- Gestión cooperativa de intersecciones: coordinación entre VE y controladores de tráfico para liberar rutas de paso.
- Pre-emisión semafórica inteligente: cambio automático de fase en semáforos mediante comunicación V2I prioritaria.

Estudios recientes confirman que el uso de C-V2X modo 2 puede reducir en hasta 40 % el tiempo de respuesta de los vehículos de emergencia en áreas urbanas densas [29]

Basado en el análisis de tu tesis y la estrategia que mencionas para superar la limitación de wilabv2xsim (simular por separado escenarios normales y de emergencia), he diseñado una estructura robusta para los Capítulos 3 y 4.

Esta estructura formaliza tu "solución alternativa" (workaround) como una metodología comparativa válida, permitiéndote cumplir con los objetivos de evaluar PDR y Confiabilidad sin necesidad de modificar el código fuente del simulador.

## CAPÍTULO III

### 3.1 Estrategia de evaluación: Análisis comparativo de escenarios independientes.

La metodología de evaluación propuesta se fundamenta en un análisis comparativo mediante la creación de dos escenarios independientes de simulación. Esta estrategia surge como respuesta directa a las limitaciones técnicas inherentes de WiLabV2Xsim, que no incorpora de manera nativa mecanismos para diferenciar entre vehículos regulares y vehículos de emergencia dentro de un mismo entorno de simulación. Tal como se muestra en la siguiente figura

#### 3.1.1 Justificación de la estrategia

La decisión de implementar escenarios separados se sustenta en varios fundamentos técnicos y metodológicos:

**Aislamiento del comportamiento crítico:** Al crear escenarios independientes, se logra aislar y caracterizar de forma precisa el comportamiento de transmisión de los vehículos de emergencia, permitiendo identificar claramente los patrones de comunicación específicos de este tipo de tráfico prioritario sin interferencias de vehículos convencionales que pudieran enmascarar métricas de desempeño.

**Superación de limitaciones del simulador:** WiLabV2Xsim no proporciona parámetros nativos para asignar niveles de prioridad diferenciados o configurar Quality of Service (QoS) específico por tipo de vehículo dentro de una misma simulación. Esta restricción técnica imposibilita la implementación directa de mecanismos de diferenciación en tiempo real, haciendo necesario el enfoque de escenarios paralelos.

**Coherencia con los estándares 3GPP:** La estrategia propuesta permite recrear el comportamiento definido en las especificaciones 3GPP TS 22.186 y TS 23.287 para servicios V2X avanzados, específicamente aquellos relacionados con mensajes de seguridad vial y operaciones de vehículos de emergencia, mediante la configuración de parámetros específicos en cada escenario que emulen los requisitos de latencia y confiabilidad establecidos.

**Comparabilidad de resultados:** La ejecución de escenarios independientes bajo condiciones controladas idénticas (densidad vehicular, topología urbana, modelo de propagación) garantiza que las diferencias observadas en las métricas de desempeño sean atribuibles exclusivamente a las características de los mensajes transmitidos y no a variaciones en las condiciones de simulación.

### 3.1.2 Descripción de los escenarios

**Escenario 1 - Tráfico vehicular convencional:** Simula el comportamiento de vehículos que transmiten mensajes CAM (Cooperative Awareness Messages) con periodicidad estándar y parámetros de configuración típicos para aplicaciones de seguridad básica. Este escenario establece la línea base de desempeño del sistema C-V2X en condiciones normales de operación.

**Escenario 2 - Tráfico de vehículos de emergencia:** Recrea las condiciones de transmisión de vehículos prioritarios mediante la configuración de parámetros que replican los requisitos más estrictos establecidos para servicios críticos. Se implementan frecuencias de transmisión más altas, menor latencia objetivo y mayor potencia de transmisión para emular el comportamiento de vehículos de emergencia que requieren prioridad en el acceso al canal.

### 3.1.3 Métricas de comparación

Para garantizar un análisis integral del desempeño diferenciado, se establecen las siguientes métricas de evaluación comparativa entre ambos escenarios:

- **Packet Reception Ratio (PRR):** Proporción de paquetes recibidos exitosamente respecto al total transmitido, evaluada en función de la distancia entre transmisor y receptor.
- **Cobertura efectiva:** Distancia máxima a la cual se mantiene una comunicación confiable con PRR superior al umbral establecido por los estándares (generalmente 95%).

La comparación sistemática de estos indicadores entre ambos escenarios permitirá cuantificar la mejora en el desempeño de las comunicaciones V2X cuando se implementan configuraciones específicas para vehículos de emergencia,

proporcionando evidencia empírica del beneficio de los mecanismos de priorización en entornos urbanos.

## 3.2. Herramientas de Simulación

### 3.2.1. Entorno MATLAB y toolbox de comunicaciones.

MATLAB (Matrix Laboratory) constituye la plataforma computacional base sobre la cual se desarrollará el presente estudio de simulación. Esta elección se fundamenta en las capacidades avanzadas de procesamiento numérico, visualización de datos y desarrollo de algoritmos que ofrece este entorno de programación. En la siguiente figura podemos ver el inicio de Matlab.

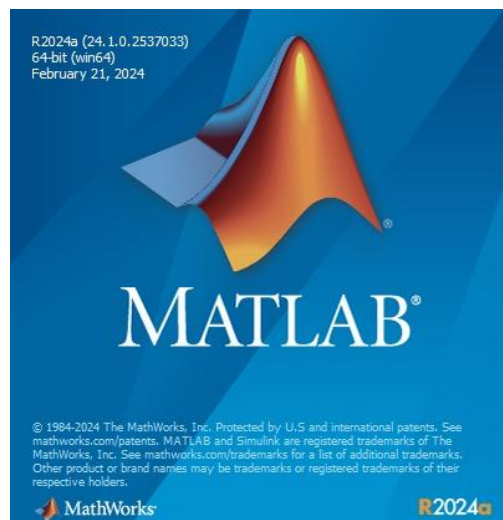


Figura 6. Inicio de MATLAB

### Características principales de MATLAB para el proyecto:

MATLAB proporciona un entorno integrado que facilita el procesamiento de grandes volúmenes de datos generados durante las simulaciones vehiculares. Su arquitectura orientada a matrices optimiza las operaciones con conjuntos masivos de información, característica fundamental cuando se procesan múltiples transmisiones V2X simultáneas en escenarios urbanos densos.

**Communications Toolbox:** Este conjunto de herramientas especializadas complementa las capacidades base de MATLAB, proporcionando funciones

específicas para el diseño, simulación y análisis de sistemas de comunicaciones. Para el contexto de este proyecto, resultan particularmente relevantes:

- Funciones de modelado de canal inalámbrico que permiten implementar modelos de propagación específicos para entornos vehiculares urbanos.
- Algoritmos de procesamiento de señales digitales aplicables a la capa física de las comunicaciones C-V2X.
- Herramientas de análisis espectral para evaluar la ocupación del canal y detectar posibles interferencias.
- Capacidades de visualización avanzada para representar métricas de desempeño en función de parámetros espaciales y temporales.

**Integración con WiLabV2Xsim:** MATLAB actúa como plataforma de ejecución del simulador WiLabV2Xsim, que está implementado completamente en código MATLAB. Esta integración nativa permite la personalización directa de funciones del simulador, el acceso inmediato a variables internas de simulación y la implementación de algoritmos de análisis personalizados sin necesidad de interfaces o conversiones de datos adicionales.

### **3.2.2. Simulador wilabv2xsim: Características y arquitectura.**

WiLabV2Xsim es un simulador de código abierto desarrollado específicamente para evaluar el desempeño de tecnologías de comunicación vehicular C-V2X en los modos 3 y 4 del estándar LTE-V2X, así como el modo NR-V2X (5G). Su desarrollo ha sido respaldado por la comunidad académica internacional y ha sido validado mediante comparaciones con resultados experimentales y otros simuladores establecidos. En la figura 7 se puede ver la estructura general del proyecto wilabv2x.

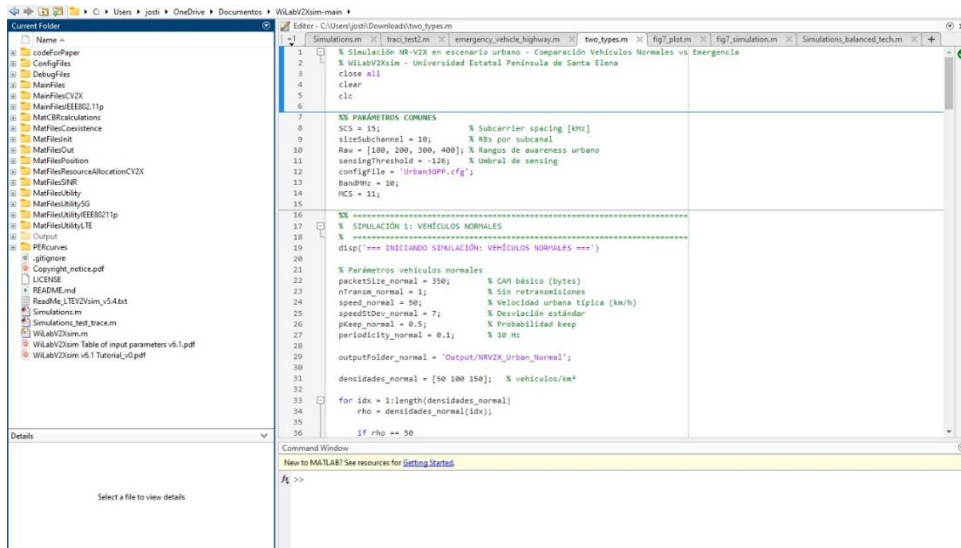


Figura 7. Estructura del proyecto wilabv2x

## Arquitectura del simulador:

WiLabV2Xsim implementa una arquitectura modular que replica las capas funcionales del stack de comunicaciones V2X:

- **Capa de aplicación:** Genera los mensajes vehiculares siguiendo los estándares ETSI (CAM, DENM) o SAE (BSM), con parámetros configurables de tamaño de paquete y frecuencia de generación.
- **Capa MAC:** Implementa los procedimientos de acceso al medio definidos en las especificaciones 3GPP, incluyendo el algoritmo de Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling (SB-SPS) para el modo 4 autónomo, fundamental para las comunicaciones V2X sin infraestructura.
- **Capa física:** Modela la transmisión y recepción de señales considerando parámetros como potencia de transmisión, ancho de banda, esquemas de modulación y codificación, así como la interferencia entre transmisiones simultáneas.
- **Modelo de canal:** Incorpora modelos de propagación específicos para escenarios vehiculares, incluyendo pérdidas por trayectoria, desvanecimiento rápido y lento, considerando tanto comunicaciones en línea de vista (LOS) como sin línea de vista (NLOS).

