

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Electrónico*

PROYECTO TÉCNICO:

**"DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADVERTENCIA DE RIESGOS EN
CARRETERA POR MEDIO DE COMUNICACIONES VEHICULARES**

AUTORES:

ALEXANDER VICENTE MEDINA CARRIÓN
EDGAR ANDRÉS MÉNDEZ ORDÓÑEZ

TUTOR:

ESTEBAN FERNANDO ORDOÑEZ MORALES, PH.D

CUENCA – ECUADOR
2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Alexander Vicente Medina Carrión con documento de identificación N° 1900478239 y Edgar Andrés Méndez Ordóñez con documento de identificación N° 0301337747, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **"DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADVERTENCIA DE RIESGOS EN CARRETERA POR MEDIO DE COMUNICACIONES VEHICULARES"**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Electrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

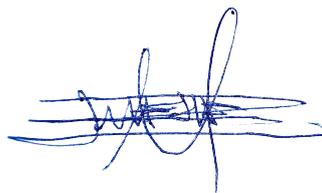
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero del 2020



Alexander Vicente Medina Carrión

C.I.: 1900478239



Edgar Andrés Méndez Ordóñez

C.I.: 0301337747

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "**DI-SEÑO DE UN SISTEMA DE ADVERTENCIA DE RIESGOS EN CARRETERA POR MEDIO DE COMUNICACIONES VEHICULARES**", realizado por Alexander Vicente Medina Carrión y Edgar Andrés Méndez Ordoñez, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero del 2020



Ph.D Esteban Fernando Ordóñez Morales

C.I.: 0102545381

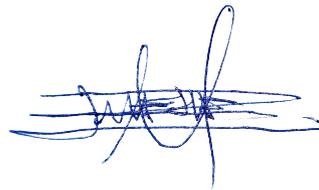
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Alexander Vicente Medina Carrión con documento de identificación N° 1900478239 y Edgar Andrés Méndez Ordóñez con documento de identificación N° 0301337747, autores del trabajo de titulación "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADVERTENCIA DE RIESGOS EN CARRETERA POR MEDIO DE COMUNICACIONES VEHICULARES**" certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, febrero del 2020



Alexander Vicente Medina Carrión
C.I. 1900478239



Edgar Andrés Méndez Ordóñez
C.I. 0301337747

AGRADECIMIENTOS

Una vez culminada mi carrera universitaria quiero expresar mi mayor gratitud a todas las personas que estuvieron presentes y fueron parte de este proceso de formación académica, a la Universidad Politécnica Salesiana que es el alma mater la cual me ha impartido una educación integral sin dejar de lado la parte humana y espiritual. Finalmente quiero manifestar mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis Ing. Esteban Ordoñez quien nos ha brindado su apoyo incondicional aportándonos con su conocimiento en esta fase de titulación.

- Alexander Vicente Medina Carrión

Sinceramente hay tantas personas que han estado conmigo desde que embarque en la misión de ser Ingeniero Electrónico que debo agradecer, sin hacer al lado a todos los que eh conocido en la Universidad, en especial a los docentes que con bondad y sabiduría me han guiado durante este periodo.

- Edgar Andrés Méndez Ordóñez

DEDICATORIA

Cada evento que sucede en nuestras vidas ya sea bueno o malo está a favor de nuestra evolución como seres humanos es por eso que, una vez culminada esta etapa de formación académica considero que cada logro alcanzado depende netamente de la actitud con la que uno se enfrenta a la vida y a pesar de las adversidades que se nos presenten, debemos ser perseverantes hasta cumplir con nuestros objetivos es por ello que, quiero dedicar este trabajo a mis padres que han sido un pilar fundamental en la formación como persona, brindándome todo su apoyo incondicional a pesar de los imponderables que se han presentado no solo en esta fase académica sino en mi vida diaria. También dedico a mi familia, quienes me han brindado su apoyo moral y han estado presentes en cada etapa de mi vida.

- Alexander Vicente Medina Carrión

Este proyecto se lo dedico a mi madre y a mis abuelitas por todo el apoyo que me han brindado durante este periodo de mi vida.

- Edgar Andrés Méndez Ordóñez

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA	III
ÍNDICE GENERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE CUADROS	XI
GLOSARIO	XIV
RESUMEN	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO	XIX
JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)	XXIII
OBJETIVOS	XXV
OBJETIVO GENERAL	XXV
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	XXV
1. COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE SEGURIDAD VEHICULAR	1
1.1. COMUNICACIONES V2V Y V2I	1
1.1.1. TOPOLOGÍA DE RED	3
1.2. ARQUITECTURA DE LAS OBUS Y RSUs	4
1.2.1. OBUS	4
1.2.2. RSUs	6
1.3. ESTÁNDARES Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN UTILIZADOS EN VANET	9
1.3.1. IEEE 1609	9
1.3.2. IEEE 802.11P	11

ÍNDICE GENERAL

1.3.3.	DEDICATED SHORT RANGE COMMUNICATION - DSRC . . .	13
1.3.4.	WSMP (WAVE SHORT MESSAGE PROTOCOL)	15
1.4.	SISTEMAS DE ADVERTENCIA EN EL VEHÍCULO	16
1.4.1.	TIPOS DE ADVERTENCIAS	20
1.5.	SISTEMAS DE ADVERTENCIA EN LA CARRETERA	23
1.6.	SÍNTESIS DEL CAPÍTULO	27
2.	FACTORES TOPOGRÁFICOS	29
2.1.	FACTORES TOPOGRÁFICOS DE UNA CARRETERA	29
2.1.1.	CURVAS	29
2.1.2.	PENDIENTES	30
2.1.3.	PARÁMETROS QUE ESTABLECEN EL GRADO DE SEGURIDAD VIAL	31
2.1.4.	VISIBILIDAD	33
2.2.	FACTORES PARA CONTRARRESTAR EL RIESGO	34
3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA SARC PARA MAPEAR CA- RRETERAS	37
3.1.	CLASIFICACIÓN DE LA CARRETERA	37
3.1.1.	CURVAS DESEABLES	39
3.1.2.	CURVAS DE BAJO-RIESGO	40
3.1.3.	CURVAS DE ALTO-RIESGO	41
3.2.	IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE ADVER- TENCIA EN CARRETERA (SARC)	42
3.3.	EJECUCIÓN DEL PROGRAMA SARC	46
4.	DISEÑO Y LINEAMIENTOS DEL SISTEMA DE ADVERTENCIAS DE RIES- GOS EN CARRETERA	51
4.1.	SISTEMA DE ADVERTENCIA DE LA CURVA	51
4.2.	SISTEMA DE ADVERTENCIA MULTI-MODAL DENTRO DEL VEHÍCULO	57
4.3.	COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	61
4.4.	SÍNTESIS DEL CAPÍTULO	63
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	65
5.1.	CONCLUSIONES	65

ÍNDICE GENERAL

5.1.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA PARA MA- PEAR UNA CARRETERA	66
5.1.2. DISEÑO Y LINEAMIENTOS DEL SISTEMA DE ADVERTENCIAS DE RIESGOS EN CARRETERA	67
5.1.3. SISTEMAS DE ADVERTENCIAS DE RIESGOS DENTRO DEL VEHÍCULO	68
5.2. RECOMENDACIONES	69
5.3. TRABAJOS FUTUROS	69
BIBLIOGRAFÍA	83
A. ALGORITMO	85
B. MAPA TAQUIMÉTRICO	89

Índice de figuras

1.1.	ENTORNO DE COMUNICACIÓN VANET	3
1.2.	ARQUITECTURAS DE UN A) UNA OBU Y B) UNARSU	4
1.3.	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA OBU	5
1.4.	DIAGRAMA CONSTITUTIVO DE UNA RSU	7
1.5.	ARQUITECTURA Y RELACIÓN DE IEEE 1609 Y 802.11	11
1.6.	CANALES WAVE PARA OPERACIÓN MULTICANAL EN VANET	12
1.7.	TIPOS DE ADVERTENCIAS	20
1.8.	UBICACIÓN DE ACTUADORES VIBROTÁCTILES	21
1.9.	CHEVRON	25
1.10.	CHEVRON	26
1.11.	SEÑAL LED DE LÍMITE DE VELOCIDAD	26
2.1.	FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL VEHÍCULO EN UNA CURVA	30
3.1.	DIAGRAMA DE UNA CURVA DESEABLE	40
3.2.	DIAGRAMA DE UNA CURVA DE BAJO-RIESGO	41
3.3.	DIAGRAMA DE UNA CURVA ALTO-RIESGO	41
3.4.	DIAGRAMA DE FLUJO	45
3.5.	EJEMPLO DE CONTENIDO DEL ARCHIVO <i>.csv</i>	46
3.6.	INTERFAZ INICIAL DE USUARIO	47
3.7.	TABLA DE RESULTADOS DEL SARC	48
3.8.	MAPA RESULTADO DEL SARC	48
4.1.	ELEMENTOS DE UNA CURVA BAJO-RIESGO	52
4.2.	ELEMENTOS DE UNA CURVA ALTO-RIESGO	53
4.3.	SEÑALÉTICA CON ILUMINACIÓN DINÁMICA	54
4.4.	CHEVRON Y BARRERAS REFLECTIVAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

4.5.	ANTENA RSU	55
4.6.	CASO 1. CURVA CON OBSTÁCULOS	56
4.7.	CASO 1. CURVA SIN OBSTÁCULOS	57
4.8.	AUTO APROXIMANDOSE A UNA CURVA DE RIESGO	58
4.9.	ALERTA VISUAL	59
4.10.	ALERTA AUDITIVA	59
4.11.	ALERTA HÁPTICA EN EL VOLANTE	60
4.12.	ALERTA HÁPTICA EN EL PEDAL	60
4.13.	DIAGRAMA DE ALERTA MULTI-MODAL	61
B.1.	VÍA A PUCARÁ - TRAMO 1	90

Índice de cuadros

1.1.	CARACTERÍSTICAS DE LAS OBU S SEGÚN SUS FABRICANTES	6
1.2.	CARACTERÍSTICAS DE LAS RSU S SEGÚN SUS FABRICANTES	8
1.3.	ESPECTROS ASIGNADOS PARA APLICACIONES WAVE/DSRC . . .	16
1.4.	PREMIOS EURO NCAP A SISTEMAS DE SEGURIDAD SOBRESALIENTES	18
1.5.	DIMENSIONES DE LA SEÑALÉTICA DE CHEVRONES DE CURVA . . .	26
1.6.	DIMENSIONES DE LA SEÑALÉTICA LED DE LÍMITE DE VELOCIDAD	27
2.1.	TASA DE FRICCIÓN LATERAL	32
2.2.	PERALTE RECOMENDAD	33
2.3.	RADIOS MÍNIMOS PARA CURVAS HORIZONTALES EN FUNCIÓN DE LAS TASAS Y VELOCIDADES DE DISEÑO	33
3.1.	VARIABLES INVOLUCRADAS	38
3.2.	CLASIFICACIÓN DE CURVAS	39
4.1.	ÁREA DE COBERTURA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA «A»	54
4.2.	COSTO DE DESARROLLO DEL SARC	62
4.3.	COSTOS PARA CURVAS DEL CASO 1	62
4.4.	COSTOS PARA LA CURVA DEL CASO 2	62

GLOSARIO

AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials.

AusRAP Australian Road Assessment Program.

BSS Basic Service Set.

BSSID Basic Service Set Identifier.

CCH Control Channel.

C-V2X Cellular-Vehicle-to-Everything.

DOT Department of Transportation.

DSRC Dedicated Short Range Communication.

ETSI European Telecommunications Standards Institute.

FHWA Federal Highway Administration.

INEC Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización.

ITS Intelligent Transportation System.

MAC Media Access Control.

MTOP Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

NCAP New Car Assessment Programme.

OBU On-board Unit.

OCB Outside Context BSS.

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

RSU Road-side Unit.

SARC Sistema de Advertencia de Riesgos.

SCH Service Channel.

USDOT United States Department of Transportation.

V2I Vehicle-to-Infraestructure.

V2V Vehicle-to-Vehicle.

VANET Vehicular Ad-Hoc Network.

WAVE Wireless Acces in a Vehicular Environment.

WSM WAVE Short Message.

WSMP WAVE Short Message Protocol.

RESUMEN

En este documento se presenta el proceso de desarrollo e implementación de una aplicación que permite determinar tramos peligrosos en una carretera. En primer lugar, se realizó un estudio del estado actual de las redes vehiculares, buscando enfatizar las aplicaciones enfocadas a mejorar la seguridad para todos los usuarios de la red vial. Luego se procedió a investigar sobre los sistemas de advertencia de riesgos existentes y disponibles comercialmente, en donde notamos la clara disminución de accidentes con la implementación de éstos enfoques. Una vez entendidos los tipos de sistemas que operan y la forma en que se comunican, procedimos a investigar los estándares de diseño y construcción de carreteras empleadas por ingenieros civiles a nivel mundial, con el fin de encontrar un modelo matemático que nos permita asociar los factores geométricos y topográficos con una velocidad directriz a la que típicamente circulan el 80 % de los vehículos. De esa forma se puede establecer el nivel de seguridad de un tramo de vía según su diseño geométrico. Después de entender éstos factores, se diseñó e implementó un algoritmo para obtener los parámetros reales de diseño de las tablas de mapas taquimétricos, y efectuar un análisis que identifique los sectores de riesgo en donde la geometría imponga un incremento en la probabilidad y severidad de accidentes, como es el caso de curvas con radios pequeños o cerrados. Una vez que se identificó las zonas de riesgo, umbralizamos los resultados obtenidos, de tal manera que se pueda brindar atención especial a los lugares críticos. También presentamos algunas de las soluciones que actualmente se emplean para contrarrestar el peligro vial en países más desarrollados, tal como los dispositivos comercializados por TAPCO que incorporan señalización lumínica y dinámicamente adaptable para facilitar la interpretación del usuario. Finalmente, se proponen el diseño de nuestra infraestructura destinada a proteger a los

usuarios y poder desplegar una red vehicular en las zonas establecidas como peligrosas con el fin de brindar a los conductores y usuarios en general distintas formas de advertencia ante posibles riesgos que pueden suscitar.

INTRODUCCIÓN

En esta última década se han desarrollado servicios de seguridad para el transporte debido a que los accidentes de tránsito han aumentado en una mayor proporción por el crecimiento del parque automotor, especialmente en países en desarrollo, donde la tasa de muertes es tres veces mayor a la de países desarrollados [1]. Esto causa grandes pérdidas económicas, y aún más grave, aproximadamente un millón trecientos cincuenta mil muertos globalmente cada año, haciendo que los accidentes de tránsito sean la primera causa de muerte a nivel mundial para personas de entre cinco y veintinueve años; y la octava causa de todas las muertes en el planeta [1].

Los accidentes ocasionados son producidos por varias razones, generalmente se deben al mal comportamiento del conductor a la hora de operar el vehículo [2]. Inclusive si consideramos que el número de muertos por cada cien mil vehículos a disminuido de 135 a 64 entre el año 2000 y el 2016 gracias a estándares más rigurosos de seguridad vehicular y vial, representando una reducción de más del cincuenta por ciento en accidentes; esta cifra no es suficiente para compensar la alta tasa de crecimiento demográfico y de motorización [1]. Por ello, los mecanismos de seguridad existentes por sí solos no son suficientes para contrarrestar el error humano, consecuentemente no disminuyen el número de accidentes de tránsito de una forma sustancial. Para ese propósito, se espera que los sistemas de transporte inteligentes (del inglés, Intelligent Transportation Systems o [ITS](#)), especialmente la cooperación entre los automóviles que comparten información del tráfico anticipadamente, facilitará al conductor conocer el estado e infraestructura de comunicaciones de la carretera, teniendo el suficiente tiempo para maniobrar y evitar accidentes [3]. Los [ITS](#) son aplicaciones avanzadas que intentan proveer servicios innovadores relacionados con la gestión del tráfico. Estos sistemas per-

miten que el usuario este mejor informado, preparado y más coordinado para transportarse de una manera inteligente, incluyendo comunicación con servicios de emergencia en el caso de accidentes, monitoreo de carreteras, el uso de infraestructura vial para garantizar que se cumplan las leyes y normativas vigentes, e inclusive señalética que se acople a las condiciones externas de la carretera.

Bajo petición de la asamblea general de las naciones unidas a fines del 2017, los estados que la conforman llegaron a un consenso de doce objetivos globales de desempeño en materia de seguridad vial, en donde se establecen metas para el 2020 y el 2030. Entre los doce objetivos tenemos algunos pertinentes al diseño y construcción de vehículos y carreteras con factores de seguridad que ayuden a preservar la vida y salud de todos los usuarios de las vías [1]. Para contribuir hacia esta meta, líderes políticos a nivel mundial están implementando legislación que regule y mejore la infraestructura vial e implemente sistemas de advertencia en carretera. Los fabricantes de vehículos están diseñando e instalando sistemas de seguridad innovadores para sobreguardar la integridad de las personas que invierten en sus marcas; inclusive se espera que para el 2030 todos los vehículos nuevos y usados cumplan con los altos estándares de seguridad sugeridos por las naciones unidas y la organización mundial de la salud [1].

Con este proyecto buscamos aportar a las [ITSs](#) y a la seguridad vial en nuestro país de dos maneras. Primero, brindando una forma para determinar los tramos con riesgos impuestos por el diseño de la carretera rápidamente. Segundo, proponiendo la mejor manera de advertir a los usuarios.

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

En el transcurso de los años, a nivel mundial se han implementado varios sistemas que buscan aprovechar las tecnologías de conexión de vehículos con el fin de facilitar la movilidad en las ciudades pero principalmente para brindar seguridad al usuario. Algunos de los sistemas que se destacan se presentan a continuación:

- **USDOT** Multi-Modal Intelligent Traffic Signal System (MMITSS) hace uso del estándar SAE J2735-2009 en su funcionamiento e intenta suministrar un marco comprensivo de gestión de tránsito inteligente para todos los modos de transporte haciendo uso de conexiones inalámbricas entre vehículos y dispositivos de señalización dispuestos en la carretera. Toma información en tiempo real para administrar recursos, maximizar el flujo vehicular y garantizar que vehículos de emergencia tengan la prioridad necesaria en la vía [4].
- *SMARTDrive*, funciona en Maricopa County, Arizona desde el 2007, en el que el departamento de transporte (del inglés, Department of Transportation o **DOT**) estatal en conjunto con la universidad de Arizona implementaron un sistema que permite identificar aplicaciones que mejoran la operación de la señalética de tránsito, el manejo de incidentes y la gestión de información de los usuarios de la vía con el fin de prevenir colisiones entre vehículos de primera atención que estén respondiendo a una emergencia [5,6].
- En condados como Concord y en Palo Alto en California, la autoridad de transporte en conjunto con la universidad de Berkeley, facilitan el trabajo

colaborativo de fabricantes de vehículos, auto-partes, comerciantes, proveedores, compañías de telecomunicaciones, compañías tecnología, investigadores y todos aquellos que tengan interés en la investigación, desarrollo, validación y comercialización de aplicaciones que serán usadas para conectar vehículos y hacerlos autónomos; mediante áreas de trabajo en tramos de carretera con intersecciones y tráfico real [7,8].

- En el 2015 Montréal comenzó con el proyecto *Smart Mobilty* que busca proveer información relacionada con el estado de vehículos de transporte público, congestión vehicular, embotellamientos y la gestión de espacios para estacionar en el centro de la ciudad, todo en tiempo real, también organizan sistemas de transporte inteligentes con despliegues de información para todos los usuarios, haciendo uso de tecnologías de comunicación vehicular, de forma activa, en el desarrollo de dicho campo [9].
- El laboratorio nacional en Idaho implementó dos etapas de sistemas de vehículos conectados entre el 2015 y el 2017. Se recolectó condiciones climáticas de la carretera de sensores montados en vehículos quitanieves para incorporar en sistemas de asistencia al conductor y facilitar el funcionamiento de los sistemas de gestión de riesgos en carretera y la interacción entre vehículos y equipos de infraestructura que operan bajo los lineamientos de las comunicaciones dedicadas de corto alcance [10].
- El [DOT](#) de Maryland planifica que para enero del 2020 ya estén en funcionamiento sistemas que usan las tecnologías de vehículos conectados para satisfacer las necesidades de las redes vehiculares en por lo menos en un tramo o red de carretera estatal [11].

Aparte de los sistemas mencionados, existen muchos otros que se están desarrollando alrededor del mundo, todos ellos incorporando tecnologías de comunicación inalámbrica con el fin de conectar vehículos entre si y con la infraestructura que los rodea de tal manera que se puedan implementar aplicaciones que contrarresten varios problemas que los conductores afrontan día a día. Todos estos sistemas usan información de sensores internos y externos al vehículo para

obtener información relevante; sin embargo, no se ha diseñado un algoritmo que considere las características geométricas del diseño vial para identificar los lugares donde sería conveniente incrementar o mejorar el tipo de advertencias que reciben los conductores.

JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)

En el Ecuador, alrededor de 2000 personas mueren y otras 21500 resultan heridas anualmente en accidentes de tránsito [2], ubicándose entre las cuatro primeras causas de mortalidad en el país. Hay varias razones por las que se producen accidentes en nuestras carreteras, pero la mayoría se resumen en el mal comportamiento del conductor a la hora de operar el vehículo. Según el [INEC](#) (Instituto Nacional de Estadística y Censos) la impericia e imprudencia del conductor causan el 56,3 % de todos los accidentes de tránsito, con el irrespeto de las normas, reglamentos y señales de tránsito agravando esta estadística en un 25,8 % [2].

Según el anuario de transporte publicado en el 2016 por el [INEC](#), se conoce que en el Ecuador se registran un promedio de 2522 accidentes al mes, con meses como enero en donde se excede los 3000 siniestros [2]. De éstos, los choques, atropellos y estrellamientos representan el 75,5 % de todos los accidentes y han dejado centenas de muertes y miles de heridos [2]. Este dato se vuelve aún más significativo en la aseveración del anuario del 2017, en donde el [INEC](#) establece que la cantidad de vehículos matriculados se ha incrementado en un 8,8 % entre el 2016 y el 2017 [12]. Lo que ha acarreado un aumento del 3,2 % de víctimas, dejando un saldo de 560 víctimas más que el año anterior [2,12].

Teniendo en mente lo mencionado y considerando que el Ecuador tiene uno de los índices más altos de accidentes de tránsito en Latino-América por cada mil vehículos matriculados y que, aproximadamente, la mitad de estos accidentes dejan como resultado muertos y heridos [12]; se propone desarrollar un sistema de advertencia de riesgos en carretera ([SARC](#)). Por medio del diseño de una aplicación para mapear carreteras, la aplicación identifica la ubicación de los tramos y curvas peligrosas. Una vez identificados los puntos peligrosos de una carretera,

es posible posicionar infraestructura de comunicación en estos lugares para posibilitar que vehículos públicos y privados puedan recibir información con el fin de detectar las condiciones de la vía, tales como la presencia de factores de riesgo, y precautelar a los conductores con información pertinente. Por medio de esta la infraestructura se puede habilitar la comunicación entre los vehículos en la vía mientras se desplazan a su destino.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un sistema de advertencia de riesgos en carretera para precautelar la vida de conductores y pasajeros de los distintos vehículos que transitan por las carreteras.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar las comunicaciones **V2V** y **V2I** en redes vehiculares (**VANET**, Vehicular Ad-Hoc Network).
- Investigar el Estado del arte sobre sistemas de advertencia de curvas.
- Investigar factores topográficos relevantes de una carretera para determinar los tramos críticos de una vía (curvas y descensos).
- Implementar una aplicación capaz de mapear una carretera para detectar los puntos críticos en una ruta preestablecida con el fin de establecer los tramos peligrosos.
- Definir la infraestructura de comunicación del sistema de advertencia de curvas y descensos peligrosos, que se situará en el entorno de la carretera para el apoyo de las comunicaciones entre vehículos y su entorno según los datos obtenidos de la aplicación de mapeo de la carretera.

Capítulo 1

COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE SEGURIDAD VEHICULAR

1.1. COMUNICACIONES V2V Y V2I

Las redes vehiculares Ad-Hoc (del inglés, Vehicular Ad-Hoc Network o **VANET**) se constituyen a través de topologías dinámicas con varios vehículos (nodos) que tienen un rango de comunicación al rededor de 1 *km* y se pueden mover a velocidades de hasta 200 *km/h* [13], pero a comparación con otras redes móviles Ad-Hoc, son más predecibles ya que se puede asumir que un vehículo se mantendrá en la carretera y seguirá las leyes de tránsito. Este tipo de red vehicular permite a los conductores y pasajeros en vehículos comunicarse de manera eficaz desde un vehículo con su entorno. Esta forma vanguardista de compartir información, permite incorporar una variedad de aplicaciones de seguridad, manejo eficiente del tráfico, asistencia al conductor, infoentretenimiento y detección del medio urbano que lo rodea, todo esto en las nuevas generaciones de vehículos [13–15].

En las **VANETs**, los vehículos espontáneamente forman una red mientras viajan por la carretera y cada uno de estos porta un módulo a bordo (del inglés, On-Board Unit o **OBU**). Estos dispositivos pueden soportar comunicación **V2V** (Vehículo a Vehículo) y **V2I** (Vehículo a Infraestructura) que se complementan con unidades de carretera (del inglés, Road-Side Unit o **RSU**) [13–16]. La principal diferencia entre las **OBUs** y **RSUs** es que una **RSU** tiene una antena adicional trabajando en una banda WiFi que se puede comunicar con una red central, y dado que reside a la intemperie es necesario protegerla con una estructura certifica-

da con IP67 [17] en el estándar IEC 60529, el cual garantiza la protección contra agua y polvo [18].

Las VANETs pueden ser desplegadas en diferentes entornos, ya sea en el centro de la ciudad con edificios altos y muchas fuentes de ruido, como en las autopistas y carreteras abiertas ya que se tiene una arquitectura donde RSUs y OBU habilitan la comunicación entre vehículos y su entorno de tal manera que se puede compartir todo tipo de información; haciendo un énfasis en datos que permitan controlar y optimizar el tránsito vehicular en diferentes entornos [13]. Las RSUs y OBUs son herramientas adecuadas para prevenir accidentes mediante avisos pertinentes, ejerciendo funciones tales como el mantenimiento de la distancia entre vehículos, asegurando que se cumplan los límites de velocidad, e inclusive activando automáticamente los frenos y otros sistemas de prevención cuando sea necesario. También se tienen aplicaciones que facilitan el hallazgo de vehículos robados o que estén siendo buscados y otros sistemas de prevención y gestión en casos críticos [19].

Las características más relevantes de una VANET son las siguientes:

- **Autonomía:** Cada elemento que conforma la red es un nodo autónomo con capacidad de procesar y enrutar la información procedente de otros nodos de la misma red [16].
- **Control distribuido de red:** Al no tener una infraestructura móvil, el control de los procesos se lo realiza en cada nodo [15,16].
- **Topología altamente dinámica:** Una red tiende a manejar una topología variante debido a dos razones en particular: En primer lugar se toma en consideración la velocidad de los vehículos y en segundo lugar, las características de la propagación por radio. Los vehículos se pueden mover en diferentes direcciones, en algunas ocasiones puede ser predecible lo cual ocasiona que se puedan unir o salir rápidamente de una red determinada en un periodo de tiempo bastante corto dependiendo de la velocidad en que circula en un entorno dado (urbano o rural), lo anterior genera cambios topológicos frecuentes y rápidos [14,16,20].

1.1.1. TOPOLOGÍA DE RED

El propósito de la implementación de una red **VANET** es permitir la comunicación entre vehículos y equipos fijos de carretera que conducen a las siguientes tres posibilidades:

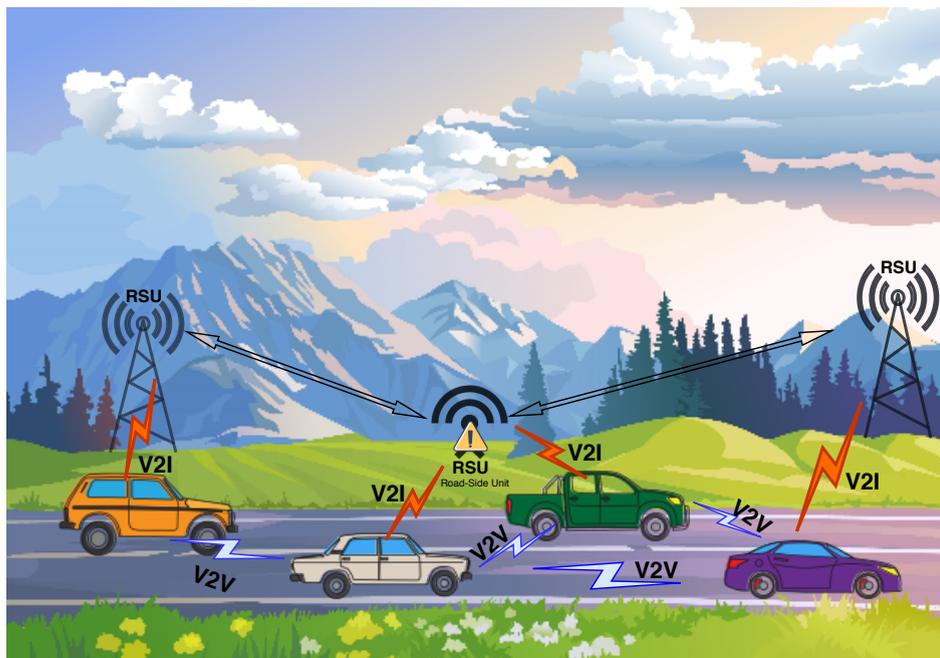


Figura 1.1: Entorno de comunicación VANET.

Fuente: Autores

- **V2V:** Permite comunicación vehicular directa sin depender de un soporte de infraestructura fijo y puede emplearse principalmente para aplicaciones de seguridad y difusión de información [14,20].
- **V2I:** Permite que un vehículo se comuniquen con la infraestructura en carretera principalmente para aplicaciones de recopilación de información y datos [14,20].
- **Arquitectura Híbrida:** Como se puede apreciar en la [Figura 1.1](#), una red híbrida combina la comunicación entre redes **V2V**, **V2I** e inclusive conexiones con peatones. En este escenario, un vehículo puede comunicarse con la infraestructura en el camino, ya sea de un solo salto o de varios saltos, dependiendo de la distancia [14,20,21].

1.2. ARQUITECTURA DE LAS OBUS Y RSUS

Las **OBUs** y **RSUs** contienen un microprocesador, con interfaces para habilitar Internet, USB, WLAN de alta potencia, módulos de posicionamiento global y los complementa con capacidad de procesamiento y comunicación integrando SDRAM, memoria flash, y antenas RF [17]. Ambos dispositivos de comunicación trabajan con el estándar IEEE 1609 y el IEEE 802.11p. Todas las unidades operan en la banda de licencia de 75 MHz en el espectro de 5,9 GHz con 7 canales de 10 MHz cada uno, incluyendo soporte de operación multicanal (canal de control y canal de servicio) [17].

Los fabricantes de marcas exclusivas como Audi, BMW, Mercedes Benz, Volvo, Tesla e inclusive Honda y Toyota están instalando **OBUs** en sus vehículos nuevos, con el afán de apostar por este tipo de tecnología en el futuro cercano [22,23]; sin embargo, otros fabricantes están desarrollando equipos para vehículos que no incorporen estos sistemas por defecto.

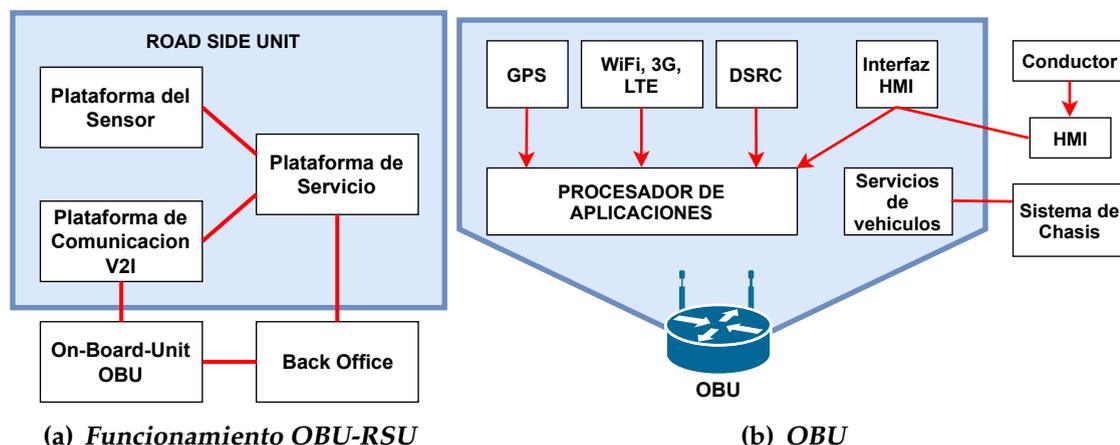


Figura 1.2: Arquitecturas de a) una OBU y b) una RSU.
Fuente:Autores

1.2.1. OBUS

En la [Figura 1.3](#) se ilustra un diagrama genérico de las características que una **OBU** debe incorporar para trabajar en un entorno vehicular móvil. Existen varias compañías que han desarrollado equipos que cumplen con los requisitos necesarios normalizados por los diferentes estándares que rigen estas comunicaciones.

Ciertos fabricantes se destacan por ser pioneros en el mercado y por las prestaciones que sus dispositivos brindan. En el Cuadro 1.1, se presentan las especificaciones de hardware de algunos de los fabricantes más respetables, con los servicios pertinentes que requieren dentro de una VANET.

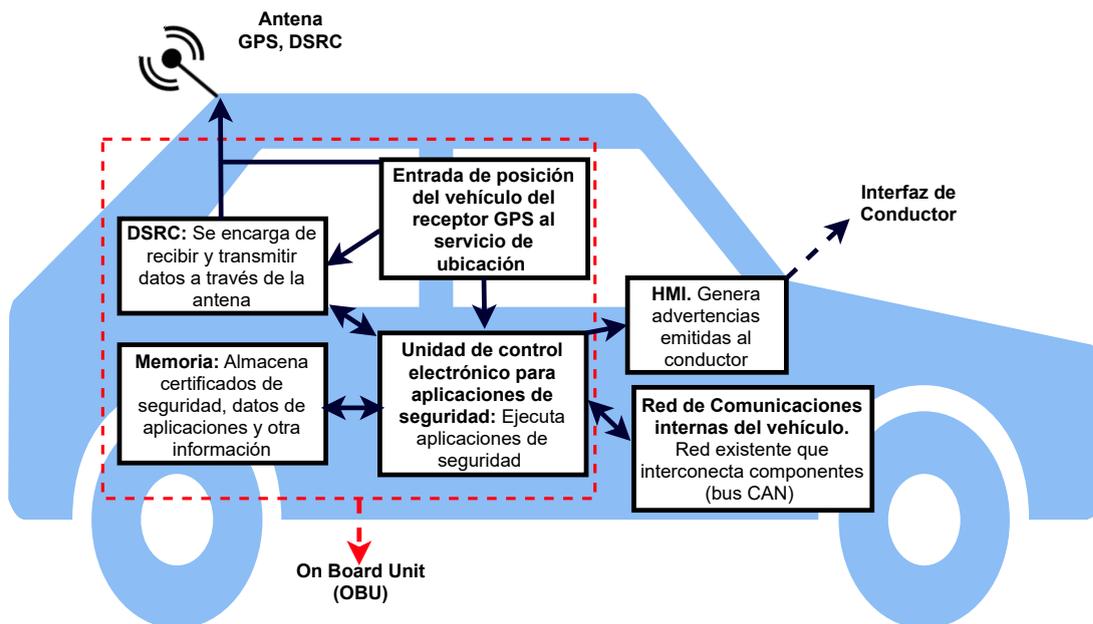


Figura 1.3: Diagrama de funcionamiento de una OBU.
Fuente: Autores

Se puede destacar que todos los equipos listados en el Cuadro 1.1 prestan características similares. El dispositivo que presenta Unex Technology [24], es uno de los pioneros en el mercado; sin embargo, su hardware es inferior al de competidores como Cohda Wireless [25], Savari [26], DawLaw [27] y especialmente Commsignia [28]. El hardware que ofrecen los otros fabricantes es equivalente en cuestión de procesadores, memoria y periféricos, lo que los diferencia son los servicios, estándares de diseño y certificaciones que cada uno dispone. Aparte de las prestaciones, se conoce que Danlaw y OmniAir están entre las principales compañías encargadas en la certificación de dispositivos DSRC [29, 30]. Ambas empresas han certificado los dispositivos de Commsignia; por esto se considera que la ITS-OB4 es la OBU más adecuada, y que el MW1000 de Saavari es la segunda mejor opción ya que las OBUs de Savari y Codha también cumplen satisfactoriamente las necesidades de conectividad y operación. Para casos especiales, como vehículos antiguos que no incorporan antenas adecuadas y presentan dificultad

CAPÍTULO 1. COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE SEGURIDAD VEHICULAR

en la ubicación de la antena **DSRC**, Danlaw comercializa a *Through Glass Integrated V2X Antenna* que puede ser montada sobre una de las ventanas del vehículo para habilitar la transmisión y recepción de información de **WAVE** [31].

Cuadro 1.1: Características de las OBUs según sus fabricantes.

Dispositivo	Procesador	Memoria	Frecuencias [GHz]	Servicios y protocolos
UNEX 301E ¹	AutoTalks CRA- TON2 V2X / dual 600MHz ARM Cortex-A7	128MB DDR3	5.85-5.925	ETSI ITS-G5, IEEE 802.11p, GeoNetwork, BTP, DSRC
Codha Wireless OBU ²	NXP i.MX6 Dual Lite 800MHz	1GB SDRAM	5.18-5.93	IPv6, IPv4, IEEE 1609.3, WSMP, WME, SAE J2735, ETSI TC-ITS G5, GN, GN6, BTP
Savari MW1000 ³	NXP i.MX6 Dual Core 800MHz	1GB DDR3	5.9	802.11p, IEEE 1609.x, SAE J2735, J2945
Danlaw Autolink ⁴	NXP i.Mx6	1GB DDR3	5.9	DSRC, C-V2X, GNSS, USDOT RSU Specs v4.1
Commsignia ITS-OB4 ⁵	NXP i.MX6 1GHz	2GB DDR3	5.9	ETSI ITS G5, IEEE, SAE, ISO, GNSS, GPIO

1.2.2. RSUs

Para que una **RSU** cumpla todos los requisitos establecidos por el **USDOT**, debe seguir varios lineamientos en su diseño, tal como: soportar modos de un canal dual y canal continuo alternando canales **DSRC** simultáneamente, poseer una computadora interna para almacenar y procesar información, un sistema integrado de posicionamiento global, fácil alimentación eléctrica y una estructura que brinde protección adecuada a los equipos que conforman la unidad, tal co-

¹<https://unex.com.tw/products/dsrc-v2x/v2xsolution/v2xmodule/v2x-subsystem-module/detail/som-301e> (Accedido: 11-Sep-2019)

²<https://cohdawireless.com/solutions/hardware/mk5-obu> (Accedido: 11-Sep-2019)

³https://savari.net/wp-content/uploads/2019/05/MW-1000_August2017.pdf (Accedido: 11-Sep-2019)

⁴https://www.danlawinc.com/wp-content/uploads/DS_Aftermarket_Safety_Device_V9.pdf (Accedido: 11-Sep-2019)

⁵https://www.commsignia.com/wp-content/uploads/2019/04/Commsignia_ITS_OB4 (Accedido: 11-Sep-2019)

mo se ve en el diagrama de la [Figura 1.4](#) [32,33]. Los fabricantes deben obtener certificaciones para sus dispositivos [29,30], que garanticen el cumplimiento de los parámetros establecidos por el [USDOT](#) en su publicación *RSU Specifications v4.1* para todos los dispositivos que funcionarán en los Estados Unidos [33] y los equipos que estén designados para operar en la unión Europea deberán acogerse adicionalmente a los lineamientos del [ETSI EN 302 663](#) [34]. Como se vio anteriormente, en la [Sección 1.2](#), las [RSUs](#) cumplen dos funciones principales. Primero proporcionan acceso IPv4/IPv6 a terminales de red remotos y, segundo, enviar y recibir mensajes tal como están definidos en el [SAE J2735](#) [35].