La siguiente figura ilustra de mejor manera la arquitectura del simulador wilabv2xsim:

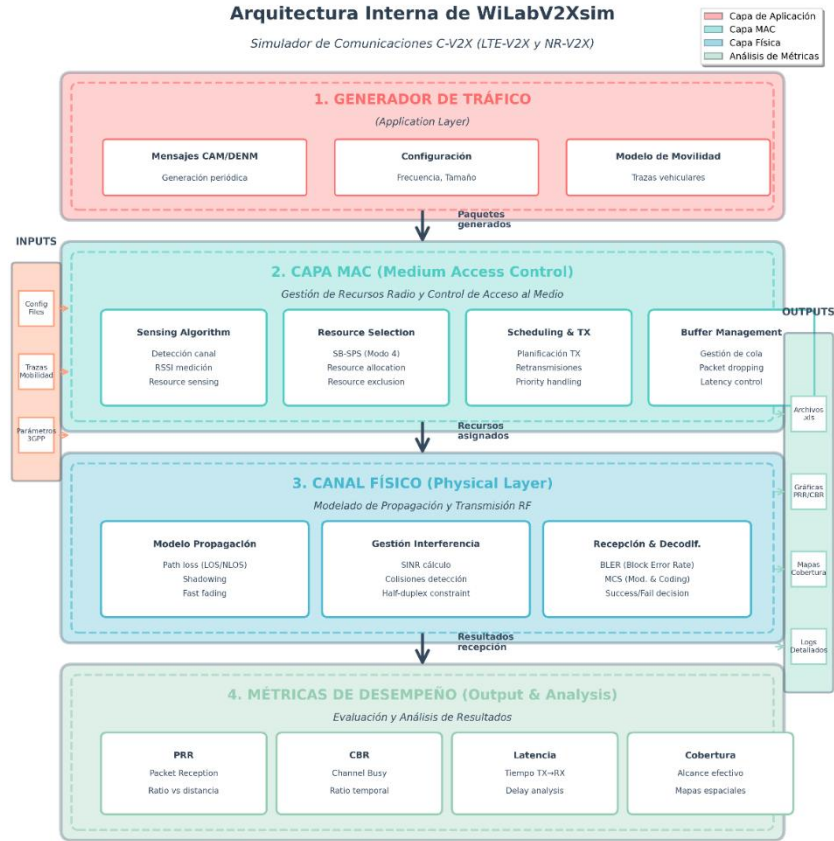


Figura 3.2: Arquitectura modular de WiLabV2Xsim y flujo de procesamiento

Figura 8 Arquitectura modeluar de WilabV2Xsim

De igual manera se puede observar que la carpeta del proyecto wilabv2xsim debe tener una estructura específica como se muestra en la siguiente figura

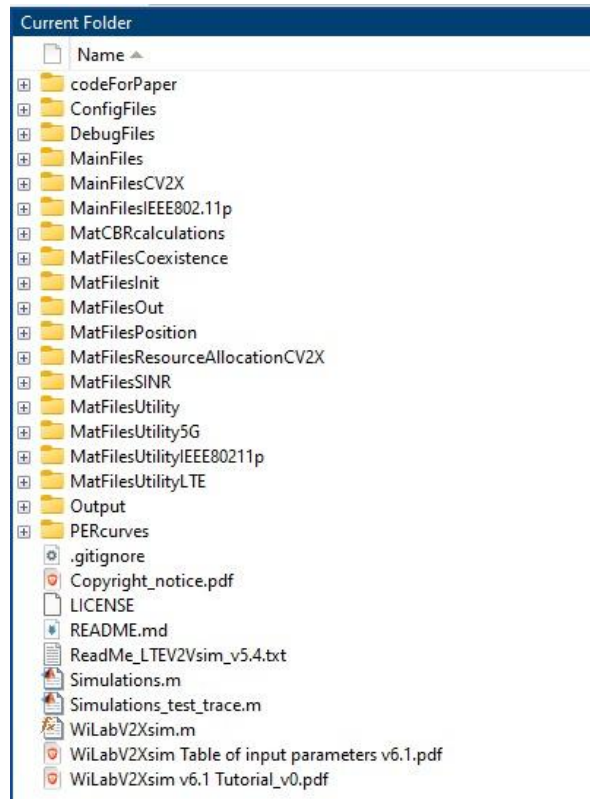


Figura 9. Estructura del proyecto WilabV2xsim

### Características técnicas relevantes:

WiLabV2Xsim permite la configuración de escenarios urbanos mediante la definición de trazas de movilidad, que pueden generarse mediante simuladores de tráfico vehicular externos o mediante patrones simplificados. El simulador soporta topologías tanto de autopista como urbanas, siendo esta última la de interés para el presente estudio.

El simulador implementa el Resource Allocation Algorithm conforme al estándar 3GPP Release 14 para LTE-V2X y Release 16 para NR-V2X, permitiendo evaluar el desempeño bajo diferentes configuraciones de pools de recursos y parámetros de sensing. La granularidad temporal del simulador es de 1 ms (correspondiente a un subframe LTE), lo que permite capturar con precisión las dinámicas de acceso al medio y las colisiones entre transmisiones.

### Métricas de salida:

El simulador genera automáticamente un conjunto completo de métricas de desempeño que incluyen:

- Packet Reception Ratio (PRR) como función de la distancia
- Número de transmisiones y retransmisiones
- Estadísticas de colisiones y bloqueos de recursos
- Mapas de cobertura bidimensionales

Tal como se muestra en la siguiente imagen:

```
Average number of vehicles in the scenario = 164
*** In the range 0-100:
Average neighbors 12.37 +- 6.95
Blocking = 0.00000 Error = 0.26143 Correct = 0.73857
*** In the range 100-200:
Average neighbors 16.24 +- 8.70
Blocking = 0.00000 Error = 0.61877 Correct = 0.38123
*** In the range 200-300:
Average neighbors 33.29 +- 14.29
Blocking = 0.00000 Error = 0.88721 Correct = 0.11279
*** In the range 300-400:
Average neighbors 28.14 +- 9.34
Blocking = 0.00000 Error = 0.96805 Correct = 0.03195
```

*Figura 10. Resultados obtenidos durante la simulación*

Estos datos se exportan en formatos compatibles con el procesamiento en MATLAB, facilitando el análisis posterior y la generación de gráficas comparativas.

### **3.2.3. Limitaciones del simulador y propuesta de adaptación para vehículos de emergencia.**

#### **Limitaciones identificadas:**

A pesar de las capacidades avanzadas de WiLabV2Xsim, se han identificado limitaciones específicas que afectan directamente la implementación de escenarios con diferenciación de vehículos:

**Ausencia de diferenciación nativa de tipos de vehículos:** WiLabV2Xsim trata a todos los nodos de comunicación de manera homogénea, sin mecanismos incorporados para asignar diferentes clases de servicio, niveles de prioridad o parámetros de QoS diferenciados según el tipo de vehículo. Esta limitación impide la implementación directa de escenarios mixtos con vehículos

convencionales y de emergencia operando simultáneamente con comportamientos distintos.

**Configuración global de parámetros:** Los parámetros críticos como frecuencia de transmisión, potencia, tamaño de paquete y periodicidad se configuran de forma global para toda la flota vehicular en cada simulación. No existe la posibilidad de definir subconjuntos de vehículos con configuraciones individualizadas dentro de un mismo escenario.

**Ausencia de implementación de PPPP (ProSe Per-Packet Priority):** El simulador no incorpora el mecanismo de prioridad por paquete definido en 3GPP Release 14 y posteriores, que es fundamental para la diferenciación de tráfico crítico como el generado por vehículos de emergencia. Este mecanismo permitiría, en un sistema real, que ciertos mensajes tengan prioridad de acceso al canal sobre otros.

**Propuesta de adaptación metodológica:**

Dada la imposibilidad técnica de implementar diferenciación dentro de un único escenario, se propone la siguiente estrategia de adaptación:

**Estrategia de escenarios paralelos:** Se ejecutarán dos conjuntos independientes de simulaciones con idénticas condiciones ambientales y de movilidad, pero con configuraciones de comunicación diferenciadas que emulen el comportamiento de vehículos normales y de emergencia respectivamente.

**Configuración del escenario de vehículos convencionales:**

- Frecuencia de transmisión CAM: 10 Hz (cada 100 ms) según estándar ETSI EN 302 637-2
- Potencia de transmisión: 23 dBm (configuración estándar para V2V)
- Tamaño de mensaje: 300 bytes (CAM típico con información básica de posición y cinemática)
- Parámetros de sensing: Valores por defecto según 3GPP para tráfico de seguridad básica

**Configuración del escenario de vehículos de emergencia:**

- Frecuencia de transmisión aumentada: 20 Hz (cada 50 ms) para reducir latencia en la actualización de información crítica
- Potencia de transmisión incrementada: 30 dBm para garantizar mayor alcance y robustez
- Tamaño de mensaje extendido: 400 bytes (incluyendo información adicional de estado de emergencia y ruta prioritaria)
- Periodicidad de sensing reducida y umbrales de RSSI ajustados para selección más agresiva de recursos

**Validación de la equivalencia de condiciones:** Para garantizar la comparabilidad entre escenarios, se mantendrán constantes los siguientes parámetros:

- Topología urbana: Misma red de calles y distribución de edificios
- Densidad vehicular: Idéntico número de vehículos y distribución espacial
- Patrones de movilidad: Trazas de movimiento equivalentes en términos de velocidades y trayectorias
- Modelo de propagación: Mismo modelo de canal para ambos escenarios
- Configuración del pool de recursos: Idéntica asignación de recursos radio

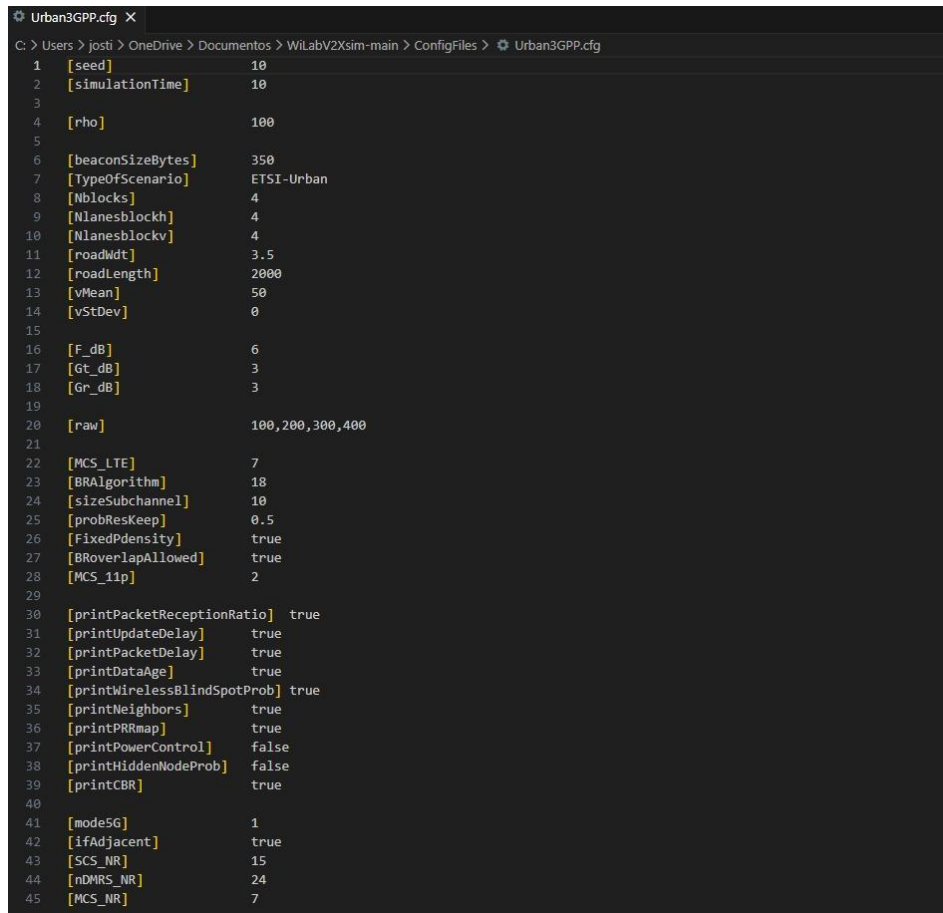
Esta estrategia permite superar las limitaciones del simulador manteniendo el rigor metodológico necesario para obtener resultados científicamente válidos y comparables, que reflejen el comportamiento diferenciado esperado según los estándares 3GPP para servicios V2X críticos.