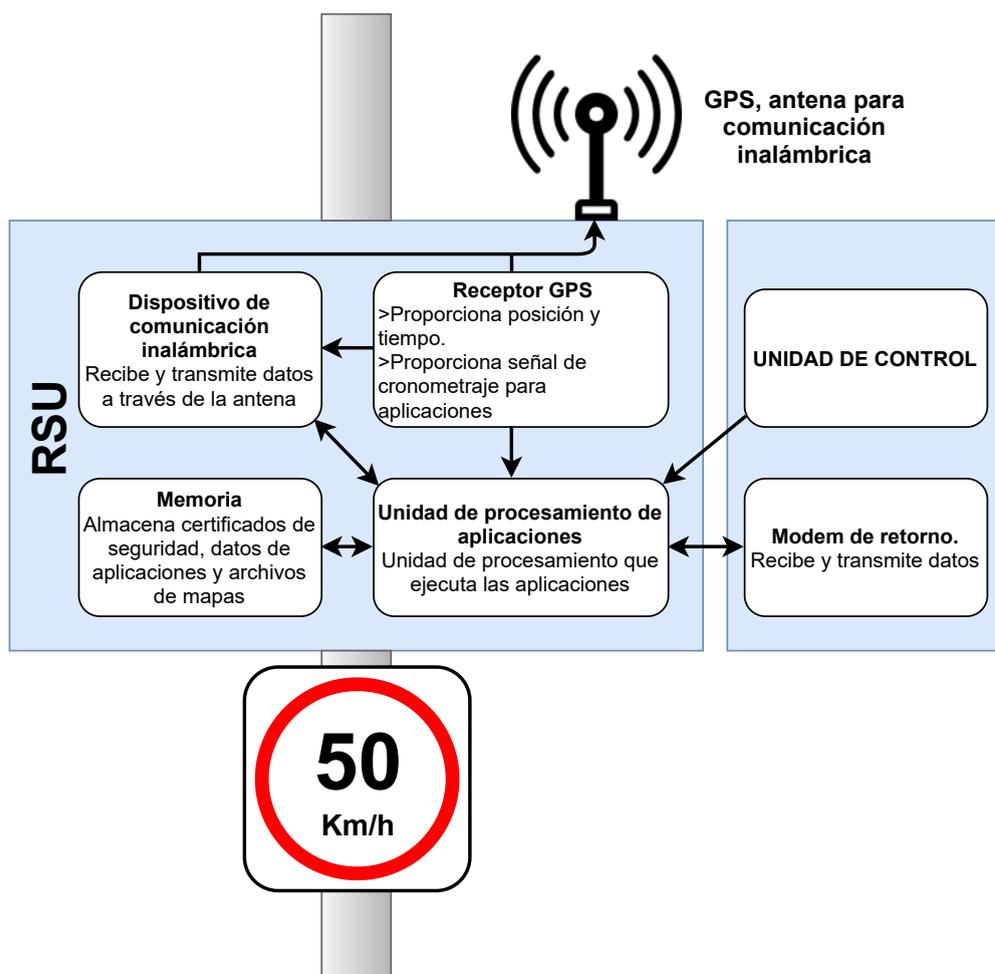


Figura 1.4: Diagrama constitutivo de una RSU.

Fuente: Autores

A continuación se presenta el [Cuadro 1.2](#) con algunos de los principales fabricantes de [RSUs](#) y sus respectivas especificaciones de hardware y servicios necesarios para incorporar en una [VANET](#):

CAPÍTULO 1. COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE SEGURIDAD VEHICULAR

Cuadro 1.2: Características de las RSUs según sus fabricantes.

Dispositivo	Procesador	Memoria	Frecuencias [GHz]	Servicios
Codha Wireless RSU ⁶	NXP i.MX6 Dual Lite 800MHz	1GB DDR	5.18-5.93	IPv6, IPv4, IEEE 1609.3, WSMP, WME, SAE J2735, ETSI TC-ITS G5, GN, GN6, BTP
Savari SW1000 ⁷	NXP i.MX6 Dual Core 800MHz	1GB DDR	5.9	802.11p, IEEE 1609.x, SAE J2735, J2945
Savari SW2000 ⁸	NXP i.MX6 Dual Core 800MHz	2GB DDR	5.9	802.11p, IEEE 1609.x, SAE J2735, C-SAE 53-2017, NTCIP 1202 US-DOT v4.1a RSU specification, ETSI ES 202 63
Danlaw RouteLink ⁹	Freescale i.MX6 800MHz	1GB DDR	5.9	IPv6, IPv4, IEEE 1609.x, IEEE 802.11p, SAE J2735, NTCIP, GNSS, USDOT RSU Specs v4.1
Commsignia ITS-RS4 ¹⁰	NXP i.MX6 1GHz	2GB DDR3	5.9	DSRC, IEEE, ETSI ITS G5, C-V2X, GNSS

En el Cuadro 1.2 se puede ver la similitud de los equipos según sus características de hardware. La principal diferencia son los servicios que ofrece cada fabricante, como es el caso de Cohda Wireless [36], Savari [37] y Commsignia [38] que en adición a los lineamientos del USDOT también cumplen con los parámetros del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (del inglés European Telecommunications Standards Institute o ETSI), permitiendo que sus equipos también operen en la unión Europea. El distintivo entre las RSU MW2000 y MW1000 del fabricante Savari, es el tipo de conectividad que ofrece la primera, permitiendo la comunicación celular-vehículo-con-todo (del inglés, cellular-vehicle-to-everything o C-V2X). Esto amplía el rango de vinculación en las VANETS, dando acceso a la inclusión de peatones que tengan celulares con antenas compatibles [37,39]. Las empresas Danlaw y el consorcio OmniAir certifican estos

⁶<https://cohdawireless.com/solutions/hardware/mk5-rsu/> (Accedido 12-Sep-2019)

⁷https://savari.net/wp-content/uploads/2019/05/SW-1000_August2017.pdf (Accedido: 12-Sep-2019)

⁸https://savari.net/wp-content/uploads/2019/05/SW-2000_May2019.pdf (Accedido: 12-Sep-2019)

⁹https://www.danlawinc.com/wp-content/uploads/DS_RSU_Datasheet_V12.pdf (Accedido: 13-Sep-2019)

¹⁰https://www.commsignia.com/wp-content/uploads/2019/04/Commsignia_ITS_RS4 (Accedido: 13-Sep-2019)

dispositivos bajo el cumplimiento de ciertas normativas [29,30]. Entre las [RSU](#) listadas, SW2000 brinda prestaciones ideales a un precio accesible [39]; sin embargo, Commsignia ITS-RS4 destaca su superioridad en Hardware y servicios disponibles [38], cumpliendo los requisitos de las certificaciones otorgadas por Danlaw y OmniAir.

1.3. ESTÁNDARES Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN UTILIZADOS EN VANET

Los estándares que regulan las redes vehiculares se constituyen dentro del campo de redes inalámbricas. Funcionan bajo la familia de estándares IEEE 1609, que se conforma de un conjunto de normativas que rigen el modelo de comunicación, la estructura de gestión, los mecanismos de seguridad y el acceso físico; facilitando de esta forma, la interacción entre las comunicaciones de dispositivos en el entorno de redes inalámbricas vehiculares [13, 16, 40, 41]. En conjunto con los estándares IEEE 802.11p, que define los dos niveles de la arquitectura OSI específicamente en la capa física (PHY) y en la capa de enlace de datos ([MAC](#)), y el 802.11b que inicialmente sirvió como base. Sin embargo, a la fecha, el desarrollo en este campo se realiza principalmente bajo el estándar 802.11p que fue incorporado al IEEE Std 802.11 en el año 2012 [16, 41–43].

1.3.1. IEEE 1609

Los estándares IEEE 1609 describen el acceso inalámbrico a la información, la comunicación, la seguridad e inclusive infoentretenimiento; esta familia soporta un gran rango de aplicaciones de transporte, seguridad vehicular, peaje automatizado, comunicación entre flotas para la administración de recursos y soporte para operación multicanal [44].

La arquitectura tiene funciones administrativas separadas lógicamente para la capa [MAC](#) y PHY, indicadas por la entidad de gestión de la capa de control de acceso (del inglés, [MAC](#) Layer Management Entity o MLME) y la entidad de gestión de la capa física (del inglés, Physical Layer Management Entity o PLME) como se muestra en la [Figura 1.5](#). Mientras que las capas [MAC](#) y PHY utilizados en un entorno vehicular de acceso inalámbrico (del inglés, Wireless Access

in a Vehicular Environment o [WAVE](#)), están estandarizados por separado en la normativa IEEE 802.11p y la 1609.4 respectivamente [40].

- **IEEE 1609.1** - Es el administrador de recursos, que permite que la infraestructura en lugares remotos, se conecte con dispositivos a bordo de los vehículos que transitan en la carretera. Este gestor actúa como una capa de aplicación, multiplexando las comunicaciones de varios servicios, todos conectados con varios [OBUs](#). El propósito de este enlace es dirigir el intercambio de información necesaria para cumplir los requisitos de las aplicaciones [WAVE](#), específicamente con mensajes dedicados de corto rango (del inglés, Dedicated Short Range Communication o [DSRC](#)). Básicamente establece el flujo de datos, el formato de comandos y el almacenamiento de datos entre las [RSUs](#) y las [OBUs](#) [45,46].
- **IEEE 1609.2** - Es el administrador de seguridad, que define el formato de mensajes de seguridad y procesamiento a ser usados, incluyendo métodos para asegurar los mensajes de gestión [WAVE](#) y mensajes seguros de otras aplicaciones. También describe funciones administrativas necesarias para el funcionamiento de servicios esenciales de seguridad [11,46–48].
- **IEEE 1609.3** - Brinda los servicios de red y de transporte, debido a que define los servicios que operan en la tercera y cuarta capa del modelo OSI, y representa los elementos del modelo de internet que incorpora IP, UDP, y TCP, para soportar conectividad inalámbrica [V2V](#) y [V2I](#) usando el espectro de 5,9 GHz [11,46,48,49].
- **IEEE 1609.4** - Gestiona la Operación Multicanal y define una serie de canales, para los cuales se asignan diferentes potencias máximas de transmisión. El canal de control crítico para la seguridad tiene la potencia de transmisión más alta, mientras que las aplicaciones no críticas y las aplicaciones de seguridad de corto alcance son potencias de transmisión más bajas. El canal de control (del inglés, Control Channel o [CCH](#)) está multiplexado con los seis canales de servicio (del inglés, Service Channel o [SCH](#)) y los intervalos de tiempo son utilizados por los canales dependiendo de los requisitos de las aplicaciones [40]. IEEE 1609.4 suministra mejoras al 802.11

MAC para soportar operación y servicios multicanal en un entorno WAVE [11, 13, 40, 46, 48, 50].

- **IEEE 1609.11** - Es el protocolo de intercambio de datos para pagos electrónicos inalámbricos. Regula el formato de mensajes seguros, la capa de aplicación de servicios y el perfil para identificar y autenticar los parámetros que habilitan dicha transferencia de información [11, 46, 51].
- **IEEE 1609.12** - Aborda la atribución de identificadores, los describe y asigna valores identificativos que serán destinados para sistemas WAVE [11, 52].

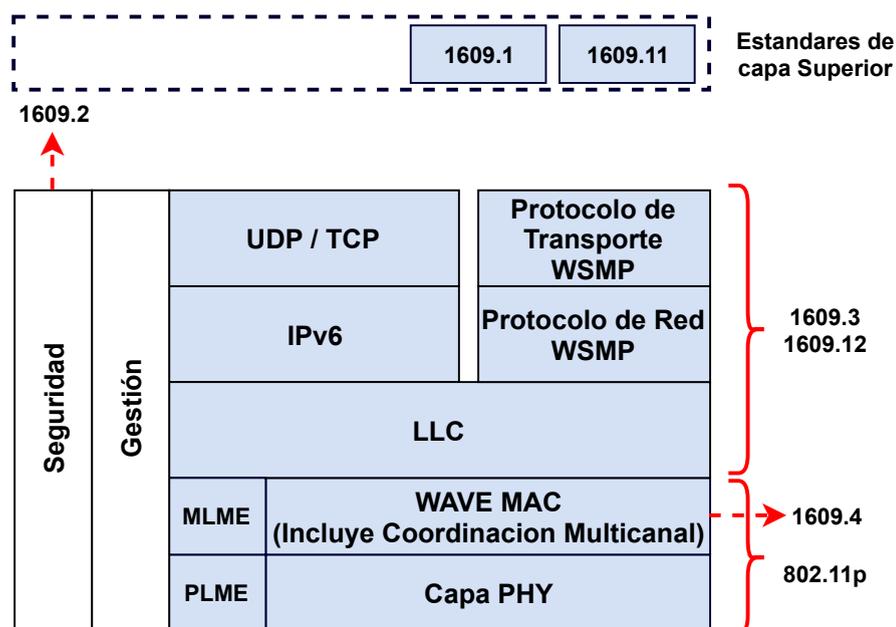


Figura 1.5: Arquitectura y relación de IEEE 1609 y 802.11.
Fuente: Autores

1.3.2. IEEE 802.11P

Una de las características relevantes es que en la capa física se tiene como base al estándar IEEE 802.11a y usa el esquema de Modulación por Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (del inglés, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing o OFDM) que nos permite manejar distancias de hasta 1 km con una frecuencia de operación que ronda en los 5,9 GHz [16].

El ancho de banda comprendido entre los 5,850 GHz y los 5,920 GHz, ilustrado en la Figura 1.6, se divide en siete canales de 10 MHz (canal 172 con 33 dBm de

CAPÍTULO 1. COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE SEGURIDAD VEHICULAR

potencia de transferencia, 174 con 33 dBm, 176 con 33 dBm, 178 con 44,8 dBm, 180 con 23 dBm, 182 con 23 dBm, 184 con 40 dBm) con una banda de guarda de 5 MHz en el extremo inferior de cada canal. Los canales (174, 176) y (180, 182) se pueden combinar en canales de 20 MHz [13,21,42,53]. Este ancho de banda es más alto que el de 5,8 GHz utilizado en otros protocolos WiFi sin licencia, por lo que las aplicaciones DSRC no tienden a sufrir interferencias generadas por dispositivos WiFi [21,41,53], esto es de suma importancia dado que problemas de este tipo pueden resultar desastrosos en las VANET [53]. El rango de frecuencias asignado para aplicaciones DSRC en los Estados Unidos, Europa, Japón y otras partes del mundo también están dentro de la norma técnica de espectros de uso libre que rige la Agencia de Regulación y control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) en el Ecuador [54]. Por lo tanto, el despliegue de esta tecnología en nuestro país no impondrá conflictos de compatibilidad por ende será posible adquirir dispositivos en otras regiones del mundo y ponerlos a trabajar en nuestro país.

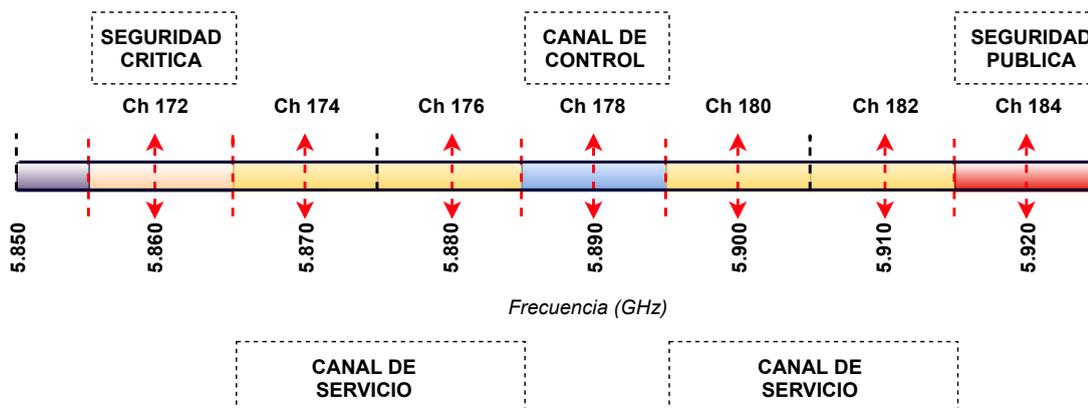


Figura 1.6: Canales WAVE para operación multicanal en VANETs.
Fuente: Autores

El IEEE 802.11p se diferencia de otros protocolos IEEE 802.11, donde las estaciones tienen que unirse a un conjunto de servicios básicos (del inglés, Basic Service Set o BSS) antes de que puedan transmitir o recibir datos, ya que el 802.11p establece un modo fuera del contexto del conjunto de servicios básicos (del inglés, Outside Context BSS o OCB) que aplica un contexto externo de BSS para utilizarlo en el protocolo de mensajes cortos inalámbricos, del entorno vehicular (del inglés, Wave Short Message Protocol o WSMP). Cuando se trabaja en modo OCB, el cam-

po del identificador del conjunto de servicios básicos (del inglés, Basic Service Set Identifiers o **BSSID**) del encabezado de trama se establece en un valor comodín FF: FF: FF: FF: FF: FF que permite que las estaciones transmitan y reciban datos sin registrarse con los dispositivos de infraestructura o una red Ad-Hoc existente. Como resultado, el tiempo requerido para activar un dispositivo inalámbrico se reduce significativamente. Además, la subcapa **MAC** tiene una extensión que admite la conmutación de canales, definida en IEEE 1609.4 [40,41,43,53]. La cual permite el acceso concurrente de los **CCH** y los **SCH**. Esto se logra dividiendo cada 100 *ms* en intervalos de 46 *ms* para **CCH** y **SCH**, seguido de un intervalo de guarda de 4 *ms* para cada canal [41,53].

1.3.3. DEDICATED SHORT RANGE COMMUNICATION - DSRC

La comunicación dedicada de corto alcance es un tipo de tecnología inalámbrica diseñada para que vehículos inmersos en un entorno **ITS** puedan comunicarse con otros vehículos o equipos instalados en la infraestructura vial [13,20]. Este tipo de comunicación opera en la banda de 5,9 *GHz* en el espectro de radiofrecuencia y es efectivo para distancias pequeñas y medianas, la **Figura 1.6** describe la división del espectro en sus respectivos canales de operación. Entre las ventajas que caracteriza este tipo de comunicación vehicular se puede mencionar su alta fiabilidad, su seguridad y también el soporte que brinda a la interoperabilidad [15]. Aparte de eso, es resistente a la interferencia, inclusive bajo condiciones climáticas extremas. Todos estos factores la convierten en la forma ideal para enviar y recibir información de vehículos que se mueven a altas velocidades con niveles de latencia bajos. Gracias a estos factores **DSRC** se usa para aplicaciones de seguridad, por ejemplo en sistemas de advertencia de colisión, que pueden emitir mensajes de advertencia hasta 10 veces por segundo cuando un vehículo va demasiado rápido hacia un lugar de riesgo; de esta manera, otros vehículos pueden ser notificados con la intención de evitar accidentes [55]. Sin embargo, su rango de aplicaciones va mucho más allá, puede ser usada para realizar pagos en lugares de estacionamiento inteligente e inclusive para pagar peajes e inspeccionar vehículos [13,15,17,21,55].

Esta tecnología es similar al TCP/IP, de hecho, es compatible con la pila IPv6

en paralelo con un protocolo de capa de red y capa de transporte llamado protocolo **WAVE** de mensajes cortos (del inglés, Wave Short Message Protocol o **WSMP**), que es exclusivo para el paquete **DSRC**. La rama **WSMP** del conjunto de protocolos permite una configuración más rápida y transmisiones más eficientes [41,53]. Sobre la capa **WSMP** está la subcapa de mensajes, que se encarga directamente del soporte para aplicaciones y usa un diccionario de mensajes tipificado en el estándar SAE J2735-2016, el cual define los tipos de mensajes que dichas aplicaciones vehiculares pueden utilizar [11,35,48], consta de 17 mensajes, 156 marcos de datos, 230 elementos y 58 referencias que definen elementos externos [21]. Cada mensaje es una colección de las estructuras de datos constitutivas, conformados por elementos y marcos de datos; los elementos son objetos primitivos, estructuras básicas con información sobre la velocidad, dirección, elevación, latitud, longitud y otros factores similares. En cambio los marcos de datos son estructuras de datos más complejas, formadas por uno o más elementos y otros marcos [41,56]. Estos mensajes son codificados en el formato ASN.1 y siempre se transmiten con **WSMP** [35,53]. En adición a estos, SAE ha publicado la familia de estándares J2945 donde se encuentran documentos y conceptos de diseño comunes en una guía de procesos **DSRC**, incluyendo lineamientos que los distintos dispositivos deben cumplir para un funcionamiento acorde a lo planificado por las agencias reguladoras [11,32,48].