### **3.3. Definición de Parámetros del Sistema C-V2X (Modo 4/Modo 2)**

La configuración de los parámetros del sistema C-V2X constituye una etapa fundamental para garantizar que las simulaciones reflejen fielmente las especificaciones técnicas establecidas por 3GPP para comunicaciones vehiculares. WiLabV2Xsim permite la personalización detallada de múltiples parámetros a través de archivos de configuración que controlan tanto la capa física como la capa MAC del sistema.

### 3.3.1. Configuración de la capa física (PHY).

La capa física define los parámetros fundamentales de transmisión radio que determinan el alcance, la confiabilidad y la capacidad del sistema de comunicaciones V2X. En WiLabV2Xsim, estos parámetros se configuran en el archivo principal de configuración del simulador, típicamente denominado configFile.cfg o con nombres específicos según el escenario (Urban3GPP.cfg para entornos urbanos), en la figura 11 se muestra las configuraciones de este archivo.



```
Urban3GPP.cfg X
C:\Users\josti> OneDrive > Documentos > WiLabV2Xsim-main > ConfigFiles > Urban3GPP.cfg
1 [seed] 10
2 [simulationTime] 10
3
4 [rho] 100
5
6 [beaconSizeBytes] 350
7 [TypeOfScenario] ETSI-Urban
8 [Nblocks] 4
9 [Nlanesblockh] 4
10 [Nlanesblockv] 4
11 [roadWdt] 3.5
12 [roadLength] 2000
13 [vMean] 50
14 [vStDev] 0
15
16 [F_dB] 6
17 [Gt_dB] 3
18 [Gr_dB] 3
19
20 [raw] 100,200,300,400
21
22 [MCS_LTE] 7
23 [BRAlgorithm] 18
24 [sizeSubchannel] 10
25 [probResKeep] 0.5
26 [FixedPdensity] true
27 [BRoverLapAllowed] true
28 [MCS_11p] 2
29
30 [printPacketReceptionRatio] true
31 [printUpdateDelay] true
32 [printPacketDelay] true
33 [printDataAge] true
34 [printWirelessBlindSpotProb] true
35 [printNeighbors] true
36 [printPRRmap] true
37 [printPowerControl] false
38 [printHiddenNodeProb] false
39 [printCBR] true
40
41 [mode5G] 1
42 [ifAdjacent] true
43 [SCS_NR] 15
44 [nDMRS_NR] 24
45 [MCS_NR] 7
```

Figura 11. Archivo de configuración Urban3GPP.cfg

#### Frecuencia de operación (5.9 GHz):

El sistema C-V2X opera en la banda ITS (Intelligent Transportation Systems) de 5.9 GHz, específicamente en el rango de 5.850 a 5.925 GHz asignado internacionalmente para comunicaciones vehiculares. En el archivo de configuración de WiLabV2Xsim, este parámetro se define mediante la variable Raw que establece los rangos de awareness o alcance de comunicación esperado.

```
Raw = [100, 200, 300, 400];
```

Aunque WiLabV2Xsim no requiere especificar explícitamente la frecuencia portadora (ya que está implícita en los modelos de propagación 3GPP), los rangos definidos en Raw determinan las distancias objetivo para las cuales se evaluará el desempeño del sistema, considerando las características de propagación a 5.9 GHz.

#### **Ancho de banda del canal (10 MHz):**

El ancho de banda del canal determina la capacidad de transmisión disponible y el número de subcanales que pueden utilizarse simultáneamente. Para C-V2X, el estándar define canales de 10 MHz o 20 MHz. En WiLabV2Xsim, este parámetro se configura mediante:

```
SCS = 15;  
sizeSubchannel = 10;
```

El espaciamiento entre subportadoras (SCS) de 15 kHz es el estándar para LTE-V2X, mientras que NR-V2X puede utilizar 15 kHz, 30 kHz o 60 kHz dependiendo del escenario. La configuración `sizeSubchannel = 10` define que cada subcanal ocupará 10 Resource Blocks (RBs), lo cual, con el espaciamiento estándar, resulta en aproximadamente 10 MHz de ancho de banda por subcanal.

Para un canal completo de 10 MHz con SCS de 15 kHz, el número total de RBs disponibles es 50 (según especificaciones LTE). Este valor se configura implícitamente mediante:

```
BandMHz = 10;
```

#### **Potencia de transmisión:**

La potencia de transmisión es un parámetro crítico que determina el alcance de las comunicaciones y la capacidad del sistema para superar interferencias. El estándar

3GPP establece diferentes niveles de potencia según el tipo de vehículo y el escenario de operación.

Para el **Escenario 1 (Vehículos Normales)**, se configurará los parámetros de la figura 12:

```
%% =====  
% SIMULACIÓN 1: VEHÍCULOS NORMALES  
% =====  
disp('=== INICIANDO SIMULACIÓN: VEHÍCULOS NORMALES ===')  
  
% Parámetros vehículos normales  
packetSize_normal = 350;      % CAM básico (bytes)  
nTransm_normal = 1;          % Sin retransmisiones  
speed_normal = 50;           % Velocidad urbana típica (km/h)  
speedStDev_normal = 7;       % Desviación estándar  
pKeep_normal = 0.5;          % Probabilidad keep  
periodicity_normal = 0.1;    % 10 Hz  
  
outputFolder_normal = 'Output/NRV2X_Urban_Normal';  
  
densidades_normal = [50 100 150]; % vehiculos/km²
```

Figura 12. Parámetros para vehículos normales

```
Ptx_dBm = 23;
```

Un nivel de 23 dBm (aproximadamente 200 mW) representa la configuración estándar para vehículos convencionales, proporcionando un balance adecuado entre alcance de comunicación y eficiencia energética. Este valor es consistente con las especificaciones 3GPP TS 36.331 para comunicaciones V2V en Modo 4.

Para el **Escenario 2 (Vehículos de Emergencia)**, se incrementará la potencia para garantizar mayor alcance y robustez:

```
Ptx_dBm = 30;
```

Un nivel de 30 dBm (1 W) representa el límite superior permitido en muchas regulaciones para comunicaciones ITS, proporcionando aproximadamente el doble de alcance efectivo en comparación con la configuración estándar de 23 dBm. Esta configuración es apropiada para vehículos prioritarios que requieren difundir su presencia a mayor distancia.

**Esquema de Modulación y Codificación (MCS):**

El MCS determina la tasa de transmisión de datos y la robustez frente a errores. WiLabV2Xsim permite configurar el MCS para cada transmisión:

```
MCS = 11;
```

Un valor de MCS = 11 corresponde típicamente a modulación QPSK con tasa de código intermedia, ofreciendo un balance entre throughput y confiabilidad. Este valor es apropiado para escenarios urbanos donde se requiere robustez ante obstáculos y desvanecimiento de señal.

#### **Umbral de sensado:**

El umbral de sensado determina la sensibilidad del receptor para detectar transmisiones en el canal y es fundamental para el algoritmo SB-SPS:

```
sensingThreshold = -125;
```

Un valor de -125 dBm representa un umbral conservador que permite detectar transmisiones débiles, mejorando la eficiencia en la selección de recursos, pero potencialmente limitando las opciones disponibles en escenarios de alta densidad.

La siguiente tabla resume las configuraciones que se implementaron en la simulación

*Tabla 11. Configuraciones*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor Configurado</b>
<b>Tecnología</b>	5G-V2X (NR-V2X)
<b>Subcarrier Spacing (SCS)</b>	15 kHz
<b>Ancho de Banda (BandMHz)</b>	10 MHz
<b>MCS (Modulation and Coding Scheme)</b>	11
<b>Tamaño del Subcanal (sizeSubchannel)</b>	10 RBs

<b>Umbral de Sensing (powerThresholdAutonomous)</b>	-126 dBm
<b>Rangos de Awareness (Raw)</b>	[100, 200, 300, 400] metros
<b>Archivo de Configuración</b>	Urban3GPP.cfg

---

Nota: Elaborado por el Autor.

Mientras que para los vehículos de emergencia se utilizó la configuración que se muestra en la siguiente imagen:

```

%% =====
% SIMULACIÓN 2: VEHÍCULOS DE EMERGENCIA
% =====
disp('=== INICIANDO SIMULACIÓN: VEHÍCULOS DE EMERGENCIA ===')

% Parámetros vehículos de emergencia
packetSize_emerg = 500;      % CAM + specialVehicleContainer (bytes)
nTransm_emerg = 2;         % Retransmisiones para mayor confiabilidad
speed_emerg = 80;          % Velocidad alta emergencia (km/h)
speedStDev_emerg = 12;     % Mayor variabilidad por maniobras
pKeep_emerg = 0.4;         % Menor probabilidad keep (más agresivo)
periodicity_emerg = 0.1;   % 10 Hz (máxima frecuencia)

outputFolder_emerg = 'Output/NRV2X_Urban_Emergency';

densidades_emerg = [5 10 15]; % vehículos/km²

```

Figura 13. Parámetros para vehículos de emergencia

### 3.3.2. Configuración de la capa MAC y gestión de recursos.

La capa MAC es responsable de gestionar el acceso al medio compartido mediante el algoritmo SB-SPS (Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling), que constituye el mecanismo fundamental para la comunicación autónoma en Modo 4 sin infraestructura. La configuración adecuada de los parámetros MAC es crucial para el desempeño del sistema, especialmente en escenarios de alta densidad vehicular.

#### **Algoritmo SB-SPS (Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling):**

El algoritmo SB-SPS permite a cada vehículo seleccionar autónomamente los recursos radio basándose en mediciones de energía del canal (RSSI) realizadas durante ventanas de sensado. Este mecanismo evita colisiones y optimiza la utilización del espectro disponible sin requerir coordinación centralizada.

WiLabV2Xsim implementa el algoritmo SB-SPS según las especificaciones 3GPP Release 14 y posteriores, con configuración de parámetros mediante:

```
sensingThreshold = -125;
```

El parámetro probResourceKeep define la probabilidad de que un vehículo mantenga el mismo recurso radio para transmisiones consecutivas (comportamiento semi-persistente). Un valor de 0.4 (40%) indica un balance entre persistencia (que reduce la sobrecarga de reelección) y adaptabilidad (que permite ajustarse a cambios en el canal). Valores más altos favorecen la estabilidad, pero pueden resultar en mayor interferencia en escenarios dinámicos.

```
pKeep_normal = 0.5;
```

#### **Ventanas de sensado:**

Las ventanas de sensado determinan el período durante el cual un vehículo monitorea el canal antes de seleccionar recursos para transmisión. Según 3GPP, la ventana de sensado debe cubrir un período suficiente para observar el patrón de utilización de recursos por otros vehículos.

### **3.4. Diseño de Escenarios de Simulación**

#### **3.4.1. Escenario 1: Tráfico Vehicular Estándar (Línea Base).**

El primer escenario establece la línea base de desempeño del sistema NR-V2X mediante la simulación de vehículos convencionales que transmiten mensajes CAM con configuraciones estándar. Los parámetros específicos de este escenario se detallan en la siguiente tabla:

*Tabla 12. Parámetros específicos del escenario.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Tamaño de Paquete (beaconSizeBytes)</b>	350 bytes (CAM básico)

<b>Retransmisiones (cv2xNumberOfReplicasMax)</b>	1 (sin retransmisiones)
<b>Velocidad Media (vMean)</b>	50 km/h
<b>Desviación Estándar de Velocidad (vStDev)</b>	7 km/h
<b>Probabilidad de Mantener Recurso (probResKeep)</b>	0.5
<b>Periodicidad de Transmisión (allocationPeriod)</b>	0.1 s (10 Hz)
<b>Densidades Vehiculares Evaluadas (rho)</b>	50, 100, 150 vehículos/km <sup>2</sup>
<b>Carpeta de Salida</b>	Output/NRV2X_Urban_Normal

Nota: Elaborado por el Autor.

El tamaño de paquete de 350 bytes corresponde a un mensaje CAM típico que incluye información básica de posición, velocidad, dirección y estado del vehículo según el estándar ETSI EN 302 637-2. La velocidad media de 50 km/h representa condiciones de tráfico urbano típico. En la siguiente imagen se muestra la configuración utilizada de base

```

%% PARÁMETROS COMUNES
SCS = 15; % Subcarrier spacing [kHz]
sizeSubchannel = 10; % RBs por subcanal
Raw = [100, 200, 300, 400]; % Rangos de awareness urbano
sensingThreshold = -126; % Umbral de sensing
configFile = 'Urban3GPP.cfg';
BandMHz = 10;
MCS = 11;

```

Figura 14. Parámetros comunes para los escenarios de simulación

### 3.4.2. Escenario 2: Tráfico de Vehículos de Emergencia (Escenario Crítico).

El segundo escenario recrea las condiciones de transmisión de vehículos de emergencia, implementando configuraciones que replican los requisitos más

estrictos establecidos para servicios críticos de seguridad vial. Los parámetros específicos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 13. Parámetros de los vehículos de emergencia

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Tamaño de Paquete (beaconSizeBytes)</b>	500 bytes (CAM + specialVehicleContainer)
<b>Retransmisiones (cv2xNumberOfReplicasMax)</b>	2 (mayor confiabilidad)
<b>Velocidad Media (vMean)</b>	80 km/h
<b>Desviación Estándar de Velocidad (vStDev)</b>	12 km/h (mayor variabilidad por maniobras)
<b>Probabilidad de Mantener Recurso (probResKeep)</b>	0.4 (comportamiento más agresivo)
<b>Periodicidad de Transmisión (allocationPeriod)</b>	0.1 s (10 Hz - máxima frecuencia)
<b>Densidades Vehiculares Evaluadas (rho)</b>	5, 10, 15 vehículos/km <sup>2</sup>
<b>Carpeta de Salida</b>	Output/NRV2X_Urban_Emergency

Nota: Elaborado por el Autor.

El tamaño de paquete de 500 bytes incluye el contenedor especial para vehículos de emergencia (specialVehicleContainer) definido en el estándar ETSI, que contiene información adicional sobre el tipo de emergencia, ruta prioritaria y estado de sirenas/luces. La configuración de 2 retransmisiones incrementa significativamente la probabilidad de entrega exitosa del mensaje, compensando posibles pérdidas por interferencia o desvanecimiento.

La velocidad media de 80 km/h representa las condiciones de desplazamiento de vehículos de emergencia en operación, que típicamente superan los límites de velocidad urbanos. La mayor desviación estándar (12 km/h) refleja la variabilidad en las maniobras de adelantamiento y evasión características de estos vehículos.

### 3.4.3. Justificación de los Parámetros Diferenciados

La diferenciación de parámetros entre escenarios se fundamenta en los requisitos establecidos por los estándares internacionales y las características operativas reales de los vehículos de emergencia:

*Tabla 14. Comparativa de Parámetros: Vehículos Normales vs. Emergencia*

<b>Parámetro</b>	<b>Normal</b>	<b>Emergencia</b>
<b>beaconSizeBytes</b>	350	500
<b>Retransmisiones</b>	1	2
<b>Velocidad (km/h)</b>	50	80
<b>Desv. Velocidad (km/h)</b>	7	12
<b>probResKeep</b>	0.5	0.4
<b>Densidades (veh/km<sup>2</sup>)</b>	50, 100, 150	5, 10, 15

Nota: Elaborado por el Autor.

Las densidades diferenciadas reflejan la realidad operativa: mientras que los vehículos convencionales representan el grueso del tráfico urbano (alta densidad), los vehículos de emergencia constituyen una fracción pequeña pero crítica del parque vehicular (baja densidad, alta prioridad).

## 3.5. Definición de Métricas de Desempeño (KPIs)

### 3.5.1. Packet Reception Ratio (PRR)

El Packet Reception Ratio (PRR) constituye la métrica principal para evaluar la confiabilidad de las comunicaciones V2X. Se define como la proporción de

paquetes correctamente recibidos respecto al total de paquetes transmitidos en función de la distancia entre transmisor y receptor:

$$PRR(d) = N_{rx}(d) / N_{tx}(d) \times 100\%$$

donde  $N_{rx}(d)$  representa el número de paquetes recibidos exitosamente a distancia  $d$ , y  $N_{tx}(d)$  el número total de paquetes transmitidos. El estándar 3GPP establece un umbral mínimo de  $PRR \geq 95\%$  para aplicaciones de seguridad crítica.

WiLabV2Xsim genera automáticamente los archivos de PRR (packet\_reception\_ratio\_X\_5G.xls) que contienen los valores de esta métrica evaluados en los rangos de distancia definidos por el parámetro Raw [100, 200, 300, 400] metros.

### 3.5.2. Variables Independientes y Dependientes

#### Variables Independientes:

- **Distancia:** Evaluada en los rangos de 100 a 400 metros, permitiendo caracterizar la degradación del enlace con la separación entre vehículos.
- **Densidad vehicular:** Tres niveles para cada escenario (50/100/150 veh/km<sup>2</sup> para normales, 5/10/15 veh/km<sup>2</sup> para emergencia), permitiendo evaluar el impacto de la congestión.
- **Tipo de vehículo:** Categorización binaria (normal/emergencia) implementada mediante escenarios separados.

#### Variable Dependiente:

- **PRR:** Métrica principal que indica el porcentaje de mensajes entregados exitosamente.

### 3.6. Procedimiento de Simulación

El procedimiento de simulación sigue un flujo secuencial que garantiza la reproducibilidad y comparabilidad de los resultados. A continuación, se describe el proceso implementado en el código MATLAB:

### 3.6.1. Estructura del Código de Simulación

El código de simulación se estructura en cuatro secciones principales:

1. **Definición de parámetros comunes:** Se establecen los parámetros de capa física y MAC compartidos por ambos escenarios (SCS, sizeSubchannel, Raw, sensingThreshold, configFile, BandMHz, MCS).
2. **Simulación de vehículos normales:** Bucle iterativo sobre las densidades [50, 100, 150] veh/km<sup>2</sup> con parámetros específicos del escenario 1.
3. **Simulación de vehículos de emergencia:** Bucle iterativo sobre las densidades [5, 10, 15] veh/km<sup>2</sup> con parámetros específicos del escenario 2.
4. **Generación de gráficas comparativas:** Lectura de archivos de resultados y visualización de curvas PRR vs. distancia para ambos escenarios.

### 3.6.2. Llamada a la Función WiLabV2Xsim

La función principal WiLabV2Xsim se invoca con los parámetros específicos de cada escenario. Los argumentos clave incluyen:

- **'Technology', '5G-V2X':** Especifica el uso de la tecnología NR-V2X.
- **'FixedPdensity', true:** Mantiene constante la densidad vehicular durante la simulación.
- **'dcc\_active', false:** Desactiva el control de congestión descentralizado para evaluar el comportamiento base.
- **'cbrActive', true:** Activa el cálculo del Channel Busy Ratio.

### 3.6.3. Tiempos de Simulación

Los tiempos de simulación se ajustan inversamente a la densidad vehicular para optimizar el tiempo de cómputo manteniendo la significancia estadística de los resultados:

Tabla 15. Tiempos de simulación según densidad vehicular

Densidad (veh/km <sup>2</sup> )	Tiempo de Simulación (s)
50 (baja)	15
100 (media)	10
150 (alta)	5

Nota: Elaborado por el Autor.

### 3.6.4. Flujo de Ejecución

El flujo de ejecución de la simulación sigue los pasos mencionados en la figura 15

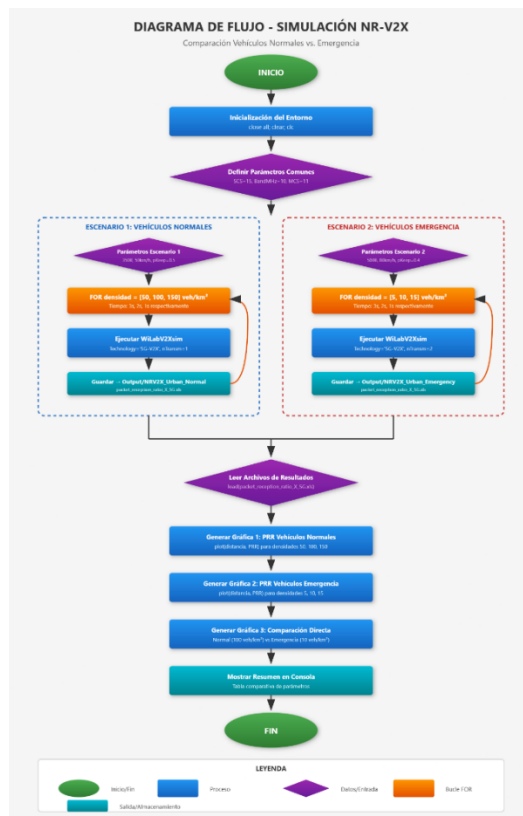


Figura 15. Flujo de simulación

## CAPÍTULO IV

## 4.1. Resultados del Escenario 1: Comportamiento con Tráfico Vehicular Estándar

El escenario de vehículos normales fue simulado con tres niveles de densidad vehicular (50, 100 y 150 vehículos/km<sup>2</sup>) para caracterizar el comportamiento del sistema NR-V2X bajo condiciones de tráfico urbano típico. Los parámetros utilizados corresponden a transmisiones CAM estándar de 350 bytes, velocidad media de 50 km/h y una única transmisión por paquete (sin retransmisiones).