Colectivamente, la familia de estándares IEEE 1609, el IEEE 802.11p, el SAE J2735 son elementos clave en la pila del protocolo **WAVE** [13,21]. Estos estándares en conjunto con organizaciones locales normalizan el funcionamiento **DSRC/WAVE** en Norte América, no obstante, esta tecnología también se está desarrollando en Europa y Japón. Sin embargo, es importante especificar que no hay compatibilidad directa en los espectros asignados para todo lo que abordan las aplicaciones de **ITS** [57]. Como se puede apreciar en el **Cuadro 1.3**, cada región utiliza un espectro diferente pero la intención es que se garantice la compatibilidad con Norte América, inclusive si el espectro asignado no es el mismo, las frecuencias estarán suficientemente cerca como para permitir que el dispositivo use su antena y radio (transmisor/receptor) original [13,56].

Por lo tanto, podemos decir que la comunicación se realiza bajo los lineamien-

tos de IEEE 802.11p [43] y IEEE 1609.3 [49], el lenguaje usado bajo SAE J2735 [35] y la seguridad para esta interacción esta definida en el IEEE 1609.2 [47]. Aparte de esto, en el 2016 el departamento de transporte de los estados unidos (del inglés, United States Department of Transportation o **USDOT**) publicó la cuarta versión de los parámetros que las **RSUs** deben cumplir para garantizar su compatibilidad y funcionamiento [32,33]. El estándar SAE J2945/1 establece los requisitos mínimos para sistemas **V2V** encargados de la comunicación segura y el SAE 2945/2 define los requisitos de desempeño base para las advertencias en los sistemas **V2V** [11,48].

1.3.4. **WSMP (WAVE SHORT MESSAGE PROTOCOL)**

Aparte de los protocolos de red IPv6 estándar que operan a través de **SCH**, se desarrolló el protocolo **WSMP** específicamente para **WAVE**, con capacidad para llevar mensajes a través de **CCH** y **SCH**, y controlar parámetros de las capas inferiores (potencia de transmisión, velocidad de transmisión, canal y dirección **MAC** del receptor) directamente [57]. Este protocolo está definido en el IEEE 1609.3, donde se establece que los sistemas **WAVE** utilizan mensajería altamente eficiente. Son mensajes **WAVE** cortos (del inglés, Wave Short Message o **WSM**) y bastante eficientes para la transmisión a 1 salto, ya que su tamaño de encabezado mínimo es de 5 bytes a diferencia de UDP sobre IPv6 que requiere por lo menos 52 bytes. Dado el tamaño del encabezado, la carga generada por un **WSM** es mucho más pequeña y por ende genera menor congestión en una **VANET** [17,49]. Este protocolo facilita el intercambio eficaz de datos sujetos a conexiones intermitentes, para reducir el tiempo de entrega, los **WSMs** se transmiten con características físicas controlables usando la mínima capacidad del canal, por ende pueden acceder tanto a **CCH** como a **SCH** [42].

Varias aplicaciones de seguridad vial usan este tipo de red, por ende esta comunicación debe ser escalable, eficiente, de baja latencia y robusta, inclusive bajo condiciones anormales, ya que es menos probable que ocurran accidentes bajo condiciones normales. De lo contrario, cualquier fallo podría resultar en pérdidas humanas y materiales [57].

Cuadro 1.3: Espectros asignados para aplicaciones [WAVE/DSRC](#).

País/Región	Frecuencias (MHz)
Europa	5795-5815 (Usado), 5855/5875-5905/5929 (asignado)
Norte América	902-928 (Usado), 5850-5925 (asignado)
Japón	715-725 (Bajo estudio), 5770-5850 (Usado)
China, India y Singapur	Bajo estudio o asignado a 5900

1.4. SISTEMAS DE ADVERTENCIA EN EL VEHÍCULO

Entre los entes que estudian la seguridad de un vehículo tenemos el programa de evaluación de carros nuevos (del inglés, New Car Assessment Programme o [NCAP](#)) que establece parámetros de seguridad y opciones recomendadas para garantizar la seguridad de los vehículos que salen al mercado cada año. El [NCAP](#) evalúa vehículos a partir de varias pruebas que representan escenarios de accidentes reales que pueden causar lesiones o muerte a los ocupantes de los vehículos y los usuarios de la carretera. La clasificación se realiza dentro de la escala de 5 estrellas con el método de «cuantas más estrellas, mejor». Se evalúa los efectos de los accidentes en aspectos tales como protección para adultos, niños, otros usuarios de la vía y también los sistemas de asistencia de seguridad [58,59].

Los fabricantes de vehículos están implementado tecnologías de seguridad desde 1950; sin embargo, el [NCAP](#) Europeo premió a algunos sistemas que ampliaron el panorama de sistemas de seguridad automotriz y están siendo implementados en vehículos nuevos [60]. Como se puede apreciar en el [Cuadro 1.4](#) cada fabricante trabaja en su propia versión de estos sistemas, pero en general se tienen los siguientes tipos:

- **Sistemas de control del punto ciego:** Cuando un vehículo «A» se acerca a otro vehículo «B» en un carril adyacente, el conductor de «B» podrá ver a «A» hasta que se encuentre en cierto punto donde se torna invisible en los retrovisores. El conductor de «B» sin percatarse de que hay un obstáculo, cambia de carril ocasionado un accidente. Para mitigar esta problemática, los fabricantes de vehículos han implementado sistemas con cámaras, radares y otros sensores para monitorear y advertir al conductor de un vehículo sobre posibles obstáculos en su punto ciego [61,62].

- **Sistemas de asistencia de cambio de carril:** En muchas ocasiones, solo basta con un instante de descuido para que el vehículo salga de su carril. Para contrarrestar estas instancias de riesgo, se han implementado sistemas que advierten al conductor cuando el vehículo comienza a desviarse en la carretera por cualquier razón. Algunos fabricantes han ido más allá y han desarrollado sistemas que inclusive actúan sobre el vehículo si el conductor no realiza la maniobra correctiva necesaria para evitar el accidente [63–65].
- **Sistemas de alerta de velocidad:** La velocidad es uno de los factores más importantes al momento de determinar la causa y severidad de los accidentes, por ello las agencias que regulan el tránsito en cada país establecen rangos máximos de velocidad tolerable para un tránsito seguro dado el diseño e intención de uso de la carretera. Algunos de estos sistemas se basan en un límite preestablecido por el usuario, pero también hay sistemas inteligentes que pueden reconocer el límite establecido para el sector transitado y advertir al conductor cuando se desvíe de los valores recomendados [66,67].
- **Sistemas de Frenado de Emergencia Autónomo:** Muchos accidentes ocurren porque el conductor no frena adecuadamente ante las condiciones que se imponen previo al accidente. Por esto, los fabricantes de vehículos están instalando sistemas con capacidad para detectar condiciones de riesgo anticipadamente y preparar el vehículo para evitar choques o reducir la severidad de los daños [21, 62, 68].
- **Sistemas de Alerta por pérdida de atención:** Estos equipos detectan cansancio o pérdida de atención en el conductor y lo incita a descansar. Por lo general hacen uso de otros sistemas mencionados previamente para obtener información y en algunos casos constan de una cámara y software que monitorean al conductor constantemente [65, 67, 69].
- **Sistemas de Llamada Automática de emergencia (eCall):** Por lo general, después de que sucede un accidente alguien tiene que llamar a servicios de emergencia y dar información de forma precisa y rápida donde el tiempo es importante, ya que influye directamente en las consecuencias del accidente.

CAPÍTULO 1. COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE SEGURIDAD VEHICULAR

Algunos fabricantes están adecuando sus vehículos con sistemas que pueden enviar información exacta, casi instantáneamente a las entidades apropiadas para responder eficientemente [70].

Aparte de estos sistemas y los mencionados en el Cuadro 1.4, las VANETs amplían la perspectiva, rango y eficiencia de aplicaciones de seguridad en carretera. Al permitir que los usuarios de la red vial envíen y reciban mensajes de concientización cooperativos (del inglés, Cooperative Awareness Messages o CAMs) entre unidades. Las aplicaciones que se derivan en V2V han sido identificadas como un factor clave para mejorar la seguridad vial, el confort de manejo y la eficiencia no solo económica sino también ecológica [65,71,72].

Cuadro 1.4: Premios EuroNCAP a sistemas de seguridad sobresalientes [73].

Marca	Sistema
Audi	Side Assit (2010), Active Lane Assit (2012), Pre-Sense Basic (2012), Pre-Sense Front (2012), Pre-Sense Front Plus (2012)
BMW	Assist Advanced eCall (2010), Pedestrian Warning with City Brake Activation (2014)
Citroen	Localized Emergency Call (2010)
FIAT	City Brake Control (2013)
Ford	Lane Keeping Aid (2011), Active City Stop (2011), Forward Alert (2011), Driver Alert (2011), Lane Keeping Alert (2012), SYNC Emergency Assistance (2012)
Honda	Collision Mitigation Brake System (2010)
Mazda	Rear Vehicle Monitoring System (2011)
Mercedes-Benz	PRE-SAFE Brake (2010) y Collision Prevention Assist (2011), Attention Assist (2011)
Mitsubishi	Forward Collision Mitigation (2013)
Peugeot	Connect SOS (2010)
Volvo	City Safety (2010)
Volkswagen	Lane Assist (2010), City Emergency Brake (2011), Front Assist (2012), Proactive Occupant Protection (2012)

Entre las varias aplicaciones que son potenciadas por la comunicación vehicular, están las anti-colisiones. Para las cuales se han desarrollado protocolos que se encargan del intercambio de mensajes buscando evitar los choques en intersecciones. Un ejemplo propone obtener información de los sensores internos del

vehículo para garantizar el flujo seguro de todos aquellos que llegan a una intersección y propagar información relevante hacia el resto de vehículos e infraestructura de la intersección; optimizando de esta forma los tiempos de espera y las distancias de seguridad entre los vehículos. Una gran ventaja de usar este protocolo, es que aparte de fomentar la seguridad, también se incrementa el rendimiento de dicha intersección de manera confiable [72,74].

Otra de las aplicaciones de seguridad posible con **DSRC** es la llamada *Truck Platooning*, donde **DSRC** permite que vehículos intercambien información actualizada de posicionamiento y estado (velocidad, dirección, etc). Esto implica que un auto sabrá que el vehículo de en frente ha accionado el freno inclusive antes de que este comience a desacelerar, permitiendo que la distancia segura entre los motorizados pueda ser disminuida drásticamente. Inclusive cuando la disminución en distancia de seguridad resulte inconsecuente para consumidores privados, las compañías que transportan carga podrán verse beneficiadas, ya que para los camiones el efecto de arrastre generado por la resistencia del aire es considerable y al disminuir la distancia segura de seguimiento se podrá nulificar dicho efecto, obteniendo grandes ahorros de combustible y crecimiento en los márgenes de ganancia, ya que en muchos casos el combustible representa un porcentaje elevado en los costos de operación [53].

Todas estas prestaciones brindan contribuciones sustanciales a la reducción de accidentes de tránsito. Sin embargo, la legislación ha obviado los beneficios y actualmente no se requiere que vehículos nuevos y usados estén equipados con todos los estándares de seguridad vehicular reconocidos internacionalmente. No obstante, más de 140 países involucrados en [1] llegaron a un acuerdo de 12 objetivos críticos que deberán ser tratados para disminuir de forma significativa el índice de muertos y heridos en accidentes automovilísticos en los próximos 10 años; entre los cuales el quinto objetivo especifica que para el 2030 todos los vehículos en circulación deberán cumplir con todos los estándares de seguridad y regulaciones técnicas reconocidas por las naciones unidas.

1.4.1. TIPOS DE ADVERTENCIAS

Entre los dispositivos que se están instalando dentro de los vehículos para mejorar la seguridad vial están los sistemas de guía y los de advertencia, ver [Figura 1.7](#). Los de guía son los que siempre están activos y brindan soporte al conductor, tal como un equipo GPS. En cambio los sistemas de advertencia son los que se activan únicamente cuando se cumple alguna condición que amerita ser informada. Entre los tipos de advertencias podemos destacar tres grupos principales: el visual, el auditivo y el háptico [75].

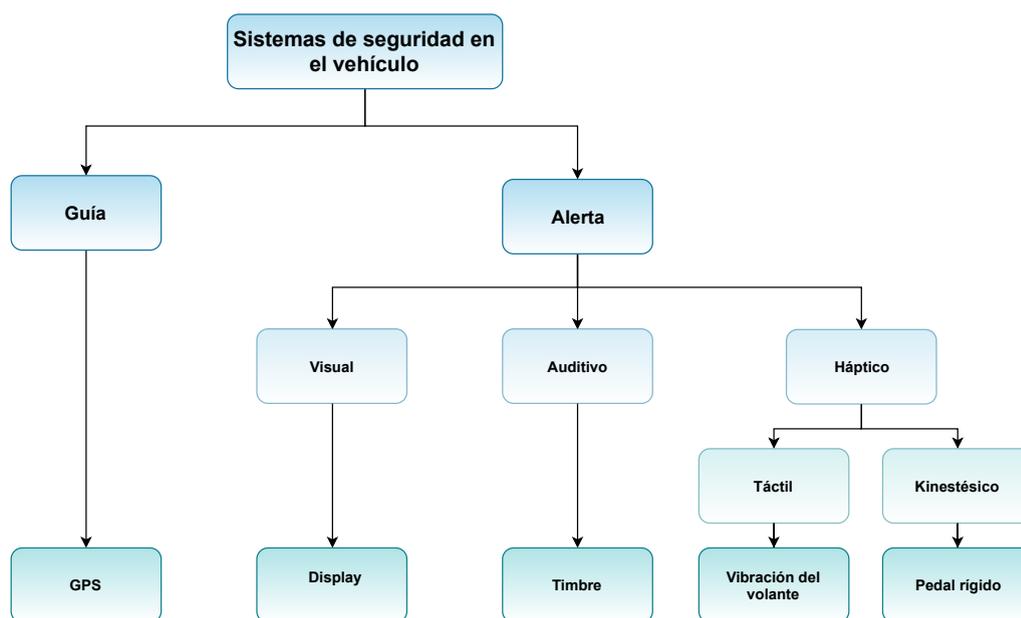


Figura 1.7: Tipos de Advertencias.
Fuente: Autores

Las advertencias visuales en forma de iconos en el tablero o proyecciones sobre el parabrisas han sido estudiadas extensamente y actualmente están instaladas en los vehículos de varios fabricantes. Sin embargo, para que una advertencia visual de este tipo sea efectiva, el conductor deberá estar posicionado correctamente y atento. También se sabe que las alertas visuales no son las más adecuadas para personas mayores ya que conforme se envejece, el ángulo de visión disminuye. Aparte de esto, las señales visuales agregan carga cognitiva afectando la capacidad visual de un conductor durante una escena de riesgo, lo cual disminuye el efecto beneficioso de este tipo de alertas [76,77].

Alertas auditivas tal como vos, pitos y otros tonos han demostrado beneficios moderados en términos de reducción del tiempo de reacción y frenado. Una gran ventaja de estas señales es que pueden hacer uso de dispositivos que ya están incorporados en los vehículos tales como el radio. A pesar de esto, su efectividad disminuye con la introducción de otros ruidos presentes en la cabina o cuando el volumen de su parlante es relativamente bajo [76].

La tecnología háptica tiene dos ramas, la kinestésica y la táctil. La kinestésica tiene que ver con lo que se perciben a través del uso de los músculos, como por ejemplo, un pedal que es duro de presionar o un volante que requiere fuerza para girar. En cambio la táctil involucra lo que puede ser captado por la piel, tal como vibraciones, temperaturas e inclusive electricidad. Por esto, una de sus grandes ventajas es que puede entregar retroalimentación desde varios puntos del vehículo. Tal como se puede apreciar en la [Figura 1.8](#), se pueden montar efectores sobre el volante, el asiento, el cinturón de seguridad o también en los pedales.

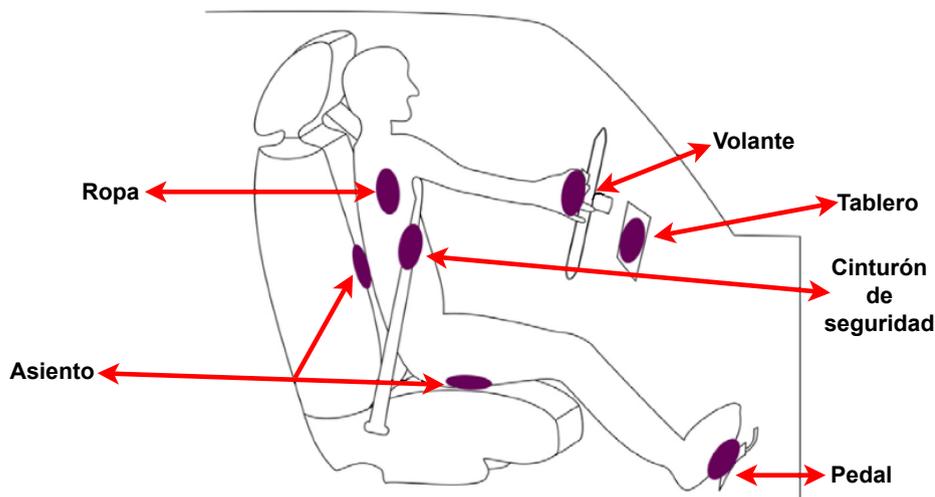


Figura 1.8: Ubicación de actuadores vibrotáctiles [78].

Se han realizado varios estudios para determinar la eficacia de estos sistemas y esta confirmado que las advertencias hápticas son soluciones efectivas para mitigar el riesgo en la vía [78]. El hacer uso de esta tecnología de advertencia, permite interactuar con el conductor eficientemente transmitiendo información sin aumentar carga visual y cognitiva, que son factores críticos en el uso de interfaces hombre-máquina dentro de los automóviles [79].

Las advertencias vibrotáctiles son una sub-rama de la tecnología háptica que se encuentra en desarrollo para uso en varias facetas de la vida cotidiana, tal como la conducción [76, 80]. En ciertos casos se puede alertar al chofer de un vehículo sobre los riesgos de sus acciones mediante vibraciones sinusoidales simples de dispositivos incorporados en las partes destacadas en la [Figura 1.8](#) que son accionadas sobre el conductor con frecuencias y duraciones diferentes. Los autores de [81] realizaron un estudio de caso en donde se generaron vibraciones de 200 – 300 *Hz* durante 1s a través del asiento del conductor con el fin de determinar si la ropa o morfología del conductor eran factores relevantes al diseño de estos sistemas, dicho estudio determinó que el tipo de ropa usada no influía de forma significativa en la percepción de las vibraciones, sin embargo, se encontró que la morfología era un factor determinante y por ende se recomienda que los fabricantes consideren este aspecto en sus diseños. En otro estudio, presentado en [78], se halló que una frecuencia de vibración de 230 *Hz* era preferida en comparación con 4 diferentes frecuencias (105 *Hz*, 135 *Hz*, 175 *Hz* y 230 *Hz*), el nivel preferido corresponde a valores familiares para los usuarios ya que es consistentes con las vibraciones de teléfonos celulares. En estudios enfocados a determinar el lugar ideal para ubicar los actuadores, tanto [82] como [83] encontraron que mediante retroalimentación vibrotáctil en el volante y cinturón de seguridad, eran maneras útiles para disminuir la carga cognitiva de los choferes, encaminando a un transporte más seguro y con menos errores de circulación. En un estudio enfocado a la eficiencia de estas advertencias, [75] valida lo hallado por varios otros investigadores y encuentra que una técnica de incrementos en la amplitud y frecuencia de las vibraciones es especialmente adecuada para los casos en los que se requiere una acción inmediata o casi simultánea a la percepción. Esto se debe a que se ha comprobado que corresponde a respuestas más rápidas, pues sus efectores estimulan las partes del cuerpo relacionadas con las acciones a realizar directamente [79].