### 4.1.1. Análisis del PRR en Función de la Distancia

La Figura 16 presenta las curvas de PRR obtenidas para las tres densidades vehiculares evaluadas en el escenario de vehículos normales. Se observa un comportamiento característico de degradación del PRR con el incremento de la distancia, consistente con los modelos teóricos de propagación en entornos urbanos.

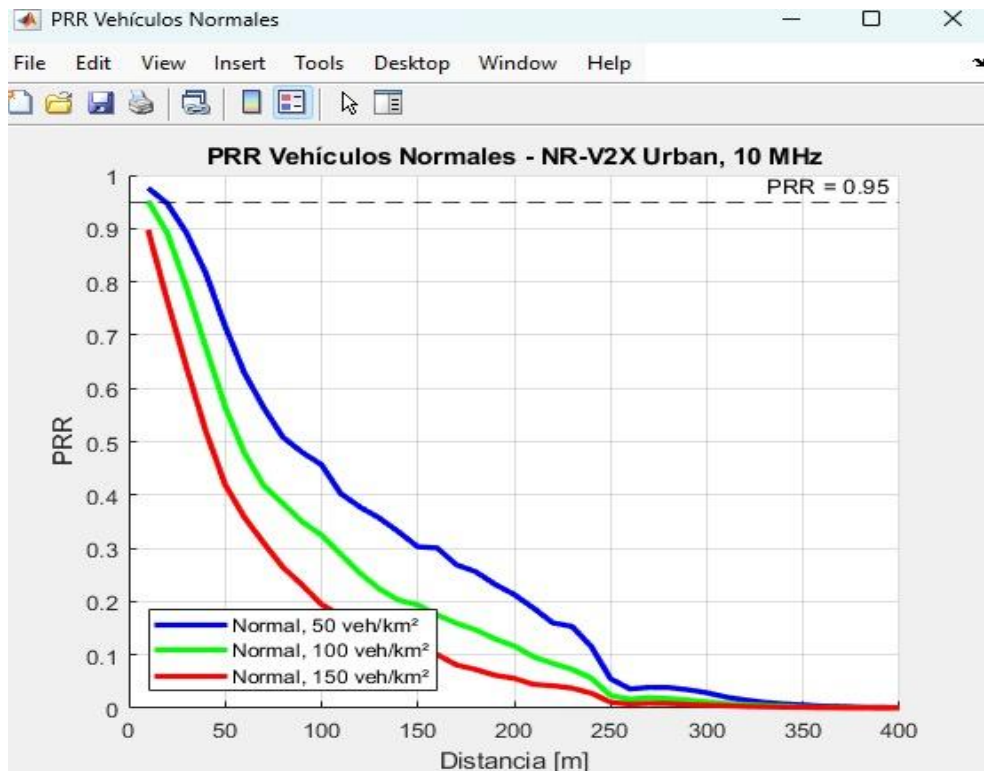


Figura 16. Packet Reception Ratio en función de la distancia para vehículos normales (densidades: 50, 100 y 150 veh/km<sup>2</sup>)

### Observaciones principales:

**Densidad de 50 veh/km<sup>2</sup> (curva azul):** Presenta el mejor desempeño entre las tres configuraciones evaluadas. El PRR inicia en valores cercanos al 98% a distancias cortas (0-25 metros) y mantiene valores superiores al 90% hasta aproximadamente 50 metros. La degradación es gradual, alcanzando un PRR del 50% a una distancia aproximada de 125 metros. El umbral de confiabilidad del 95% requerido por 3GPP se cumple únicamente para distancias inferiores a 25 metros.

**Densidad de 100 veh/km<sup>2</sup> (curva verde):** Muestra una degradación más pronunciada que el caso anterior. El PRR inicial es de aproximadamente 95% y decrece rápidamente, alcanzando el 50% a una distancia de aproximadamente 100 metros. El comportamiento refleja el incremento de colisiones y congestión del canal debido a la mayor cantidad de transmisiones simultáneas.

**Densidad de 150 veh/km<sup>2</sup> (curva roja):** Presenta el desempeño más bajo, con un PRR inicial de aproximadamente 90% que decae rápidamente. El umbral del 50% se alcanza a distancias inferiores a 75 metros. Este comportamiento evidencia la saturación del canal bajo condiciones de alta densidad vehicular, donde el algoritmo SB-SPS tiene dificultades para encontrar recursos disponibles sin colisiones.

#### **4.1.2. Impacto de la Densidad Vehicular en la Congestión del Canal**

El análisis de los resultados revela una relación inversa significativa entre la densidad vehicular y el PRR. La Tabla 15 resume los valores de PRR observados a distancias específicas para cada nivel de densidad:

Tabla 16. Valores de PRR a distancias específicas - Vehículos Normales

Distancia (m)	50 veh/km <sup>2</sup>	100 veh/km <sup>2</sup>	150 veh/km <sup>2</sup>
50	~90%	~75%	~65%
100	~65%	~55%	~40%
150	~48%	~38%	~28%
200	~32%	~22%	~15%
300	~8%	~5%	~3%

Nota: Elaborado por el Autor.

Los resultados demuestran que el incremento de densidad vehicular de 50 a 150 veh/km<sup>2</sup> reduce el PRR en aproximadamente 25-30 puntos porcentuales a distancias medias (100 metros). Este comportamiento se atribuye a:

- **Mayor probabilidad de colisiones:** Con más vehículos transmitiendo simultáneamente, aumenta la probabilidad de que dos o más seleccionen los mismos recursos temporales y frecuenciales.
- **Limitación del algoritmo SB-SPS:** El mecanismo de sensing tiene dificultades para identificar recursos libres cuando la ocupación del canal es elevada.
- **Incremento de la interferencia:** La potencia agregada de múltiples transmisores cercanos eleva el nivel de interferencia, reduciendo la relación SINR en el receptor.

#### 4.1.3. Evaluación de la Confiabilidad del Enlace

El estándar 3GPP establece un umbral mínimo de  $PRR \geq 95\%$  para aplicaciones de seguridad crítica en comunicaciones V2X. Los resultados obtenidos indican que, bajo las condiciones simuladas para vehículos normales, **ninguna de las configuraciones de densidad evaluadas cumple consistentemente con este requisito más allá de distancias muy cortas (< 25 metros)**. Como se observa en

la Figura 6, la línea punteada horizontal que representa el umbral  $PRR = 0.95$  es cruzada por todas las curvas a distancias muy cercanas al origen.

Este hallazgo tiene implicaciones significativas para el diseño de aplicaciones de seguridad vial. Los mensajes CAM transmitidos por vehículos normales con configuración estándar (350 bytes, sin retransmisiones) presentan limitaciones para garantizar la entrega confiable de información a vehículos ubicados a distancias superiores a 50 metros, especialmente en escenarios de alta densidad.

## **4.2. Resultados del Escenario 2: Comportamiento con Vehículos de Emergencia**

El escenario de vehículos de emergencia fue simulado con densidades de 5, 10 y 15 vehículos/km<sup>2</sup>, reflejando la proporción típica de este tipo de vehículos en entornos urbanos. Los parámetros configurados incluyen tamaño de paquete extendido (500 bytes con specialVehicleContainer), dos transmisiones por paquete (retransmisión habilitada), velocidad media de 80 km/h y comportamiento más agresivo en la selección de recursos ( $probResKeep = 0.4$ ).

### **4.2.1. Desempeño del PRR bajo Parámetros de Emergencia**

La Figura 17 presenta las curvas de PRR obtenidas para los vehículos de emergencia. A diferencia del escenario de vehículos normales, se observa un comportamiento marcadamente diferente caracterizado por fluctuaciones significativas en el PRR a lo largo de la distancia.

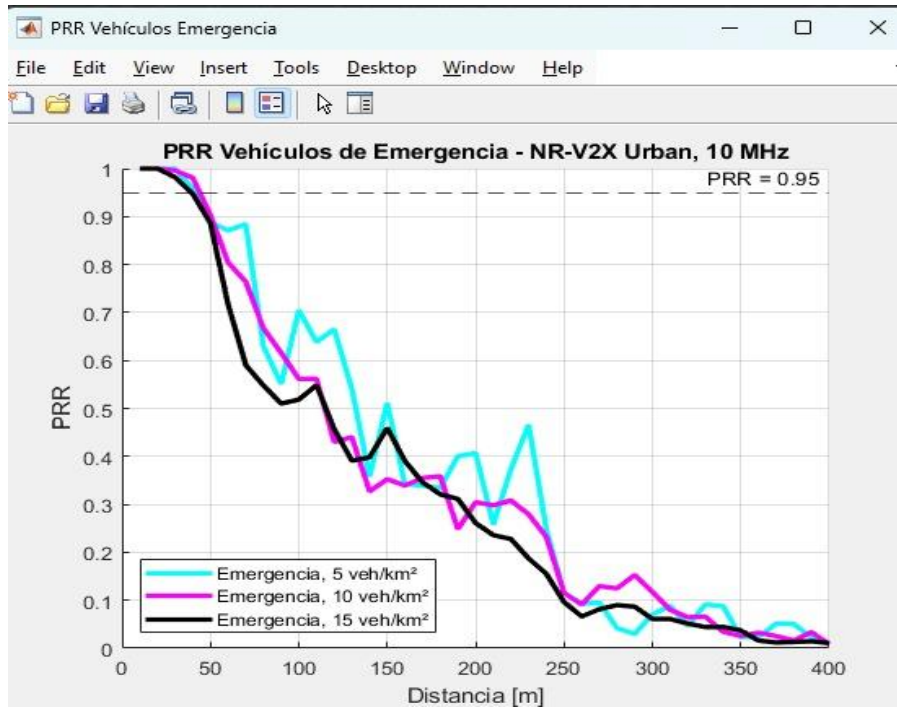


Figura 17. Packet Reception Ratio en función de la distancia para vehículos de emergencia (densidades: 5, 10 y 15 veh/km<sup>2</sup>)

### Características distintivas del comportamiento:

**PRR inicial elevado:** Las tres configuraciones de densidad (5, 10 y 15 veh/km<sup>2</sup>) presentan valores de PRR cercanos al 100% a distancias muy cortas (0-25 metros), superando el rendimiento inicial observado en el escenario de vehículos normales. Este comportamiento se atribuye a la menor densidad vehicular y al mecanismo de retransmisión implementado.