Finalmente, tenemos un tipo de advertencia innovador, que incorpora advertencias multi-modales, es decir incorporan dos o más de las antes mencionadas. Investigadores como [77] y [82] confirman que este tipo de advertencias supera cualquier advertencia unimodal, ya que amplía los canales de transmisión de in-

formación con el usuario y su modalidad multisensorial equilibra la carga mental del conductor. A pesar de esto, los sistemas unimodales son los más comunes. Sin embargo, la literatura sobre el tema sugiere que sistemas de advertencia multimodal con señales auditivas y hápticas son las mejores para la implementación dentro de vehículos.

1.5. SISTEMAS DE ADVERTENCIA EN LA CARRETERA

Aparte de las [RSUs](#) que tienen capacidad para comunicarse mediante [WAVE](#), existen elementos de señalética vial que son parte de la infraestructura tradicional de carretera, indispensables para advertir a los conductores y peatones sobre posibles problemas o riesgos. Actualmente se tiene señalética horizontal y los letreros verticales informativos estáticos, ubicados al borde de la vía que se usan para advertir al conductor en la carretera. Algunos fabricantes están desarrollando equipos inteligentes, como es el caso de los chevrones diseñados por TAPCO [84] en conjunto con los departamentos de transporte estatales en Estados Unidos, en los que se acoplan sensores y displays que mejoran la recepción y captación de información, convirtiendo la señalética vial en paneles informativos dinámicos, útiles en un amplio rango de condiciones.

Los sistemas de advertencia instalados en la carretera son menos complejos que los mencionados en la [Sección 1.4](#) dada su naturaleza estática. Por lo general consta de señalética aplicada horizontal o verticalmente de tal forma que el conductor está listo para maniobrar el tramo designado adecuadamente. En los últimos años se desarrollan de sistemas inteligentes para satisfacer las necesidades de seguridad y eficiencia de una población motorizada en crecimiento constante [1, 12]. Por ejemplo, los autores de [85] patentaron un sistema para advertir a los conductores sobre objetos que se mueven lentamente en un tramo de vía, debido a que cualquier velocidad que se desvíe considerablemente de la media diseñada para la carretera, representa una condición de riesgo, tal es el caso de una persona caminando en la autopista. Este sistema usa cámaras y varios sensores para poder detectar la presencia de objetos que se muevan considerablemente más lento que una velocidad promedio de circulación y advertir, a los conductores de vehículos que van a velocidad promedio, sobre la presencia de dicho riesgo

mediante señalética vertical ubicada a un costado de la carretera.

En [86] los autores identificaron un tramo de alto riesgo de accidentes debido a condiciones climáticas, parecidas a lo que se vive en la sierra Ecuatoriana. Ellos evaluaron el desempeño de un nuevo tipo de señalética vertical instalada en la vía con tecnología que consiste en el uso de sensores que van en el pavimento para detectar condiciones de agua o hielo, en conjunto con dispositivos activados dinámicamente que advierten a conductores sobre condiciones de riesgo en tiempo real. Se encontró que la mera presencia de dicha señalética inducía a la disminución de la velocidad a la que los conductores intentaban navegar el tramo riesgoso por más de $5km/h$, e inclusive una disminución de más de $15km/h$ cuando se activa la parte dinámica [86,87].

En [67] los autores patentaron un sistema para advertir a conductores sobre condiciones cambiantes de la carretera. Ellos obtienen condiciones de la vía de al menos un tramo de la carretera, analizan la información y se identifica las condiciones de riesgo para luego advertir al conductor, estas condiciones pueden ser compartidas con vehículos remotos al tramo para obtener información de lugares que no estén directamente visibles [88], de tal manera que se facilite la planificación, se incremente la seguridad y mejore la eficiencia del viaje.

También hay autores como los de [72], donde se evalúa la implementación de **VANETs**; específicamente, de infraestructura inteligente ubicada en los semáforos y otras señales de tránsito con el fin de optimizar el flujo vehicular. La meta de los autores es obtener datos de otras partes de la infraestructura y de los vehículos para advertir a los conductores sobre condiciones de riesgo en su trayecto [65]. Las advertencias se realizan mediante dichos equipos inteligentes de tal manera que se pueda acoplar la infraestructura existente con sistemas más actualizados. Este enfoque en conjunto con el protocolo propuesto por [74] tiene la capacidad para mejorar varios aspectos del tránsito actual dentro de la ciudad.

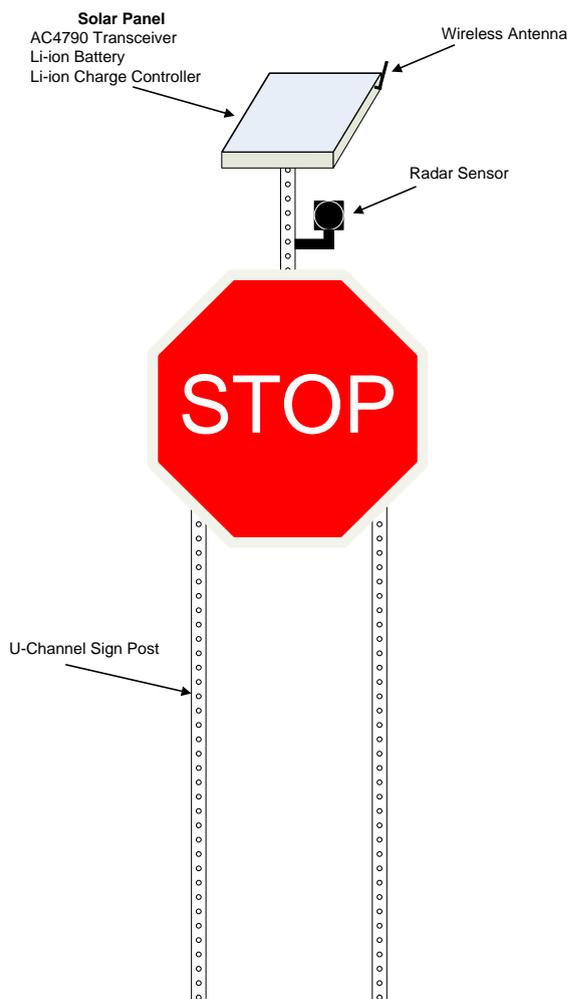


Figura 1.9: Diagrama de un Chevron [89].

Hay investigadores como [89], que desplegaron un sistema de advertencia similar al de la [Figura 1.9](#), incorporando LEDs, sensores y alimentación solar a los chevrones estáticos antiguos, de tal manera que se mejora la señalética existente para intersecciones de riesgo. Por ejemplo, estos chevrones mejorados, detectan activamente a los vehículos y parpadean señales de advertencia para evitar conflictos en lugares donde tráfico vehicular lento se incorpora a una vía rápida.

Desde el 2011, tanto ingenieros encargados del diseño de carreteras como [DOTs](#) han recurrido al sistema de advertencia de curva dinámica estilo *Blinker-Chevron* para reducir las velocidades en curva y mantener a los conductores informados en la carretera. En algunos de estos sistemas, los fabricantes permiten personalizar la activación de luces que actúan acorde a los métodos de detección incorporados en la señalética para mejorar la seguridad en cualquier vía [84].

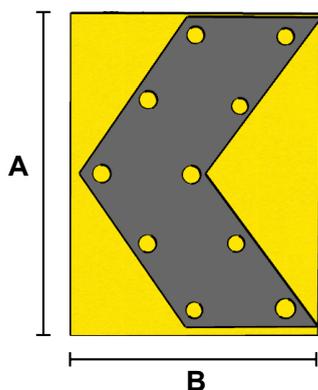


Figura 1.10: Chevron de curva
Fuente: Autores

Cuadro 1.5: Dimensiones de la señalética de chevrones de curva.

Dimensión A [mm]	Dimensión B [mm]
600	600
750	750
900	900

El precio de los dispositivos mencionados depende de las dimensiones, el tratamiento reflectivo y sus características electrónicas, pudiendo llegar a costar más de \$2800. La [Figura 1.10](#) muestra el tipo de señalética y el [Cuadro 1.5](#) las dimensiones, así mismo, el [Cuadro 1.6](#) correspondiente a la [Figura 1.11](#) muestra las dimensiones legales que exige el reglamento técnico Ecuatoriano [90].

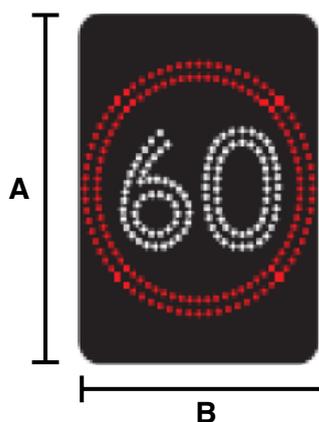


Figura 1.11: Señal LED de límite de velocidad [90].

Cuadro 1.6: Dimensiones de la señalética LED de límite de velocidad.

Dimensión A [mm]	Dimensión B [mm]
600	450
800	600

Aparte de los mencionados, [87] presenta una amplia variedad de soluciones de bajo costo y que han demostrado su efectividad en la reducción de accidentes.

1.6. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

En este capítulo se abordaron los elementos que conforman las [VANET](#). Se detalló su funcionamiento, especificando sus aportes a los [ITS](#) y sus aplicaciones enfocadas a la seguridad y manejo eficiente del tráfico. Además, se analizaron los estándares y protocolos que normalizan su funcionamiento a nivel global y el desarrollo que esta tecnología ha tenido a través de los años. Se procedió a identificar los diferentes dispositivos que se involucran en el funcionamiento de este tipo de red móvil. Luego se analizaron los sistemas de advertencia y seguridad de tránsito, revisando tanto los sistemas que van a bordo del vehículo, como los que están estáticos en la infraestructura vial.

Capítulo 2

FACTORES TOPOGRÁFICOS

2.1. FACTORES TOPOGRÁFICOS DE UNA CARRETERA

En este estudio se abordan determinados factores topográficos que afectan directamente la interacción del conductor y su vehículo en la carretera. Las vías se estructuran con ciertos estándares de diseño que consideran la velocidad, el tipo de vehículo, las características del terreno y distancia de frenado; al igual que los elementos de la geometría vial, como los radios de curvatura, pendientes, distancias de visibilidad, peraltes, curvatura vertical y horizontal. Esto con el fin de diseñar una carretera que sea cómoda y, por sobre todas las cosas, segura para satisfacer los requisitos de trasportación de una manera fiable y minimizando la probabilidad de que ocurran accidentes [91–93].

2.1.1. CURVAS

Las curvas son irregularidades que generan cambios graduales de dirección en una carretera, de manera que la fuerza centrífuga a la que el vehículo está sujeto sea constante. Pueden ser curvas horizontales tal como la simple, compuesta, reversa, de desviación y de transición, o verticales en forma de cresta o de columpio [92].

En zonas comparables de longitud y tráfico, las curvas horizontales tienen índices de choques más altas que las secciones rectas. La diferencia se hace evidente en radios inferiores a 1000 *m*, y representa un incremento significativo en el número de accidentes en curvas con radios inferiores a 200 *m* [94]. Como se puede apreciar en la [Figura 2.1](#), cuando un vehículo atraviesa una curva horizontal, la fuerza centrífuga actúa hacia la parte externa de la curva y la fuerza producida

por la fricción la contrarresta a través del centro de gravedad del vehículo. El efecto de dicha fuerza depende del radio de curvatura y la velocidad del vehículo. En los tramos donde se combinan los gradientes con superficies bajas en coeficientes de fricción, el nivel de riesgo incrementa [95]. El radio y grado de curvatura de una carretera, por lo general, encabezan la lista de variables geométricas que afectan más significativamente las velocidades de circulación, además de la experiencia que el usuario tiene en una determinada vía [96].

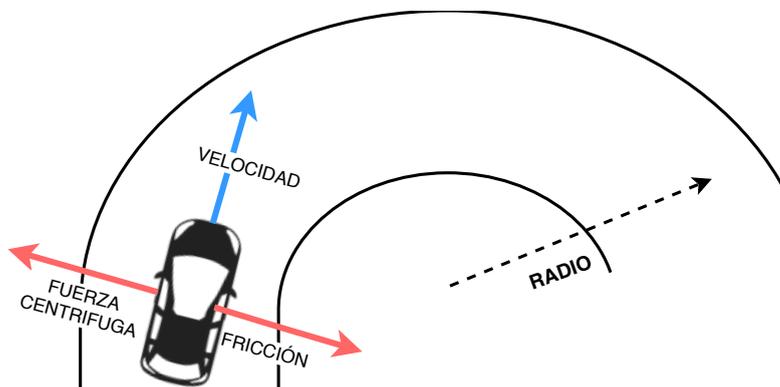


Figura 2.1: Fuerzas que actúan sobre el vehículo en una curva.
Fuente: Autores

Desde los 90, la administración federal de carreteras (del inglés, Federal Highway Administration o [FHWA](#)) de los Estados Unidos ha realizado estudios sobre los efectos de las curvas horizontales en carreteras de dos carriles. Los resultados sugieren que una curva de radio de aproximadamente 150 m tiene un 200 % más probabilidad de producir un choque y una curva de radio de 300 m es 50 % más probable que produzca un choque que otros sectores equivalentes debido a que hay menos espacio disponible para realizar acciones correctivas en este tipo de carreteras [97].

2.1.2. PENDIENTES

Una pendiente en carretera es un declive en el terreno o inclinación respecto a la horizontal de una superficie. Las pendientes pronunciadas generalmente se asocian con tasas de choque más altas. Los grados de inclinación de 2,5 % y 4 % aumentan los accidentes en un 10 % y 20 % respectivamente, en comparación con las carreteras cercanas a la horizontal. Las secciones con gradientes pronunciados

y gradientes descendentes tienen tasas de accidentes más altas que la de gradientes leves o gradientes ascendentes; por lo tanto, la tasa de accidentes aumenta significativamente en función del valor del gradiente de las curvas [96].

En el diseño geométrico de una carretera, uno de los factores que se toman en cuenta es la pendiente transversal de la superficie de carretera en las secciones rectas que generalmente son de 1-2 % para permitir que el agua drene. En el caso de tener una carretera totalmente nivelada, se tiene el problema que el agua se drena demasiado lento, creando una capa de agua sobre la calzada e inclusive acumulación de hielo en climas fríos, en consecuencia, los vehículos tienen problemas de hidro-planeo y pérdida de pista [95].

La topografía de la vía afecta su alineamiento horizontal, sus pendientes y distancias de visibilidad. Según sus pendientes, los terrenos se clasifican en [93]:

- **Terreno plano:** Consta de pendientes transversales a la vía con inclinaciones menores a 5 % y pendientes longitudinales inferiores al 3 % [93].
- **Terreno ondulado:** Presenta pendientes transversales de entre 6 % y 12 %. Permite alineamientos más o menos rectos y pendientes longitudinales típicamente de entre 3 % y 6 % [93].
- **Terreno montañoso:** Está compuesto de pendientes transversales a la vía que suelen ser de entre 13 % y 40 % con pendientes longitudinales de entre 6 % y 8 % [93].
- **Terreno escarpado:** Tiene pendientes transversales a la vía que exceden el 40 % frecuentemente. Por ende, las pendientes longitudinales mayores al 8 % abundan y se deberá construir puentes, túneles y otras estructuras para lidiar con estas condiciones [93].

2.1.3. PARÁMETROS QUE ESTABLECEN EL GRADO DE SEGURIDAD VIAL

Las agencias estatales involucradas en el diseño vial, tal como La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (del inglés, American Association of State Highway and Transportation Officials o [AASHTO](#)) en los Estados Unidos o el Ministerio de Transporte y Obras Públicas ([MTOB](#)), y el

INEN en el Ecuador han establecido factores limitantes para el alineamiento horizontal con el fin de mejorar la seguridad vial. Factores tales como el radio (r), el peralte (e), los coeficientes de fricción (f), y una velocidad (v) directriz de diseño considerada como la velocidad normal de circulación [93,95]. La expresión matemática de la [Ecuación 2.1](#) fue desarrollada para considerar estos factores con adición de la velocidad directriz [93,96].

$$e + f = \frac{v^2}{127 * r} \tag{2.1}$$

Donde:

e = Tasa de peralte máxima en fracción decimal.

f = Tasa de fricción lateral mínimo en fracción decimal.

v = Velocidad directriz [km/h].

r = Radio mínimo de diseño de curva [m].

En el [Cuadro 2.1](#), se resumen los coeficientes de fricción lateral recomendados por [93,95] para tres tipos de carretera en particular, esto en función de diferentes rangos de velocidad de circulación vehicular [93,95].

Cuadro 2.1: Tasa de fricción lateral.

Velocidad [km/h]	Tipo de carretera	Fricción
20-70	Tramos de giro en intersecciones	33-15 %
30-70	Urbana de baja de velocidad	30-16 %
30-110	Urbana y rural	17-10 %

La sobreelevación o peralte, es necesaria cuando un vehículo viaja a través de una curva para contrarrestar las fuerzas que actúan sobre el vehículo (ver [Figura 2.1](#)), y el efecto adverso que resulta de la pérdida de fricción entre la llanta y el pavimento; sin embargo, este efecto puede ser desestimado en ciertos casos, tal como curvas con radios de gran amplitud [93]. Como se aprecia en el [Cuadro 2.2](#), no se debe exceder una tasa de peralte del 10 %, debido a dificultades para el mantenimiento e incomodidad para vehículos lentos. En cambio, en lugares donde la velocidad sea limitada, el peralte debe estar entre 4 – 6 % [93]. Aparte de estas condiciones, uno de los factores que influye directamente con el peralte es la

topografía del terreno, en consecuencia, en [95] se recomiendan los factores del [Cuadro 2.2](#) para las zonas especificadas:

Cuadro 2.2: Peralte recomendado.

Peralte "e" [%]	Zona
10	Rural montañosa
8	Rural plana
6	Suburbana
4	Urbana

Los radios mínimos son valores límite de curvatura que se usan en el diseño vial para una velocidad directriz determinada y se relaciona con el peralte y la fricción lateral (ver [Ecuación 2.1](#)). Cuando el peralte de la curva no es adecuado, los vehículos tienden a perder el control debido a que la fricción lateral entre las ruedas y el pavimento es insuficiente, provocando el deslizamiento del vehículo [93]. El uso de radios más pequeños requiere peraltes incómodos o tasas de fricción lateral que pueden no ser reales para los vehículos y por ende no se puede garantizar la adherencia de las llantas con la carretera [93]. Por esto, si conocemos el máximo factor de peralte deseable, los radios curvatura horizontal se pueden calcular utilizando la [Ecuación 2.1](#) [93].

En base a las recomendaciones para la fricción y el peralte, el [Cuadro 2.3](#) muestra los radios mínimos para zonas y velocidades de diseño diferentes.

Cuadro 2.3: Radios mínimos para curvas horizontales en función de las tasas y velocidades de diseño.

Velocidad directriz [km/h]	Urbano [m]	Suburbano [m]	Rural plano [m]	Rural montañoso [m]
30	35	30	30	25
40	60	55	50	45
50	100	90	80	75
60	150	135	120	115
90	375	335	305	275
100	490	435	395	360
120	870	775	665	595

2.1.4. VISIBILIDAD

La distancia de visibilidad es un factor que consideramos importante mencionar como riesgo en el diseño vial de una carretera, a pesar de que no esté implícito

dentro de la [Ecuación 2.1](#) planteada anteriormente. Esta distancia depende de la altura del ojo del conductor sobre la superficie de la carretera permitiéndole ver y realizar las maniobras asociadas con el proceso de conducción de manera segura. En algunos casos la obstrucción es la superficie de la carretera, como en las curvas horizontales, la obstrucción puede ser alguna característica física fuera del camino recorrido por ejemplo una barrera longitudinal, un árbol, follaje o la pendiente de una sección aledaña [95,98].