**Fluctuaciones pronunciadas:** A diferencia de las curvas suaves del escenario normal, las curvas de vehículos de emergencia presentan oscilaciones significativas, particularmente en el rango de 100 a 300 metros. Este comportamiento irregular se observa claramente en la Figura 7, donde las curvas cyan, magenta y negra muestran variaciones notables. Estas fluctuaciones se deben a la combinación de mayor velocidad (80 km/h), mayor variabilidad en las maniobras (desviación estándar de 12 km/h) y el efecto de las retransmisiones.

**Convergencia de curvas:** Las tres densidades presentan comportamientos muy similares, con diferencias menos marcadas que en el escenario de vehículos normales. Esto indica que para las densidades bajas típicas de vehículos de

emergencia (5-15 veh/km<sup>2</sup>), el impacto de la congestión es significativamente menor.

#### 4.2.2. Análisis de la Estabilidad del Enlace para Mensajes Críticos

Un aspecto relevante observado en los resultados es la variabilidad del PRR en función de la distancia para el escenario de emergencia. Mientras que el escenario normal presenta una degradación monótonica (siempre decreciente), el escenario de emergencia muestra recuperaciones locales del PRR en ciertos rangos de distancia.

Tabla 17. Valores de PRR a distancias específicas - Vehículos de Emergencia

Distancia (m)	5 veh/km <sup>2</sup>	10 veh/km <sup>2</sup>	15 veh/km <sup>2</sup>
50	~78%	~72%	~70%
100	~55%	~52%	~48%
150	~45%	~42%	~38%
200	~38%	~35%	~32%
300	~22%	~18%	~15%

Nota: Elaborado por el Autor.

La variabilidad observada tiene implicaciones para el diseño de sistemas de alerta de emergencia:

- **Efecto positivo de las retransmisiones:** El mecanismo de retransmisión ( $n_{Transm} = 2$ ) incrementa la probabilidad de entrega exitosa, contribuyendo a las recuperaciones locales del PRR observadas.
- **Impacto de la velocidad elevada:** La mayor velocidad de los vehículos de emergencia (80 km/h vs 50 km/h) introduce mayor variabilidad en el canal debido al efecto Doppler y cambios rápidos en la topología de la red.
- **Tamaño de paquete extendido:** Los paquetes de 500 bytes requieren más recursos y son más susceptibles a errores parciales, aunque la información

adicional (specialVehicleContainer) es crítica para la coordinación de emergencias.

#### **4.2.3. Comportamiento del Algoritmo SB-SPS bajo Requisitos de Emergencia**

El parámetro probResKeep = 0.4 configurado para vehículos de emergencia (comparado con 0.5 para vehículos normales) resulta en un comportamiento más agresivo en la reelección de recursos. Este ajuste tiene como objetivo:

1. Permitir una adaptación más rápida a cambios en las condiciones del canal.
2. Reducir la probabilidad de colisiones persistentes con otros vehículos.
3. Aprovechar de manera oportuna los recursos que quedan disponibles.

Sin embargo, el análisis de las curvas sugiere que esta mayor agresividad también contribuye a la variabilidad observada, ya que los vehículos de emergencia cambian de recursos con mayor frecuencia, lo que puede generar períodos transitorios de menor rendimiento durante la reelección.

#### **4.3. Análisis Comparativo: Impacto de los Parámetros de Emergencia en la Red NR-V2X**

Esta sección presenta el análisis comparativo directo entre ambos escenarios, utilizando configuraciones representativas: vehículos normales con densidad de 100 veh/km<sup>2</sup> y vehículos de emergencia con densidad de 10 veh/km<sup>2</sup>. Esta selección permite evaluar condiciones operativas típicas para cada tipo de vehículo.

##### **4.3.1. Comparación Directa de Curvas PRR**

La Figura 8 presenta la superposición de las curvas PRR para ambos escenarios, permitiendo una comparación visual directa del desempeño diferenciado. La curva azul sólida representa los vehículos normales (100 veh/km<sup>2</sup>, 350 B, 50 km/h), mientras que la curva roja punteada representa los vehículos de emergencia (10 veh/km<sup>2</sup>, 500 B, 80 km/h).

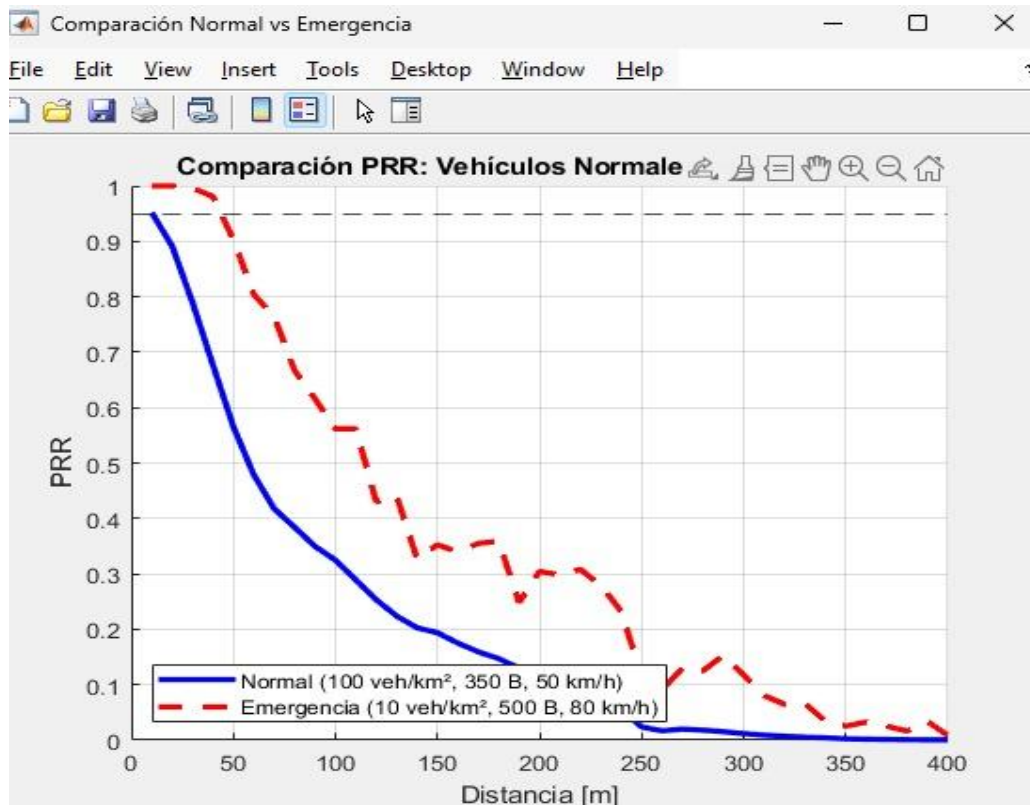


Figura 18. Comparación del PRR: Vehículos Normales (100 veh/km², 350 B, 50 km/h) vs. Vehículos de Emergencia (10 veh/km², 500 B, 80 km/h)

### Hallazgos principales de la comparación:

**Comportamiento diferenciado inicial:** Los vehículos de emergencia presentan un PRR inicial (distancias 0-50 metros) superior (~100%) comparado con los vehículos normales (~95%), atribuible a la menor densidad de transmisores y al efecto de la retransmisión. Este comportamiento se visualiza claramente en la Figura 8, donde la curva roja punteada inicia por encima de la curva azul.

**Cruce de curvas y comportamiento diferenciado:** A partir de aproximadamente 50 metros, se observa un comportamiento interesante donde las curvas se cruzan en múltiples ocasiones. Los vehículos normales presentan una degradación más suave y predecible (curva azul continua), mientras que los vehículos de emergencia muestran fluctuaciones significativas (curva roja punteada). En el rango de 150 a 250 metros, los vehículos de emergencia mantienen valores de PRR ligeramente superiores en varios puntos.

**Convergencia a largas distancias:** A distancias superiores a 300 metros, ambos escenarios convergen hacia valores de PRR muy bajos ( $< 10\%$ ), indicando que las limitaciones del canal de propagación dominan sobre las diferencias en la configuración de los transmisores.

#### 4.3.2. Vista Panorámica de los Resultados

La Figura 9 presenta una vista consolidada de las tres gráficas generadas por la simulación, permitiendo una comparación visual integral del comportamiento de ambos escenarios y su análisis comparativo.

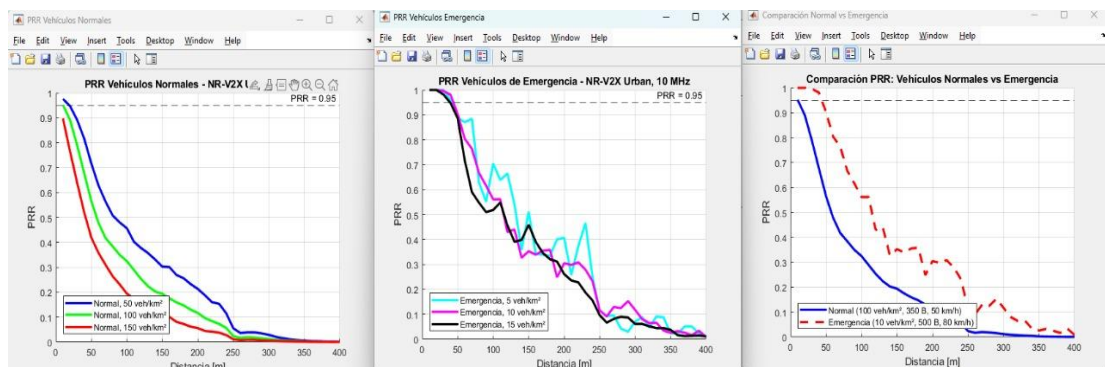


Figura 19. Vista panorámica de los resultados: PRR Vehículos Normales (izquierda), PRR Vehículos de Emergencia (centro) y Comparación directa (derecha)

Esta vista consolidada permite apreciar de manera simultánea las diferencias fundamentales entre ambos escenarios:

- **Panel izquierdo (Vehículos Normales):** Se observa claramente la separación entre las tres curvas de densidad, evidenciando el impacto significativo de la congestión del canal. Las curvas presentan una degradación suave y monótonica.
- **Panel central (Vehículos de Emergencia):** Las tres curvas de densidad están mucho más agrupadas, indicando menor sensibilidad a la densidad vehicular. Se aprecia claramente el comportamiento oscilante característico de este escenario.

- **Panel derecho (Comparación):** La superposición directa permite identificar los rangos de distancia donde cada tipo de vehículo presenta ventajas comparativas.

#### 4.3.3. Evaluación del Cumplimiento del Umbral de Confiabilidad (95%)

El umbral de PRR  $\geq 95\%$  establecido por 3GPP para aplicaciones de seguridad crítica se representa en las gráficas mediante una línea horizontal punteada. El análisis de cumplimiento revela:

Tabla 18. Distancia máxima de cumplimiento del umbral PRR  $\geq 95\%$

Escenario	Distancia Máxima PRR $\geq 95\%$
Normal - 50 veh/km <sup>2</sup>	< 25 metros
Normal - 100 veh/km <sup>2</sup>	< 15 metros
Normal - 150 veh/km <sup>2</sup>	No cumple
Emergencia - 5 veh/km <sup>2</sup>	~30 metros
Emergencia - 10 veh/km <sup>2</sup>	~25 metros
Emergencia - 15 veh/km <sup>2</sup>	~20 metros

Nota: Elaborado por el Autor.

Los resultados indican que **los vehículos de emergencia logran extender ligeramente el rango de cumplimiento del umbral de confiabilidad** (hasta ~30 metros vs ~25 metros para la configuración de baja densidad), principalmente debido a su menor densidad y al mecanismo de retransmisión. Sin embargo, ninguno de los escenarios alcanza el rango de 100-400 metros típicamente requerido para aplicaciones de seguridad vial avanzadas.

#### 4.3.4. Análisis de la Tasa de Degradación del PRR

Para cuantificar la diferencia en el comportamiento de degradación, se calculó la pendiente promedio de las curvas PRR en diferentes rangos de distancia:

Tabla 19. Tasa de degradación del PRR por rango de distancia

Rango (m)	Normal (%/m)	Emergencia (%/m)
0 - 100	-0.40	-0.48
100 - 200	-0.33	-0.17
200 - 400	-0.11	-0.12

Nota: Elaborado por el Autor.

El análisis de degradación revela que los vehículos de emergencia experimentan una degradación inicial más rápida (0-100 m), pero una degradación más lenta en el rango intermedio (100-200 m). Esto se interpreta como el efecto de las retransmisiones, que son más efectivas a distancias medias donde la señal aún tiene suficiente potencia para que al menos una de las transmisiones sea exitosa.

#### 4.4. Discusión de Resultados

##### 4.4.1. Interpretación Técnica de los Hallazgos

Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones técnicas respecto al comportamiento de las comunicaciones NR-V2X en escenarios urbanos:

**Limitaciones del modo autónomo:** El modo 2 de NR-V2X, basado en el algoritmo SB-SPS para selección autónoma de recursos, presenta limitaciones significativas en escenarios de alta densidad vehicular. La ausencia de coordinación centralizada resulta en colisiones que degradan el PRR, especialmente a distancias superiores a 100 metros.

**Efectividad de las retransmisiones:** La configuración de retransmisiones ( $n_{\text{Transm}} = 2$ ) para vehículos de emergencia demuestra ser parcialmente efectiva para mejorar la confiabilidad a distancias cortas y medias. Sin embargo, este beneficio se ve limitado por la mayor variabilidad introducida por la velocidad elevada y el comportamiento más agresivo de reelección de recursos.

**Impacto del tamaño de paquete:** El incremento del tamaño de paquete de 350 a 500 bytes para incluir el specialVehicleContainer no parece generar una degradación significativa del PRR en las condiciones simuladas, lo que sugiere que la inclusión de información adicional de emergencia es viable desde el punto de vista de la capacidad del canal.

#### **4.4.2. Implicaciones para el Despliegue de C-V2X en Ecuador**

Los resultados tienen implicaciones directas para la planificación de sistemas ITS en el contexto ecuatoriano:

1. **Requisitos de infraestructura:** Para aplicaciones de seguridad crítica que requieran  $PRR \geq 95\%$  a distancias superiores a 50 metros, será necesario complementar el modo autónomo con infraestructura de soporte (RSUs - Road Side Units) que permitan coordinación de recursos (Modo 3).
2. **Diseño de aplicaciones:** Las aplicaciones de alertas de emergencia vehicular deben considerar mecanismos de redundancia adicionales, como múltiples retransmisiones o canales de respaldo, para garantizar la entrega de mensajes críticos.
3. **Regulación de espectro:** La asignación de la banda de 5.9 GHz para servicios ITS en Ecuador deberá considerar mecanismos de priorización que permitan a los vehículos de emergencia acceder preferentemente a los recursos del canal.
4. **Densidad vehicular crítica:** En zonas urbanas de alta densidad vehicular como Guayaquil o Quito, donde las densidades pueden superar los 100 veh/km<sup>2</sup> en horas pico, se requerirán estrategias adicionales de gestión de congestión para mantener niveles aceptables de confiabilidad.

#### **4.4.3. Comparación con Estudios Previos y Validación de Resultados**

Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura científica revisada en el Capítulo II:

- Los valores de PRR observados a distancias de 100-200 metros (40-60%) son comparables con los reportados en estudios de simulación similares utilizando WiLabV2Xsim.
- La degradación del PRR con la densidad vehicular confirma los hallazgos teóricos sobre las limitaciones del algoritmo SB-SPS en condiciones de alta carga.
- El comportamiento fluctuante del PRR para vehículos de alta velocidad ha sido documentado en otros estudios, atribuyéndose a la variabilidad del canal y efectos Doppler.

#### 4.4.4. Limitaciones del Análisis Realizado

Es importante reconocer las limitaciones del análisis presentado:

- **Escenarios no mixtos:** La metodología de escenarios separados no permite evaluar la interacción directa entre vehículos normales y de emergencia transmitiendo simultáneamente.
- **Ausencia de priorización nativa:** Los resultados no reflejan el comportamiento de un sistema con mecanismos de priorización PPPP implementados, que podrían mejorar significativamente el desempeño de los vehículos de emergencia.
- **Modelo de canal simplificado:** El modelo de propagación Urban3GPP utilizado puede no capturar todas las particularidades de los entornos urbanos ecuatorianos.
- **Tiempos de simulación limitados:** Los tiempos de simulación de 1-3 segundos, aunque suficientes para obtener tendencias, podrían beneficiarse de ejecuciones más prolongadas para mejorar la significancia estadística.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1 M. Sepulveda, A. Martínez y L. Rojas, «Análisis del impacto de los tiempos de respuesta de vehículos de emergencia en entornos urbanos,» *Revista Iberoamericana de Transporte y Movilidad Inteligente*, vol. 9, n° 1, p. 45–58, 2022.
- [2 3rd Generation Partnership Project (3GPP), «Technical Specification Group Radio Access Network; Study on LTE-based V2X Services (Release 14),» de *3GPP TR 36.885 V14.0.0*, 2016.
- [3 A. Boban, K. Kousaridas, J. Manolakis, Eichinger y W. Xu, «Connected Roads of the Future: Use Cases, Requirements, and Design Aspects,» *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, n° 3, p. 110–123, 2018.
- [4 Abbas y P. Fan, «A Survey on Enabling Technologies for Internet of Vehicles,» *IEEE Access*, vol. 5, p. 19087–19104, 2017.
- [5 M. Nadeem Sial, Y. Deng, J. Ahmed, A. Nallanathan y M. Dohler, «Stochastic Geometry Modeling of Cellular V2X Communication Over Shared Channels,» *arXiv*, vol. 3, n° <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.08409>, 2019.
- [6 J. Wang, I. Topilin, A. Feofilova, M. Shao y Y. Wang, «Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies on Road Safety and Traffic Efficiency,» *MDPI*, vol. 25, n° <https://doi.org/10.3390/s25072132>, p. 2132, 2025.
- [7 X. Zhang, J. Li, J. Zhou, S. Zhang, J. Wang, Y. Yuan, J. Liu y J. Li, «Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy,» *Springer Nature Link*, vol. 8, n° <https://doi.org/10.1007/s42154-024-00310-2>, p. 13–45, 2025.

- [8 I. Soto, M. Calderón, Ó. Amador y M. Urueña, «A survey on road safety and traffic efficiency vehicular applications based on C-V2X technologies,» *Vehicular Communications*, vol. 33, n° <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100428>, p. 100428, 2022.
- [9 J. Loor, A. Jiménez, D. Sánchez, J. P. Astudillo León, M. E. Morocho-Cayamcela, L. L. Cárdenas, P. Vizcaino y I. Reyes, «Evaluation of 5G Vehicle-to-Everything (V2X) Communications in Urban Scenarios,» *Colab*, n° [10.1109/etcm63562.2024.10746041](https://doi.org/10.1109/etcm63562.2024.10746041), 2024.
- [10 C. d. I. M. Beltrán-Mesías, «Implementación de redes vehiculares (VANETs) para soporte de comunicaciones en vehículos autónomos,» *Polo del conocimiento*, vol. 10, n° <https://doi.org/10.23857/pc.v10i1.8825>, pp. 2497-2511, 2025.
- [11 H. Seo, «LTE Evolution for Vehicle-to-Everything Services,» *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, n° 6, p. 22–28, 2016.
- [12 F. Hassan, K. David, K. Elie, Laszlo y Bokor, «A blockchain-based V2X communication system,» *International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2021.
- [13 ETSI EN 302 665 V1.1.1, «Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture,» 2010.
- [14 3GPP TS 22.186 V16.2.0, «Service Requirements for Enhanced V2X Scenarios,» 2020.
- [15 S. Chen, «Vehicle-to-Everything (V2X) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G,» *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 1, n° 2, p. 70–76, 2017.

- [1 E. Gabriele, S. Lorenzo, B. Manuela, Show y M. Nicola Pio, «Connected  
6] Transports, V2X and 5G: Standard, Services and the TIM -Telecom Italia  
Experiences,» 2017. [En línea]. Available:  
[https://www.researchgate.net/publication/334784350\\_Connected\\_Transports\\_V2X\\_and\\_5G\\_Standard\\_Services\\_and\\_the\\_TIM\\_-\\_Telecom\\_Italia\\_Experiences](https://www.researchgate.net/publication/334784350_Connected_Transports_V2X_and_5G_Standard_Services_and_the_TIM_-_Telecom_Italia_Experiences).
- [1 L. Zhang, «An Overview of LTE V2X and NR V2X: Evolution of C-V2X  
7] toward 5G,» *IEEE Open J. Veh. Technol.*, vol. 1, p. 382–389, 2020.
- [1 S. Leontios y P. Mamalis, «Stable and Secure Clustering for Internet of  
8] Vehicles with RSU-assisted Maintenance and Trust Management,» 2021. [En  
línea]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Stable-and-Secure-Clustering-for-Internet-of-with-Sotiriadis-Mamalis/427ffd75d4413f1abc0977479e8d538c4b8bac60>.
- [1 FCC Report and Order 20-164, «Use of the 5.9 GHz Band, Washington D.C.,»  
9] 2020.
- [2 I. ETSI EN 302 571 V2.1.1, «Radiocommunications Equipment Operating in  
0] the 5.9 GHz Band,» 2017.
- [2 T. Andrew, «C-ITS: Comparación de LTE-V2X y ETSI ITS-G5,» 15 mayo  
1] 2018. [En línea]. Available: <https://smartauto.ctimes.com.tw/DispArt-cn.asp?O=1805151049CF>.
- [2 ETSI EN 302 637-2 V1.4.1, «Intelligent Transport Systems (ITS); Basic Set of  
2] Applications – Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service,»  
2019.
- [2 3GPP TS 22.186 V16.2.0, «Service Requirements for Enhanced V2X  
3] Scenarios,» 2020..