2.2. FACTORES PARA CONTRARRESTAR EL RIESGO

En adición a los parámetros de diseño geométrico mencionados, se conoce que inclusive conductores hábiles, manejando con precaución a una velocidad adecuada y siguiendo las normativas de la ley de tránsito tienden a sufrir accidentes, ya que el error humano en general está vinculado con más de la mitad de todos los accidentes [12]; por esto, los ingenieros encargados del diseño vial deben considerar este causal en la planificación para disminuir la cantidad y severidad de los accidentes. El programa de evaluación de carreteras de Australia (del inglés, Australian Road Assessment Program o [AusRAP](#)) [99], ha determinado algunas medidas de bajo costo que mejoran la seguridad vial considerablemente. Entre estas podemos destacar:

- **Chevrones, barreras y postes delineadores:** Los chevrones son de gran utilidad para orientar y facilitar la interpretación con anticipación de la señal y tomar las medidas correctivas necesarias. En estudios realizados después de instalar este tipo de señales, se determinó que eran efectivos para disminuir la velocidad del 80 % de los conductores [87]. En cuanto a los Postes Delineadores, se encontró que cualquier tratamiento reflectivo realizado para delinear dichos postes era efectivo para mejorar la posición del vehículo en el carril durante una curva. Con la inclusión de postes y chevrones reflectivos, los conductores fueron capaces de determinar la agudez de una curva aproximadamente 75 m antes de lo que era normal previo a la instalación de dicha solución. Las barreras para evitar el despiste de los vehículos en los márgenes de la vía, también son superficies ideales para tratamien-

tos reflectivos que faciliten la circulación en curvas de riesgo, especialmente durante la noche y en condiciones de baja visibilidad [87].

- **Señales de advertencia dinámicas:** Estos dispositivos son de gran utilidad para los ITSs, ya que permiten direccionar las advertencias específicamente a los conductores que estén infringiendo o presenten mayor probabilidad de involucrarse en un accidente. De esta manera, el sistema interactúa con cada usuario buscando generar mayor respeto a las advertencias mostrando mensajes personalizados [87]. En estudios de campo se encontró disminuciones promedio de $3,37 \text{ km/h}$ y $11,1 \text{ km/h}$ en carreteras con velocidades de circulación de aproximadamente 60 km/h y 90 km/h respectivamente; también se obtuvo información de choques en dos sitios que indica una reducción del 54 % en el primer lugar y una asombrosa reducción del 100 % en el segundo. Sin embargo, típicamente se usan solamente en tramos de alto riesgo ya que representan un costo significativo en instalación y mantenimiento. En algunas vías Italianas en las que se instaló chevrones dinámicos con señales secuenciales, se obtuvo una disminución de 28,2 % en todos los choques, con una reducción significativa de 33,7 % en accidentes nocturnos. También se notó que esta solución era especialmente efectiva para curvas con radios inferiores a 300 m con reducciones de 52,2 % en todos los choques y de 79,0 % en los nocturnos [87].
- **Tiras rugosas:** Estas pueden ser construidas en los márgenes de la vía para brindar una alerta auditiva y vibratoria cuando un conductor se sale de los límites de su carril. Algunas agencias han optado por implementar tiras rugosas sobre la línea divisoria central en lugares de alto riesgo de colisión frontal con vehículos circulando en sentido opuesto, en curvas donde los cambios de geometría imponen riesgo y en lugares donde se prohíbe rebasar. En los análisis realizados post-instalación, se encontró una disminución de 61 % en la cantidad de siniestros, una reducción de 50 % en todos los choques y un decremento del 91 % en colisiones frontales con vehículos, colisiones con objetos fijos, despistes y otros accidentes relacionados con la velocidad y la pérdida de control. Notando los beneficios que brinda esta

solución, se han comenzado a incorporar las tiras en todos los caminos rurales de dos y cuatro carriles que no tengan una estructura divisora en el centro [87].

- **Ancho de la pintura en los márgenes:** Soluciones tan simples como ampliar el ancho de la pintura que delimita la carretera han demostrado ser efectivas en facilitar a los conductores a disminuir su carga cognitiva ya que al ser más anchas son más visibles en la periferia y pueden ser identificadas desde una mayor distancia, permitiendo que los conductores se concentren en las complejidades de conducir, especialmente en la noche [87].

Las aplicaciones que se buscan implementar en las **VANET** pueden ir un paso más allá y hacer uso de dispositivos **DSRC** en conjunto con las seguridades viales mencionadas en la [Sección 1.4](#) y [Sección 1.5](#). Esto con el objetivo de maximizar la efectividad de las medidas implementadas en el diseño de una carretera, mediante tecnologías que adviertan a los conductores para que puedan tomar acciones correctivas [15, 100].

Capítulo 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA SARC PARA MAPEAR CARRETERAS

En éste capítulo se evalúa el diseño de la geometría de una curva para posteriormente asignarle una clasificación en función del riesgo que implica transitarlas. En primer lugar se realiza el análisis matemático haciendo uso de un modelo matemático que nos permite relacionar los valores reales y deseables según la normativa establecida para el diseño vial, con el fin de otorgar una clasificación a cada curva de un tramo de carretera. Además, en este apartado se explica el desarrollo y funcionamiento del algoritmo que nos permitirá mapear una carretera identificando las zonas de riesgo, usando como eje principal el modelo matemático citado.

3.1. CLASIFICACIÓN DE LA CARRETERA

En esta sección se establece la relación entre las condiciones geométricas reales de la vía y los valores deseables en base a la normativa de diseño mencionada en la [Subsección 2.1.3](#). Para determinar el tipo de curva se despejará la [Ecuación 2.1](#), de tal forma que obtengamos la [Ecuación 3.1](#) y la [Ecuación 3.2](#). Las variables involucradas se resumen en el [Cuadro 3.1](#).

Cuadro 3.1: Variables involucradas.

Variable	Definición
e_{real}	Peralte real en fracción decimal
f_{real}	Fricción lateral en fracción decimal.
R_{real}	Radio real de la curva en $[m]$.
r_{min}	Radio mínimo de diseño de curva $[m]$.
$v_{directriz}$	Velocidad directriz de diseño $[km/h]$.
v_{segura}	Velocidad segura en $[km/h]$

Los valores de peralte real (e_{real}) y radio real (R_{real}) son obtenidos directamente de los planos taquimétricos del diseño de la carretera. Para el caso específico de este proyecto, usamos la información de los diseños que nos otorgó el **MTOP** del Ecuador. La fricción real (f_{real}) depende de la velocidad directriz ($v_{directriz}$) y se calcula conforme al **Cuadro 2.1**. Sin embargo, en la realidad, este coeficiente puede ser superior, ya que la calidad de los neumáticos de cada vehículo afecta este coeficiente. La velocidad directriz ($v_{directriz}$) se usa durante el diseño para obtener equilibrio en todos los elementos viales que afectan el desempeño de los usuarios; para efectos de este proyecto la ($v_{directriz}$) corresponde al límite de velocidad del tramo analizado.

El radio mínimo (r_{min}) se calcula con la **Ecuación 3.1**. Este valor depende de la f_{real} , del e_{real} de cada curva y de la velocidad directriz ($v_{directriz}$) del sector. Este radio simboliza la mínima longitud que puede tener una curva según el resto de factores involucrados en el diseño.

$$r_{min} = \frac{v_{directriz}^2}{127 * (e_{real} + f_{real})} \quad (3.1)$$

La v_{segura} se determina mediante la **Ecuación 3.2**. Este factor es proporcional a los valores de e_{real} , f_{real} y R_{real} . Representa la máxima velocidad segura de circulación de esa curva específica según sus características físicas reales.

$$v_{segura} = \sqrt{127 * R_{real} * (e_{real} + f_{real})} \quad (3.2)$$

Calcular estos valores nos permite establecer condiciones para calificar una curva de tal forma que cuando el resultado obtenido está dentro de lo adecuado, se le asigna un punto, caso contrario tendría cero puntos. De este modo podemos

encontrar la curva que no cumpla satisfactoriamente con las siguientes condiciones.

- **Condición Radio:** Nuestra primera condición es que $r_{min} < R_{real}$. El r_{min} representa el valor más pequeño que puede tener el radio de una curva según las características de su diseño, éste deberá ser inferior al R_{real} de la curva que se está analizando, caso contrario se determina que el R_{real} en ese sector está por debajo de lo que se considera adecuado.
- **Condición Peralte:** La segunda condición es que el $e_{real} \leq e_{maximo\ recomendado}$. El e_{real} es igual o menor a los valores recomendados para una determinada zona según el Cuadro 2.2. Si el e_{real} es mayor se considera que la curva tiene un peralte inadecuado.
- **Condición Velocidad:** La última condición es que $v_{segura} > v_{directriz}$. Como la v_{segura} representa la máxima velocidad a la que se puede circular de forma segura dadas las características geométricas específicas de una curva, ésta siempre deberá ser superior a la $v_{directriz}$; de lo contrario determinamos que la velocidad de circulación implica riesgo al tomar la curva.

El Cuadro 3.2 resume lo dicho y presenta el color de la respectiva representación en el mapa.

Cuadro 3.2: Clasificación de Curvas.

Calificación	Significado	Representación
3	Deseable	
2	Bajo-Riesgo	
≤ 1	Alto-Riesgo	

3.1.1. CURVAS DESEABLES

Para que una curva se considere *Deseable*, primero es necesario que el radio real (R_{real}) sea más mayor que el radio mínimo (r_{min}) para esa zona según la [Ecuación 2.1](#). Es decir, $R_{real} > r_{min}$ como en el ejemplo de la [Figura 3.1](#). Segundo, el peralte real deberá ser inferior al valor máximo recomendado para la zona analizada según el [Cuadro 2.2](#). Tercero, la velocidad de circulación segura deberá ser

mayor a la velocidad directriz. En el caso de que el tramo analizado cumpla satisfactoriamente con todas estas condiciones, obtendrá la máxima puntuación (3 puntos). Con dicha calificación consideramos que la curva cumple con las condiciones adecuadas de diseño geométrico para garantizar su seguridad, incluso para valores que se desvíen del diseño levemente, como puede ser pequeños cambios en la velocidad directriz.

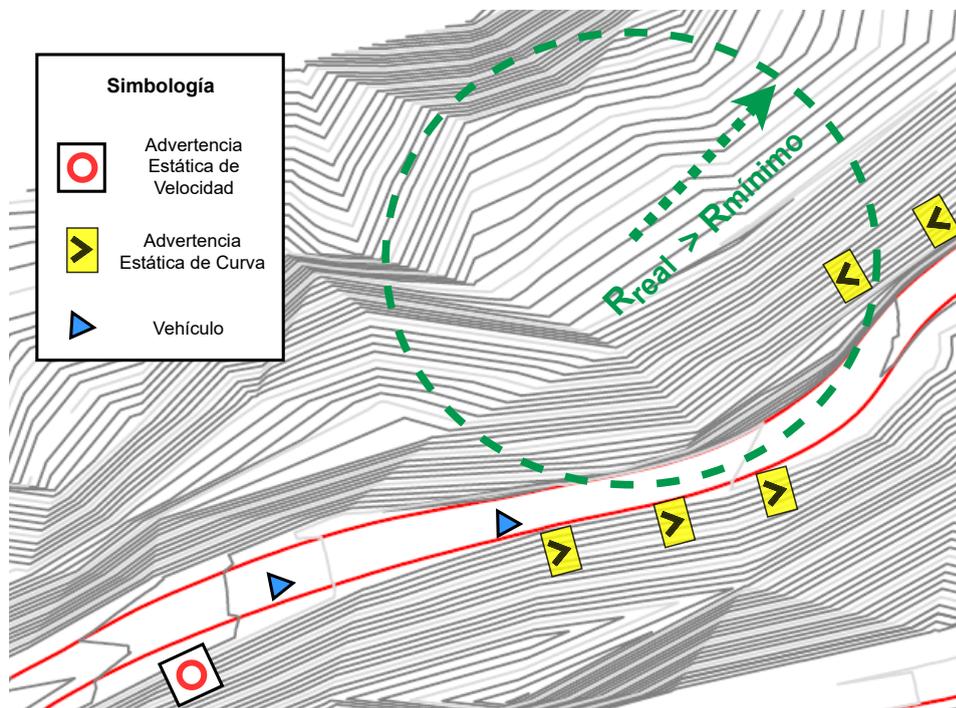


Figura 3.1: Diagrama de una curva Deseable.
Fuente: Autores

3.1.2. CURVAS DE BAJO-RIESGO

Cuando la calificación obtenida es de 2 puntos, tal como el caso de la [Figura 3.2](#), consideramos que es una curva de *Bajo-Riesgo*, esto se debe a que se encuentra justo en la frontera de seguridad según el diseño geométrico. Por ende, leves variaciones en cualquiera de los parámetros involucrados en la [Ecuación 2.1](#), tal como un vehículo que circule a una velocidad levemente superior a la de diseño, calzada mojada, entre otros, podrían causar un accidente.

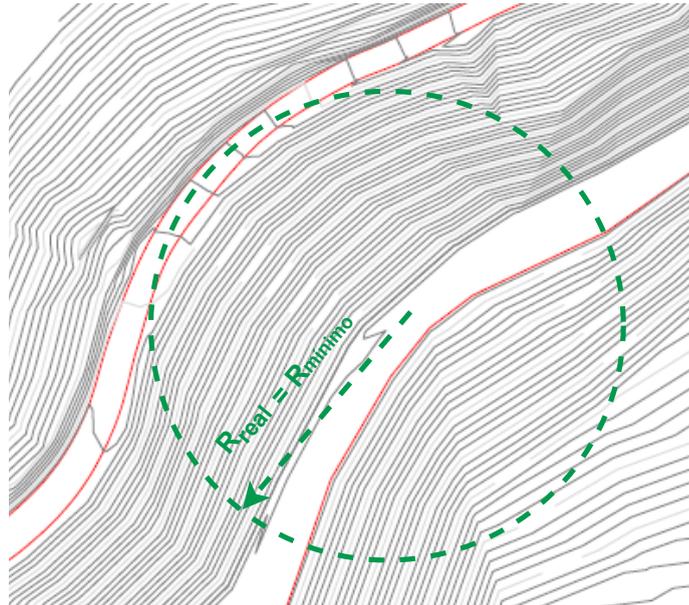


Figura 3.2: Diagrama de una curva de Bajo-Riesgo.
Fuente: Autores

3.1.3. CURVAS DE ALTO-RIESGO

En un caso como el de la [Figura 3.3](#), el análisis devuelve una calificación 1 o 0; esto significa que ninguna de las condiciones que afectan la seguridad de la curva es adecuada, por ende la clasificamos como *Alto-Riesgo*. Esta calificación impone un alto nivel de peligro.



Figura 3.3: Diagrama de una curva Alto-Riesgo.
Fuente: Autores

3.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE ADVERTENCIA EN CARRETERA (SARC)

Según la clasificación otorgada a cada curva, dadas sus características geométricas, el algoritmo debe identificar los tramos de carretera que requieren intervención. El algoritmo considera cada pedazo de carretera como una curva, de tal manera que una recta es vista como una curva de radio amplio; luego clasifica cada curva del tramo analizado en dos categorías, ya sea un tramo *Deseable* o un tramo *No-Deseable*, y éste último se divide en: *Bajo-Riesgo* y *Alto-Riesgo*. La plataforma base para el desarrollo de la aplicación es la versión de 32 – bits de *Python3.7*¹. Se escogió este lenguaje de programación ya que es gratis y es multiplataforma. Una vez instalado python, necesitamos cargar *pip*². Con *pip* funcionando, podemos rápidamente instalar cualquier paquete de herramientas disponible en los repositorios digitales lo cual facilita la programación del algoritmo. Para comenzar solo es necesario ejecutar el [Código 3.1](#) con todos los paquetes de la siguiente lista.

```
1 pip install -U "nombre del paquete de herramientas"
```

Código 3.1: Instalar librerías con pip

- **numpy**³: Es el paquete fundamental para computación científica en *python* dado que puede ser usado como contenedor de información genérica multi-dimensional, lo cual habilita la integración con una gran variedad de bases de datos.
- **pandas**⁴: Este paquete brinda herramientas fáciles de usar y de libre acceso para el análisis de estructuras de datos.
- **os**⁵: Este módulo tiene funciones dependientes del sistema operativo, tal como acceso a directorios y ubicación de archivos

¹<https://www.python.org/downloads/release/python-373/> (Accedido: 03-Dic-2019)

²<https://docs.python.org/3/installing/index.html> (Accedido: 03-Dic-2019)

³<https://docs.scipy.org/doc/numpy/reference> (Accedido: 03-Dic-2019)

⁴<https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/reference> (Accedido: 03-Dic-2019)

⁵<https://github.com/python/cpython/blob/3.8/Lib/os.py> (Accedido: 03-Dic-2019)

- **reportlab**⁶: Presta funcionalidad con herramientas robustas y de libre acceso para crear documentos complejos en formato PDF.
- **time**⁵: Tiene funciones relacionadas con el tiempo. Para el propósito de este proyecto, servirá para adjuntar una marca de tiempo al nombre de los archivos resultantes.
- **utm**⁶: Es un conversor bi-direccional de coordenadas UTM y Latitud-Longitud.
- **simplekml**⁷: Fue creado para generar archivos KML o KMZ aliviando la carga de tener que aprender la sintaxis, siempre y cuando se tenga una idea general de la estructura necesaria de un mapa.

Aparte de los items mencionados, también se debe confirmar que la librería **tkinter**⁸ esté funcional; esta librería por lo general viene pre-instalada con la versión de python escogida. Luego de verificar que estén instalados todos los paquetes mencionados, el entorno de programación está listo.

Para lograr nuestro objetivo de categorizar las curvas, nuestro algoritmo sigue los siguientes pasos:

1. Primero necesitamos un mapa taquimétrico a detalle (ver [Apéndice B](#)) del tramo que se desea estudiar para adquirir ciertos parámetros del diseño vial tal como el radio real de curvatura, el peralte real, entre otros. De esta forma podemos relacionar las características geométricas vistas en la [Ecuación 2.1](#) ($e + f = \frac{v^2}{127 * R}$), con una velocidad de diseño o velocidad directriz que se define para obtener un diseño equilibrado en todos los elementos viales que afectan el desempeño de los usuarios. El formato del mapa taquimétrico puede ser *.dwg* o *.dxf*, cuyo formato permite exportar la información directamente a una hoja de cálculo tipo *.csv*; sin embargo, en la mayoría de los casos se tendrá una versión del mapa en formato *.pdf* ([Figura B.1](#)) del cual se extraen manualmente los datos relevantes (ver [Figura 3.5](#)).

⁶<https://www.reportlab.com/dev/opensource> (Accedido: 08-Dic-2019)

⁵<https://docs.python.org/3/library/time.html> (Accedido: 08-Dic-2019)

⁶<https://github.com/Turbo87/utm> (Accedido: 18-Dic-2019)

⁷<https://readthedocs.org/projects/simplekml> (Accedido: 18-Dic-2019)

⁸<https://docs.python.org/3/library/tkinter.html> (Accedido: 18-Dic-2019)

2. El siguiente paso se enfoca en la interfaz de usuario de la aplicación en la cual se tiene una opción que nos permite seleccionar el mapa taquimétrico que deseamos analizar. A su vez nos da la opción de elegir el tipo de zona en la que se ubica el mapa que cargamos; puede ser Urbana, Suburbana, Rural Plana o Rural montañosa y como última opción de la interfaz, es el ingreso manual de la velocidad directriz, dicha velocidad corresponde al máximo valor seguro de un tramo «*donde las demás condiciones son tan buenas que predominan las características físicas de la misma*» [93].

3. La siguiente fase se centra en el cálculo de los valores r_{min} y v_{segura} , tomando como eje de análisis a la [Ecuación 2.1](#) con sus respectivas umbralizaciones explicadas en [Cuadro 3.2](#).

4. Procedemos a la asignación de uno o cero puntos según el cumplimiento de las condiciones establecidas en la [Sección 3.1](#), obteniendo como resultado la calificación de cada curva.

5. Finalmente obtenemos dos documentos de salida. El primero es la generación del informe en formato *.pdf* con los valores reales, deseables y la calificación de cada curva del tramo analizado. El segundo documento de salida es un mapa en formato *.kml* donde se visualizan las curvas analizadas con sus respectivas calificaciones conforme al [Cuadro 3.2](#).

El código de programación completo está en el [Apéndice A](#) y el diagrama de flujo de la [Figura 3.4](#) resume el funcionamiento.