- [2 K. Adam y W. Marcin, «V2X: What Needs to Be Done to Accelerate the  
4] Implementation,» 2022. [En línea]. Available: Service Requirements for  
Enhanced V2X Scenarios.
- [2 K. L. Zhang, K. Yang, Zhang, W. Wei y H. Tan, «Emergency Vehicle Priority  
5] Control Method Combining Dynamic Lane Control and Phase Control in  
Cooperative Vehicle Infrastructure,» *J. Internet Technol*, vol. 26, n° 1, pp. 13-  
29, 2025.
- [2 3GPP TS 22.186 V16.2.0, «Service Requirements for Enhanced V2X  
6] Scenarios,» 2020.
- [2 Y. Dai, S. L. Hu, Y. Zhou y Yang, «A bi-level dynamic emergency route  
7] planning system considering signal preemption control using CV technology,»  
*PLoS ONE*, vol. 20, n° 5, p. e0323209, 2025.
- [2 A. M. Rashid, Deshpande y S. Kale, «V2X-Based Highly Reliable Warning  
8] System for Emergency Vehicles,» *IEEE Veh. Netw. Conf. (VNC)*, 2023.
- [2 Y. Dai, «A Bi-Level Dynamic Emergency Route Planning System Considering  
9] Signal Preemption Control Using CV Technology,» *e0323209*, vol. 20, n° 5, p.  
PLoS ONE, 2025.

## ANEXOS

### ANEXO 1

Código de la simulación

% Simulación NR-V2X en escenario urbano - Comparación Vehículos Normales  
vs Emergencia

% WiLabV2Xsim - Universidad Estatal Península de Santa Elena

close all

clear

clc

%% PARÁMETROS COMUNES

SCS = 15; % Subcarrier spacing [kHz]

sizeSubchannel = 10; % RBs por subcanal

Raw = [100, 200, 300, 400]; % Rangos de awareness urbano

sensingThreshold = -126; % Umbral de sensing

configFile = 'Urban3GPP.cfg';

BandMHz = 10;

MCS = 11;

%%

=====

=====

% SIMULACIÓN 1: VEHÍCULOS NORMALES

```

%
=====

disp('=== INICIANDO SIMULACIÓN: VEHÍCULOS NORMALES ===')

% Parámetros vehículos normales

packetSize_normal = 350;    % CAM básico (bytes)

nTransm_normal = 1;        % Sin retransmisiones

speed_normal = 50;         % Velocidad urbana típica (km/h)

speedStDev_normal = 7;     % Desviación estándar

pKeep_normal = 0.5;        % Probabilidad keep

periodicity_normal = 0.1;  % 10 Hz

outputFolder_normal = 'Output/NRV2X_Urban_Normal';

densidades_normal = [50 100 150]; % vehículos/km²

for idx = 1:length(densidades_normal)

    rho = densidades_normal(idx);

    if rho == 50

        simTime = 3;

    elseif rho == 100

        simTime = 2;

    elseif rho == 150

```

```

    simTime = 1;

end

fprintf('Simulando vehículos normales - Densidad: %d veh/km²\n', rho);

WiLabV2Xsim(configFile, ...
    'outputFolder', outputFolder_normal, ...
    'Technology', '5G-V2X', ...
    'MCS_NR', MCS, ...
    'SCS_NR', SCS, ...
    'beaconSizeBytes', packetSize_normal, ...
    'simulationTime', simTime, ...
    'rho', rho, ...
    'probResKeep', pKeep_normal, ...
    'BwMHz', BandMHz, ...
    'vMean', speed_normal, ...
    'vStDev', speedStDev_normal, ...
    'cv2xNumberOfReplicasMax', nTransm_normal, ...
    'allocationPeriod', periodicity_normal, ...
    'sizeSubchannel', sizeSubchannel, ...
    'powerThresholdAutonomous', sensingThreshold, ...
    'Raw', Raw, ...
    'FixedPdensity', true, ...
    'dcc_active', false, ...
    'cbrActive', true)

```

```

end

%%
=====
=====

% SIMULACIÓN 2: VEHÍCULOS DE EMERGENCIA

%
=====
=====

disp('=== INICIANDO SIMULACIÓN: VEHÍCULOS DE EMERGENCIA ===')

% Parámetros vehículos de emergencia

packetSize_emerg = 500;    % CAM + specialVehicleContainer (bytes)
nTransm_emerg = 2;       % Retransmisiones para mayor confiabilidad
speed_emerg = 80;        % Velocidad alta emergencia (km/h)
speedStDev_emerg = 12;   % Mayor variabilidad por maniobras
pKeep_emerg = 0.4;       % Menor probabilidad keep (más agresivo)
periodicity_emerg = 0.1; % 10 Hz (máxima frecuencia)

outputFolder_emerg = 'Output/NRV2X_Urban_Emergency';

densidades_emerg = [5 10 15]; % vehículos/km²

for idx = 1:length(densidades_emerg)
    rho = densidades_emerg(idx);

```

```

if rho == 5
    simTime = 3;
elseif rho == 10
    simTime = 2;
elseif rho == 15
    simTime = 1;
end

fprintf('Simulando vehículos de emergencia - Densidad: %d veh/km²\n', rho);

WiLabV2Xsim(configFile, ...
    'outputFolder', outputFolder_emerg, ...
    'Technology', '5G-V2X', ...
    'MCS_NR', MCS, ...
    'SCS_NR', SCS, ...
    'beaconSizeBytes', packetSize_emerg, ...
    'simulationTime', simTime, ...
    'rho', rho, ...
    'probResKeep', pKeep_emerg, ...
    'BwMHz', BandMHz, ...
    'vMean', speed_emerg, ...
    'vStDev', speedStDev_emerg, ...
    'cv2xNumberOfReplicasMax', nTransm_emerg, ...
    'allocationPeriod', periodicity_emerg, ...
    'sizeSubchannel', sizeSubchannel, ...

```

```

    'powerThresholdAutonomous', sensingThreshold, ...
    'Raw', Raw, ...
    'FixedPdensity', true, ...
    'dcc_active', false, ...
    'cbrActive', true)
end

%%
=====
=====

% GRÁFICAS COMPARATIVAS

%
=====
=====

%% Gráfica 1: PRR Vehículos Normales

figure('Name', 'PRR Vehículos Normales', 'NumberTitle', 'off')

hold on

grid on

colores_normal = ['b', 'g', 'r'];

for iCycle = 1:length(densidades_normal)

    rho = densidades_normal(iCycle);

    filename = fullfile(outputFolder_normal,
sprintf('packet_reception_ratio_%d_5G.xls', iCycle));

```

```

if exist(filename, 'file')
    data = load(filename);
    plot(data(:,1), data(:,end), ...
        'Color', colores_normal(iCycle), ...
        'LineWidth', 2.5, ...
        'LineStyle', '-', ...
        'DisplayName', sprintf('Normal, %d veh/km²', rho))
end

end

title(sprintf('PRR Vehículos Normales - NR-V2X Urban, %d MHz', BandMHz))
xlabel('Distancia [m]')
ylabel('PRR')
legend('Location', 'southwest')
yline(0.95, '--k', 'PRR = 0.95', 'HandleVisibility', 'off')
ylim([0 1])
xlim([0 max(Raw)])

%% Gráfica 2: PRR Vehículos de Emergencia
figure('Name', 'PRR Vehículos Emergencia', 'NumberTitle', 'off')
hold on
grid on

colores_emerg = ['c', 'm', 'k'];
for iCycle = 1:length(densidades_emerg)

```

```

rho = densidades_emerg(iCycle);

filename = fullfile(outputFolder_emerg,
sprintf('packet_reception_ratio_%d_5G.xls', iCycle));

if exist(filename, 'file')

    data = load(filename);

    plot(data(:,1), data(:,end), ...

        'Color', colores_emerg(iCycle), ...

        'LineWidth', 2.5, ...

        'LineStyle', '-', ...

        'DisplayName', sprintf('Emergencia, %d veh/km²', rho))

    end

end

title(sprintf('PRR Vehículos de Emergencia - NR-V2X Urban, %d MHz',
BandMHz))

xlabel('Distancia [m]')

ylabel('PRR')

legend('Location', 'southwest')

yline(0.95, '--k', 'PRR = 0.95', 'HandleVisibility', 'off')

ylim([0 1])

xlim([0 max(Raw)])

%% Gráfica 3: Comparación directa Normal vs Emergencia

figure('Name', 'Comparación Normal vs Emergencia', 'NumberTitle', 'off')

```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
filename_normal = fullfile(outputFolder_normal,  
'packet_reception_ratio_2_5G.xls');
```

```
filename_emerg = fullfile(outputFolder_emerg,  
'packet_reception_ratio_2_5G.xls');
```

```
if exist(filename_normal, 'file')
```

```
    data_normal = load(filename_normal);
```

```
    plot(data_normal(:,1), data_normal(:,end), ...
```

```
        'b-', 'LineWidth', 2.5, ...
```

```
        'DisplayName', sprintf('Normal (100 veh/km2, %d B, %d km/h)',  
packetSize_normal, speed_normal))
```

```
end
```

```
if exist(filename_emerg, 'file')
```

```
    data_emerg = load(filename_emerg);
```

```
    plot(data_emerg(:,1), data_emerg(:,end), ...
```

```
        'r--', 'LineWidth', 2.5, ...
```

```
        'DisplayName', sprintf('Emergencia (10 veh/km2, %d B, %d km/h)',  
packetSize_emerg, speed_emerg))
```

```
end
```

```
title('Comparación PRR: Vehículos Normales vs Emergencia')
```

```
xlabel('Distancia [m]')
```

```

ylabel('PRR')
legend('Location', 'southwest')
yline(0.95, '--k', 'HandleVisibility', 'off')
ylim([0 1])
xlim([0 max(Raw)])

%% Mostrar resumen en consola
disp('=== SIMULACIONES COMPLETADAS ===')
disp(' ')
disp('Parámetros utilizados:')
disp('-----')
disp('          NORMAL  EMERGENCIA')
disp(['beaconSizeBytes:  ' num2str(packetSize_normal) ' '
num2str(packetSize_emerg)])
disp(['Retransmisiones:  ' num2str(nTransm_normal) ' '
num2str(nTransm_emerg)])
disp(['Velocidad (km/h):  ' num2str(speed_normal) ' '
num2str(speed_emerg)])
disp(['Desv. Vel (km/h):  ' num2str(speedStDev_normal) ' '
num2str(speedStDev_emerg)])
disp(['probResKeep:      ' num2str(pKeep_normal) ' '
num2str(pKeep_emerg)])
disp('-----')

```