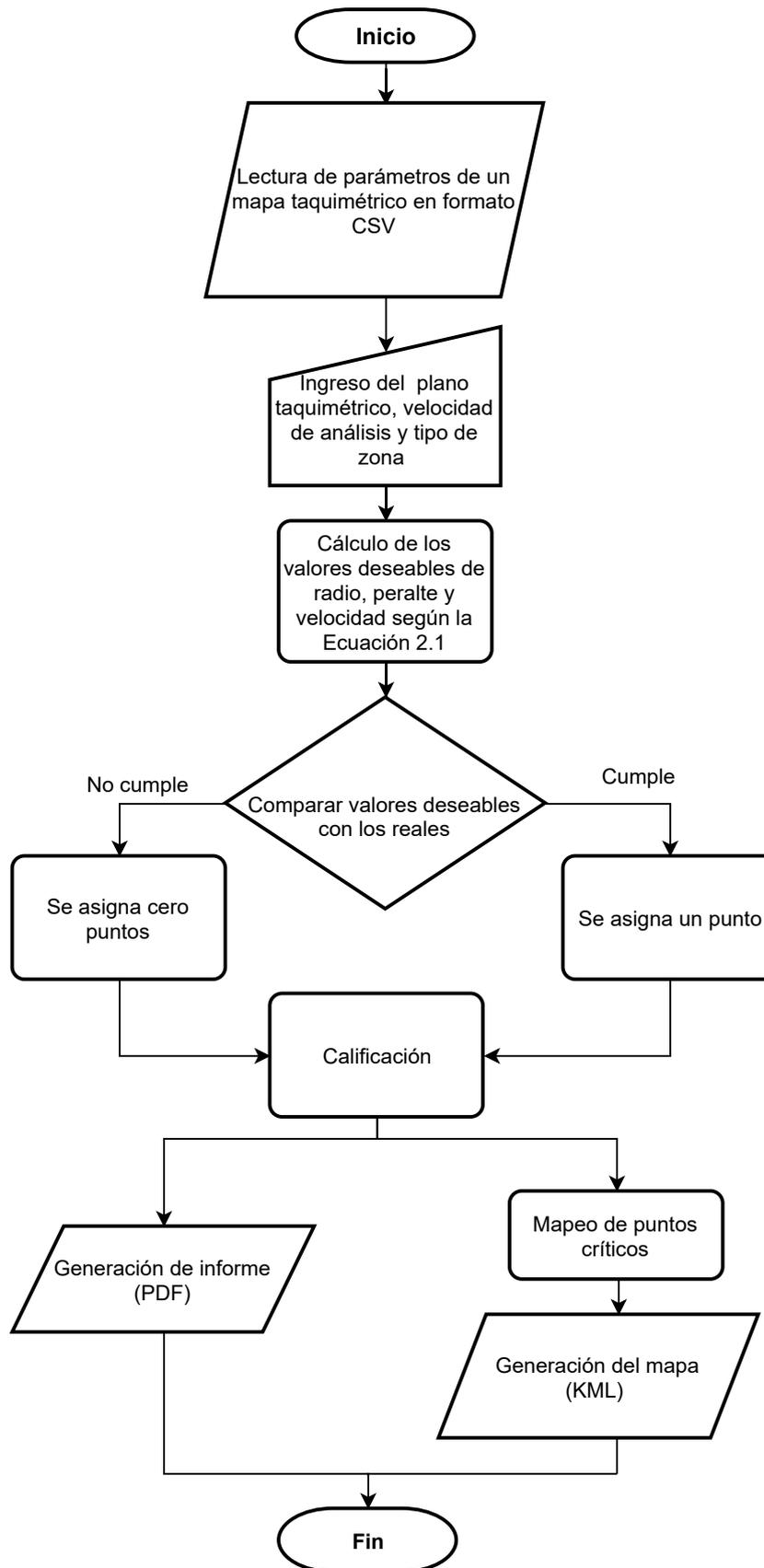


Figura 3.4: Diagrama de flujo
Fuente: Autores

Una vez establecidas las condiciones que umbralizan el funcionamiento del algoritmo, procedemos a establecer según el [Cuadro 3.2](#), las propiedades de cada curva y su respectiva representación para diferenciar cada curva dentro del trayecto, con un color correspondiente a la severidad del riesgo (verde para *Deseable*, amarillo para *Bajo-Riesgo* y rojo para *Alto-Riesgo*).

Un ejemplo de los contenidos del archivo *.csv* que ingresa al programa se muestran en la captura de la [Figura 3.5](#), donde la primera columna denominada curva representa todos los pedazos en la carretera para los cuales se tiene información. Vale recordar que el algoritmo considera una sección recta como una curva con un radio amplio. La segunda y tercera presentan los valores reales del radio y peralte. Las cuatro siguientes son las coordenadas UTM del lugar donde comienza y termina la curva; estas coordenadas denotan una ubicación mediante los valores del Norte (N) y Este (E) de dicho lugar. De esta forma, las últimas cuatro columnas del [Figura 3.5](#) muestran el punto donde comienza (PC) y punto donde termina (PT) la curva.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Curva	Peralte Real	Radio Real	PCN	PCE	PTN	PTE	
2	1	8	24	9640321.72	674337.39	9640308.09	674326.52	
3	2	7.18	32	9640301.79	674315.67	9640263.41	674301.58	
4	3	0	82	9640229.27	674313.69	9640212.58	674313.71	
5	4	8	20	9640171.93	674323.69	9640162.87	674326.67	
6	5	8	22	9640152.45	674334.16	9640139.06	674338.28	
7	6	6.68	33	9640119.62	674337.8	9640097.53	674345.55	
8	7	5.72	37	9640085.25	674355.9	9640062.18	674364.6	
9	8	0	140	9640052.11	674364.81	9640012.8	674360.03	
10	9	0	100	9640008.22	674358.79	9639990.87	674352.35	

Figura 3.5: Ejemplo de contenido del archivo *.csv*.

Fuente: Autores

3.3. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA SARC

La [Figura 3.6](#) muestra la aplicación inicializada, como se puede apreciar, aparecen dos menús desplegables y un campo de ingreso.

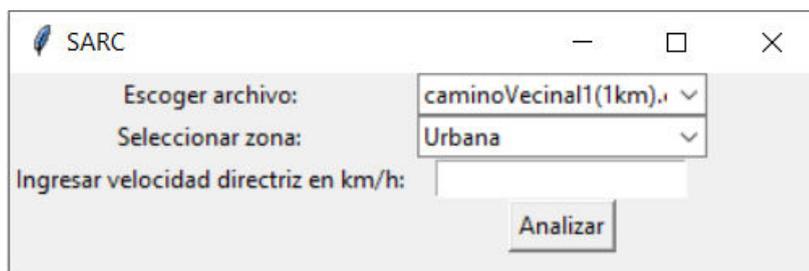


Figura 3.6: Interfaz inicial de usuario.
Fuente: Autores

1. En el primer menú se muestra la opción «*Escoger Archivo*» donde se selecciona la base de datos en formato *.csv* del mapa taquimétrico que se desea calificar. Para el caso de esta demostración se escoge el archivo denominado *caminoVecinal1.csv* correspondiente al mapa de la [Figura B.1](#).
2. En el segundo menú desplegable tenemos la opción «*Seleccionar Zona*» conformada por cuatro items: Urbana, Suburbana, Rural Plana y Rural Montañosa. Cada una tiene preestablecido un valor de peralte máximo que se debe cumplir conforme el [Cuadro 2.2](#) en la [Subsección 2.1.3](#).
3. En la tercera entrada se tiene un cuadro de texto en el cual se ingresa la velocidad directriz correspondiente en *Km/h*. Cabe mencionar que la aplicación y todas las bases de datos de los mapas deben estar en una misma carpeta.

Luego de haber establecido los parámetros hacemos clic en «*Analizar*» y si todo está correcto, se genera un cuadro informativo y se guardan dos documentos resultantes en el mismo directorio de los planos y el algoritmo. En los archivos generados tenemos un documento *.pdf* y un *.kml*. El *pdf* presenta los cálculos resultantes que se obtienen haciendo uso de la rúbrica planteada en la [Sección 3.1](#). Básicamente se comparan los valores reales y deseables explicados en la [Sección 3.1](#) y se asigna la calificación correspondiente a cada curva.

La [Figura 3.7](#) muestra el resultado obtenido, en donde las columnas denominadas *Curva*, *Radio Real* y *Peralte Real* son los valores de ingreso obtenidos del archivo que contiene la información taquimétrica. Las columnas *Radio Mínimo* y *Velocidad Segura* muestran el resultado de cada curva conforme a la [Ecuación 3.1](#)

CAPÍTULO 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA SARC PARA MAPEAR CARRETERAS

($r_{min} = \frac{v_{directriz}^2}{127 * (e_{real} + f_{real})}$) y la **Ecuación 3.2** ($v_{segura} = \sqrt{127 * r_{real} * (e_{real} + f_{real})}$) respectivamente. En las columnas *Condición Radio* ($r_{real} > r_{min}$), *Condición Peralte* ($e_{real} \leq e_{recomendado}$) y *Condición Velocidad* ($v_{segura} > v_{directriz}$) (**Sección 3.1**) se asigna el valor de 1 si las condiciones se cumplen. En cada curva se suman estos parámetros y se otorga su calificación (última columna de la tabla).

Resultados del SARC

Curva	Radio Real	Radio Mínimo	Condición Radio	Peralte Real	Condición Peralte	Velocidad Segura	Condición Velocidad	Calificación
1.0	100.0	63.84	1.0	0.0	1.0	75.09	1.0	3.0
2.0	100.0	63.84	1.0	0.0	1.0	75.09	1.0	3.0
3.0	25.0	54.1	0.0	8.0	1.0	40.79	0.0	1.0
4.0	80.0	63.84	1.0	0.0	1.0	67.16	1.0	3.0
5.0	50.0	58.57	0.0	4.0	1.0	55.44	0.0	1.0
6.0	30.0	54.1	0.0	8.0	1.0	44.68	0.0	1.0
7.0	32.0	54.96	0.0	7.18	1.0	45.78	0.0	1.0
8.0	40.0	57.21	0.0	5.15	1.0	50.17	0.0	1.0
9.0	120.0	63.84	1.0	0.0	1.0	82.26	1.0	3.0
10.0	60.0	58.57	1.0	4.0	1.0	60.73	1.0	3.0
11.0	42.0	57.54	0.0	4.86	1.0	51.26	0.0	1.0
12.0	25.0	54.1	0.0	8.0	1.0	40.79	0.0	1.0
13.0	50.0	58.57	0.0	4.0	1.0	55.44	0.0	1.0
14.0	80.0	63.84	1.0	0.0	1.0	67.16	1.0	3.0
15.0	30.0	54.1	0.0	8.0	1.0	44.68	0.0	1.0
16.0	120.0	63.84	1.0	0.0	1.0	82.26	1.0	3.0
17.0	55.0	58.57	0.0	4.0	1.0	58.14	0.0	1.0
18.0	40.0	57.21	0.0	5.15	1.0	50.17	0.0	1.0

Figura 3.7: Tabla de resultado del SARC.

Fuente: Autores

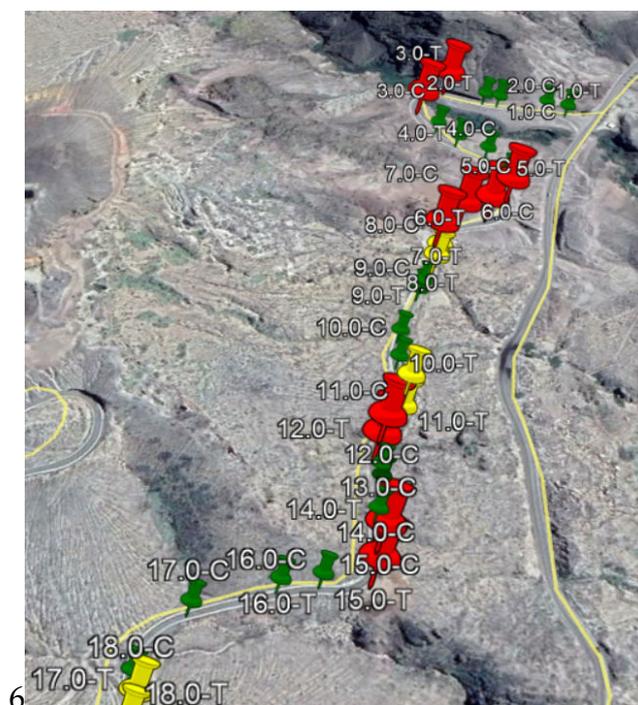


Figura 3.8: Mapa resultado del SARC.

Fuente: Autores

CAPÍTULO 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA SARC PARA MAPEAR CARRETERAS

Aparte del informe generado con la tabla de resultados, también se genera un archivo *.kml* que puede ser abierto con Google Earth donde se marcan los resultados sobre un mapa digital, destacando los tramos según los colores del [Cuadro 3.2](#) (verde para *Deseable*, amarillo para *Bajo-Riesgo* y rojo para *Alto-Riesgo*). La [Figura 3.8](#) muestra el mapeo correspondiente del mapa de la [Figura B.1](#). Cada área es definida por un número y una letra. El número corresponde al tramo y la letra específica donde comienza y termina cada curva.

Capítulo 4

DISEÑO Y LINEAMIENTOS DEL SISTEMA DE ADVERTENCIAS DE RIESGOS EN CARRETERA

Como se vio en la [Sección 3.1](#), el algoritmo analiza cada curva bajo tres condiciones de seguridad. En el mejor de los casos la curva cumple todas las condiciones y se considera *Deseable*. En los casos donde se cumple con dos de las tres condiciones, se tiene una curva de *Bajo-Riesgo*. En el peor de los casos, se cumple una o ninguna de las condiciones, esto significa que esta curva es de *Alto-Riesgo* y requeriría la implementación del SARC para disminuir el peligro.

4.1. SISTEMA DE ADVERTENCIA DE LA CURVA

Una vez que el algoritmo identifica las zonas de riesgo del mapa taquimétrico, procedemos a diseñar el sistema propuesto, con el objetivo principal de advertir al conductor sobre estos riesgos y precautelar su seguridad.

Por cuestiones de los costos necesarios para la mejora de las carreteras, y el hecho que las curvas *Deseable* no implican mayor riesgo, no es necesario implementar señalización extra y se considera que la señalética vigente (en caso de haberla) cubriría las necesidades de suministrar información adecuada y correcta a los usuarios de la carretera. En los casos donde la señalética vigente no cumpla con las normativas, ésta deberá ser rectificada para cumplir con los requisitos que exige [90] y recomienda [98]. Cabe mencionar que estas curvas en particular no llevan [RSUs](#) u otros sistemas de comunicación.

Dado que las curvas de *Bajo-Riesgo* están en el margen de seguridad, se reco-

mienda instalar señalética con iluminación dinámica como la tratada en la [Sección 2.2](#), los chevrones de TAPCO presentados en la [Subsección 1.2.2](#) o se pueden realizar las modificaciones de [89] a la señalética existente. La [Figura 4.1](#) muestra una sugerencia de lo que una curva de este tipo debería tener. Sin embargo, dado el costo de implementación, las adecuaciones quedan a consideración del ente regulador y en función del presupuesto que se tiene para la vía. Obviamente mientras más **RSUs** y **OBUs** se tenga en una **VANET**, mejor será el desempeño de la red de comunicaciones vehiculares y por ende del sistema propuesto.

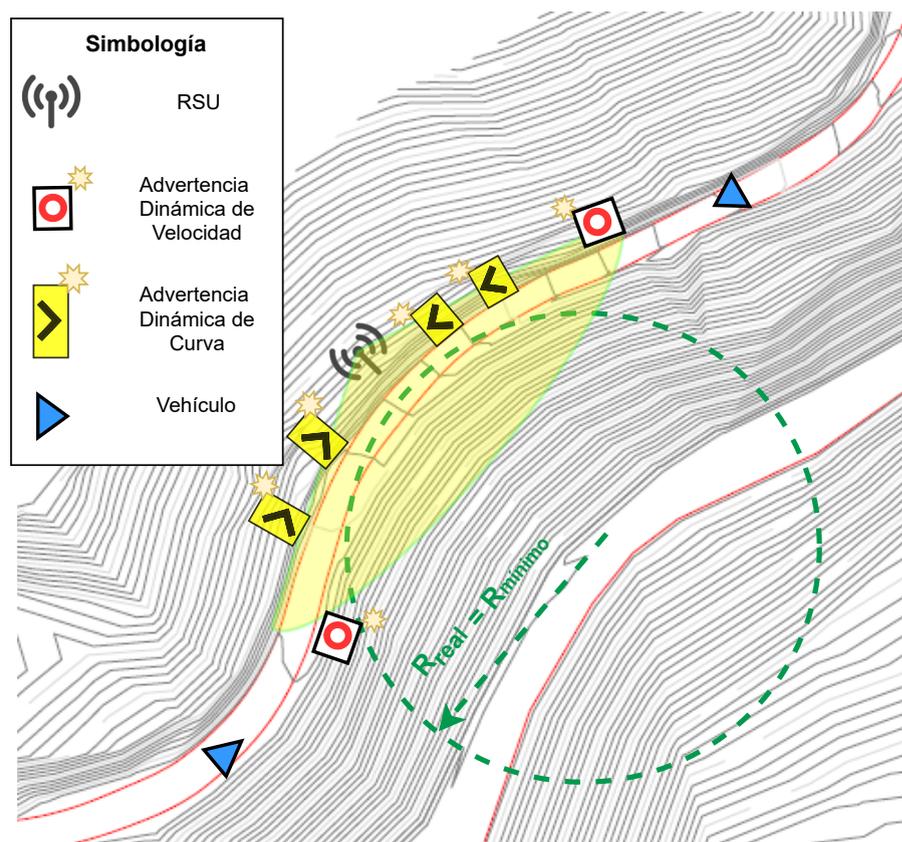


Figura 4.1: Elementos de una curva Bajo-Riesgo.

Fuente: Autores

Por otra parte, en las curvas de *Alto-Riesgo*, será indispensable garantizar la comunicación entre todas las **OBUs** y **RSUs** que se encuentren dentro del área de cobertura mínima; esta área de cobertura tiene que ser superior a la distancia «A» que se muestra en la [Figura 3.3](#), ya que es necesaria para alertar al conductor mucho antes de que ingrese a la zona de riesgo. El [Cuadro 4.1](#) muestra las distancias «A» para diferentes velocidades directrices. Esta medida representa la distancia

a la cual se instala la señalética vial (según [90]) dependiendo de la velocidad directriz.

La [Figura 4.2](#) ilustra los elementos que conforman la solución ante este riesgo. Se deberá instalar varias de las propuestas presentadas en [87], tal como señalética con iluminación dinámica, chevrones, postes y barreras con tratamiento reflectivo, tiras rugosas y delineación más ancha en los márgenes de la carretera, entre otras soluciones de bajo costo. La ubicación específica de la señalética depende de la línea de vista que se tiene, hacia el punto de inicio de la longitud «A», consecuentemente no se puede determinar con el algoritmo que hemos diseñado, ya que requeriríamos una visita en sitio. Con el mismo razonamiento, el establecimiento del punto exacto de la o las RSUs necesitará de un estudio de radio propagación, cuyo desarrollo está fuera del alcance del presente proyecto.

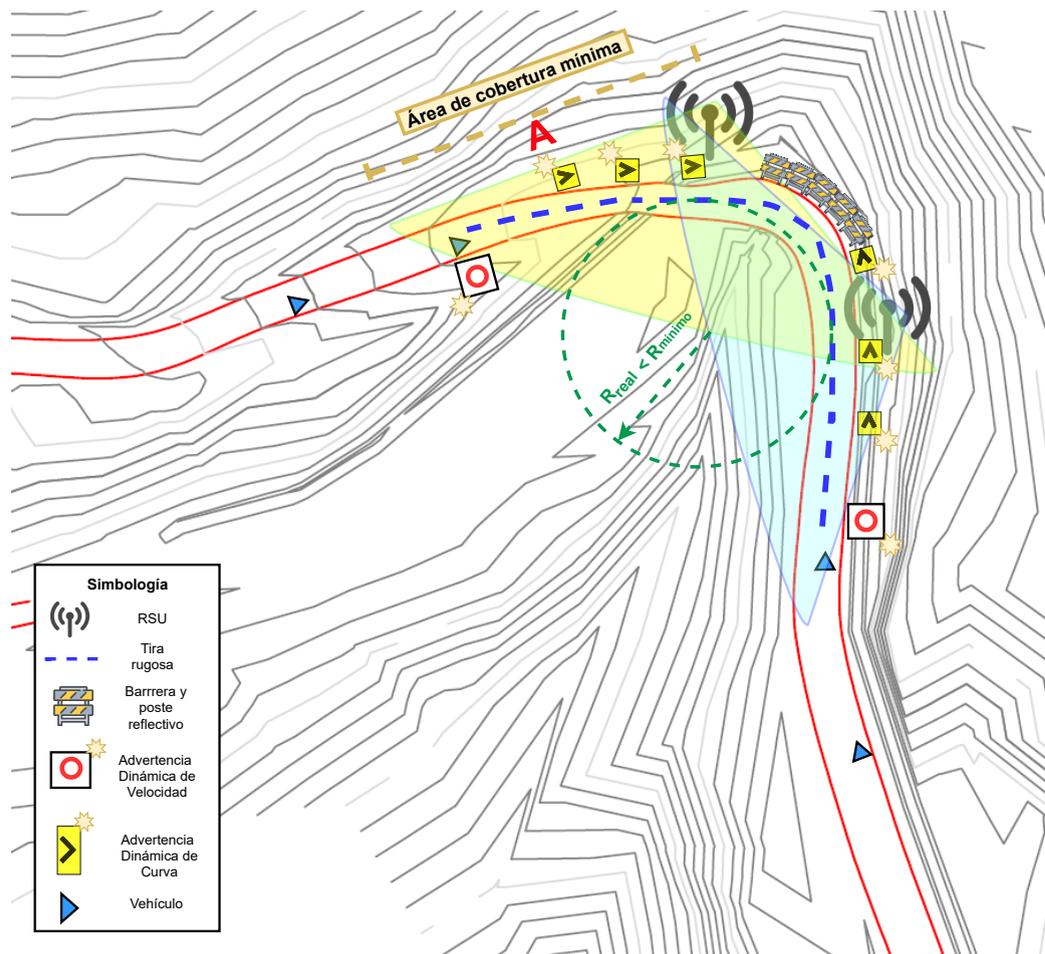


Figura 4.2: Elementos de una curva Alto-Riesgo.

Fuente: Autores

Cuadro 4.1: Área de cobertura en función de la distancia «A»

Velocidad directriz [km/h]	Distancia A [m]
<75	80-120
75-90	120-180
>90	180-250

Las gráficas de las [Figura 4.3](#), [Figura 4.4](#) y [Figura 4.5](#) muestran los elementos que conforman la propuesta de infraestructura para el caso de la primera curva peligrosa del mapa «Camino Vecinal 1». Este tramo de carretera corresponde al primer kilómetro de la vía a Pucará, donde los resultados del [SARC](#) indican que la «Curva 3» es de *Alto-Riesgo* (ver [Figura 3.7](#)). En las gráficas podemos observar una curva dentro del tramo de análisis con los equipos viales necesarios. Se muestra la señalética con iluminación dinámica de límite de velocidad, los chevrones de curva de la [Figura 4.4](#) y las [RSU](#) que conformarán la [VANET](#).



Figura 4.3: Señalética con iluminación.
Fuente: Autores

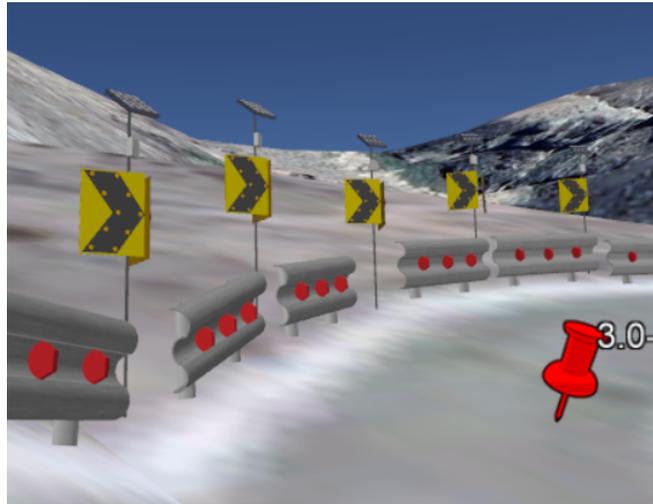


Figura 4.4: Chevron y barreras reflectivas.
Fuente: Autores

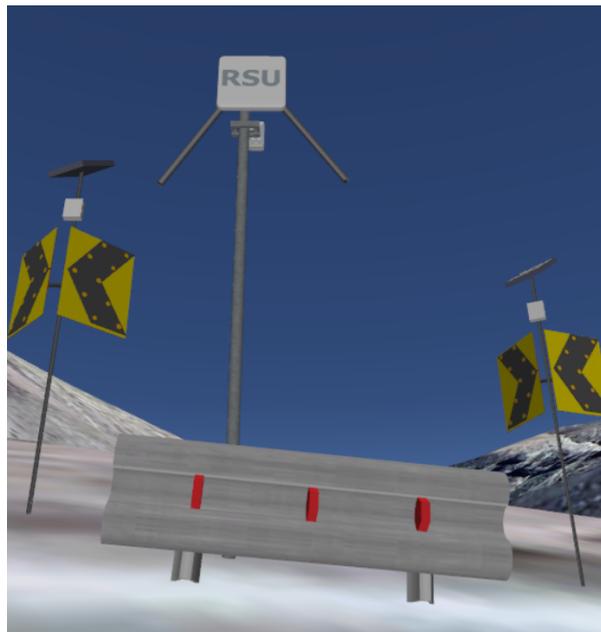


Figura 4.5: Antena RSU.
Fuente: Autores

A continuación se presenta dos casos en los cuales la topografía del terreno es un factor principal para determinar el número de elementos de infraestructura vial necesarios para garantizar la comunicación entre las **OBUs** y las **RSUs**.

CASO 1

En la [Figura 4.6](#) se puede apreciar uno de los casos presentes generalmente en las carreteras de la sierra Ecuatoriana, al estar ubicada en la región andina, las carreteras deben acoplarse a las condiciones escarpadas del terreno. Una de las problemáticas que identificamos en estas zonas es la comunicación entre las [RSUs](#) y las [OBUs](#) debido al obstáculo que representan las montañas, lo que implica interferencia en los enlaces de comunicación, ocasionando dificultades en la transmisión. Por lo tanto, una [RSU](#) no podría brindar suficiente cobertura. En estos casos, la propuesta sugerida para asegurar la cobertura de todo el sector bajo las condiciones topográficas mencionadas, la podemos observar en la [Figura 4.6](#) donde se plantea instalar dos [RSUs](#) ubicadas de tal manera que se garantice la comunicación entre estos dos dispositivos y se pueda dar cobertura igual o mayor a la longitud «A». Además, habrá que asegurar línea de vista entre las dos [RSUs](#) para garantizar el enlace de comunicación entre estas.

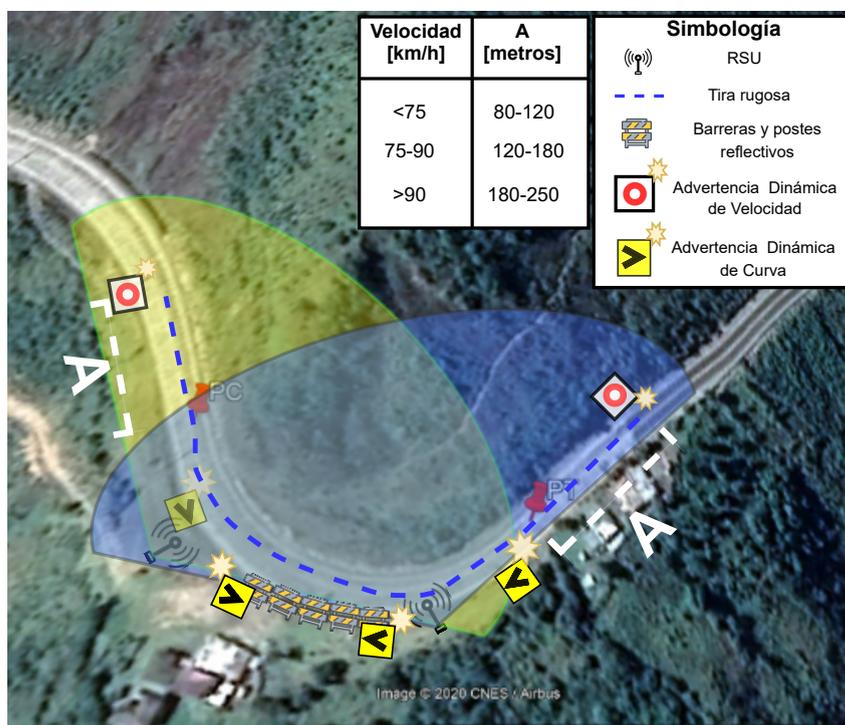


Figura 4.6: Caso 1. Curva con obstáculos
Fuente: Autores

CASO 2

En la [Figura 4.7](#) podemos observar el segundo caso de análisis. Como ejemplo se muestra un terreno plano en el cual la topografía no es un obstáculo para la transmisión de las antenas; lo que facilita la comunicación entre las [RSUs](#) y [OBUs](#). La propuesta de diseño e implementación para este caso, es hacer uso de una sola [RSU](#) sin comprometer la eficiencia de comunicación entre dispositivos con el fin de aminorar costos en la implementación. La entidad encargada de la instalación de los equipos deberá ubicar las [RSUs](#) de tal forma que garantice la cobertura de la longitud «A» (definida en el [Cuadro 4.1](#)) para ambos sentidos de la curva.

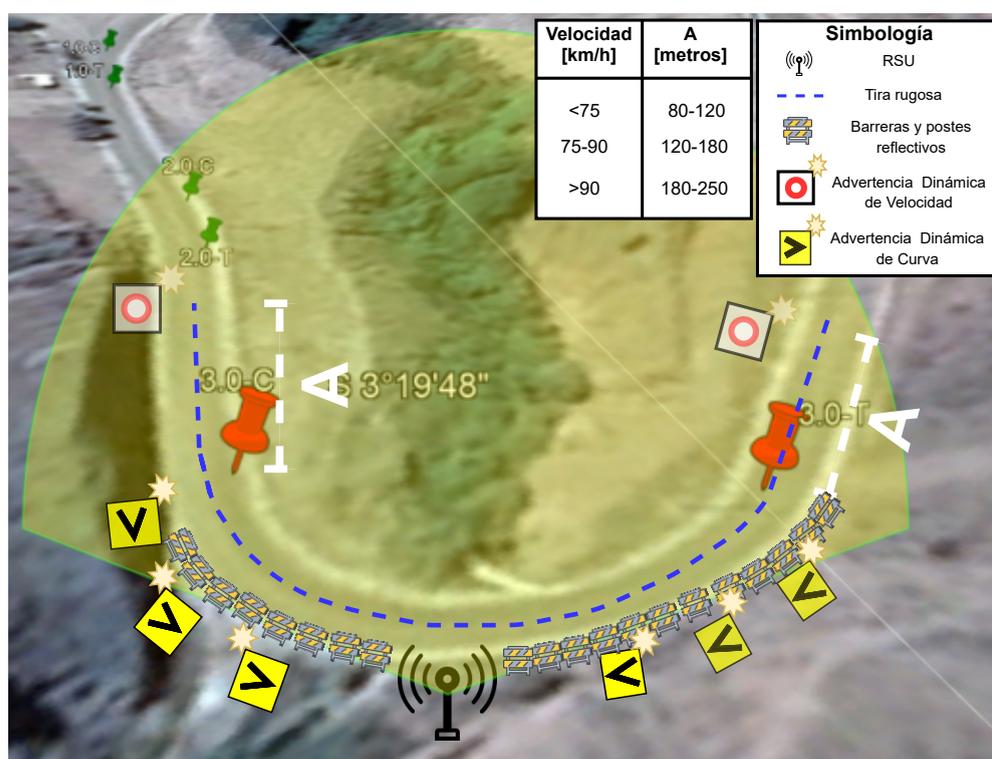


Figura 4.7: Caso 2. Curva sin obstáculos

Fuente: Autores

4.2. SISTEMA DE ADVERTENCIA MULTI-MODAL DENTRO DEL VEHÍCULO

En la [Subsección 1.4.1](#) vimos que los tipos de advertencias comúnmente usadas en los vehículos actuales son visuales, auditivas y hápticas. Encontramos que entre las mencionadas, las hápticas son las más adecuadas para comunicar

CAPÍTULO 4. DISEÑO Y LINEAMIENTOS DEL SISTEMA DE ADVERTENCIAS DE RIESGOS EN CARRETERA

un mensaje, sin incrementar la carga cognitiva del conductor. Sin embargo, está confirmado que una advertencia multi-modal brinda mejores resultados que cualquier advertencia unimodal; por ende, es la forma que hemos escogido para advertir al conductor de la proximidad de una curva peligrosa, objetivo central de nuestra propuesta SARC. No obstante, esta tecnología aún está en desarrollo, todavía no hay legislación que exija la inclusión, ni normalización de las advertencias con los métodos mencionados, y la incorporación dentro del vehículo depende de cada fabricante.

En la [Figura 4.8](#) se observa un vehículo viajando hacia una curva de riesgo. El conductor va seguro por que su vehículo está equipado con una [OBU](#), la cual le permite ser alertado sobre los riesgos en la carretera mucho antes de que el peligro sea evidente, gracias a que el rango de alcance de las [RSUs](#) es superior a la distancia de señalización («A»). En las siguientes figuras se caracteriza las formas en las cuales un conductor podría ser alertado del peligro inminente de la carretera.



Figura 4.8: Auto aproximándose a una curva de riesgo.
Fuente: Autores

La [Figura 4.9](#) muestra un ejemplo de alerta visual que notaría el conductor de un vehículo dentro de una [VANET](#).



Figura 4.9: Alerta visual.
Fuente: Autores

En la [Figura 4.10](#) se presenta la alerta auditiva que recibiría el conductor.



Figura 4.10: Alerta auditiva.
Fuente: Autores

En la [Figura 4.11](#) se muestra una advertencia háptica vibratoria gracias a un motor colocado bajo el volante. Este motor genera vibraciones para estimular directamente las manos del conductor en caso de que se requiera una acción correctiva de posición del automóvil.

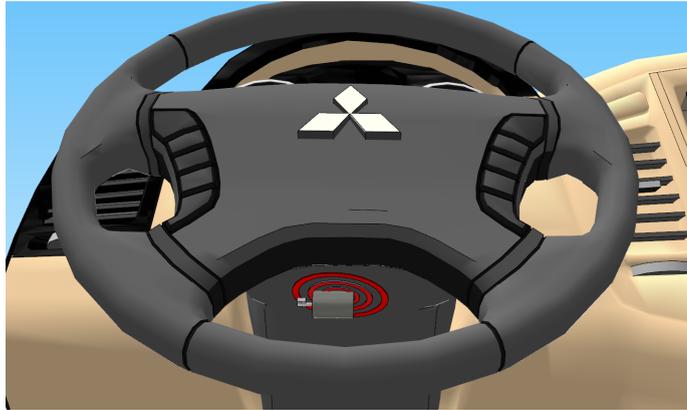


Figura 4.11: Alerta Háptica en el volante.
Fuente: Autores

De igual forma, para la alerta háptica de la [Figura 4.12](#), se coloca un motor tras el pedal del acelerador con el fin de generar vibración para estimular directamente los pies en caso de que se requiera una acción inmediata de frenado del automóvil.

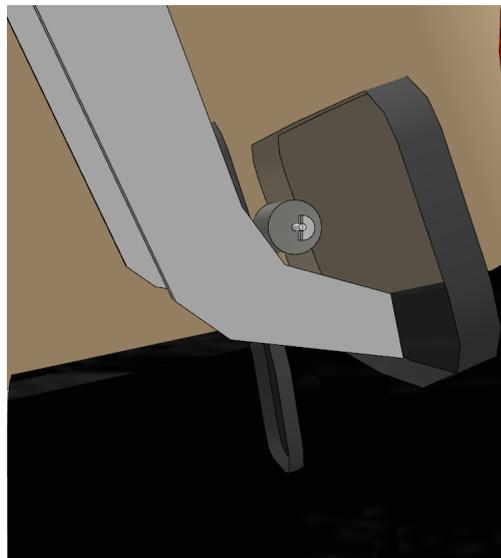


Figura 4.12: Alerta Háptica en el pedal.
Fuente: Autores

La [Figura 4.13](#) describe la simbiosis entre la [RSU](#), [OBU](#), la computadora del vehículo y esta a su vez con los actuadores ubicados para emitir las advertencias multi-modales. La [RSU](#) emite un mensaje de alerta inalámbrico; si el automóvil ingresa a la zona de transmisión de la [RSU](#), automáticamente la [OBU](#) recibe di-

cho mensaje y lo procesa en la CPU del automóvil para posteriormente emitir la activación de los actuadores, por medio del BUS CAN, de las alertas hápticas, auditivas y visuales. En algunos vehículos nuevos el sistema ya viene integrado; sin embargo, los vehículos que no cuenten con esta tecnología de fábrica, podrán adquirir las partes que carezcan de forma modular.

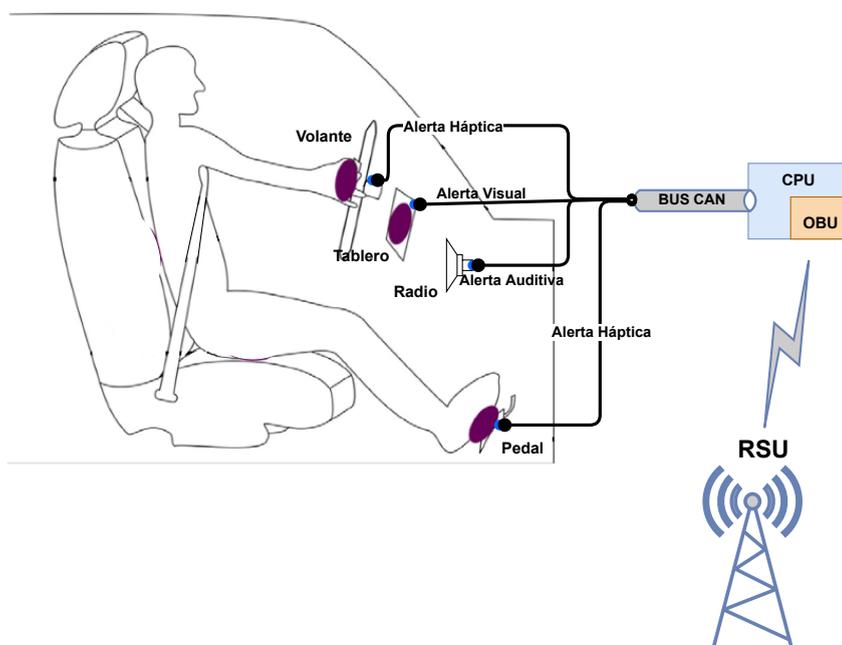


Figura 4.13: Diagrama de alerta multi-modal.
Fuente: Autores

4.3. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Para determinar cuales son los dispositivos adecuados, hemos considerado el parámetro de la conectividad, estándares de diseño, certificaciones y precio. Bajo esos lineamientos, notamos que Saavari brinda las mismas prestaciones y características que los competidores con la particular ventaja de ofrecer los precios más bajos, por ello, hemos decidido escoger estos equipos para nuestra propuesta. Es oportuno mencionar que Saavari aparte de ofrecer la comunicación DSRC, incorpora en sus nuevos equipos la conectividad C-V2X que se encuentra en desarrollo para incluir a peatones con celulares compatibles (LTE, 5G) con entornos de redes vehiculares.

A continuación se muestra el Cuadro 4.2, donde presentamos los costos incu-

CAPÍTULO 4. DISEÑO Y LINEAMIENTOS DEL SISTEMA DE ADVERTENCIAS DE RIESGOS EN CARRETERA

rridos durante el desarrollo del [SARC](#).

Cuadro 4.2: Costo de Desarrollo del SARC

Item	Cantidad	Precio Unitario [USD]	Precio Total [USD]
Horas de programación	300	40,00	12000,00
TOTAL			12000,00

A continuación se muestra el [Cuadro 4.3](#) con el presupuesto necesario para la curva del caso 1 ([Subsección 3.1.3](#)).

Cuadro 4.3: Costos para curvas del caso 1

Item	Cantidad	Precio Unitario [USD]	Precio Total [USD]
Saavari SW2000 Road-Side Unit	2	3218,00	6436,00
TAPCO Blinker Chevron	12	1680,00	20160,00
TAPCO Speed Limit BlinkerSign	2	1395,00	2790,00
Instalación de RSU	2	2000,00	4000,00
Instalación de Señalética	14	40,00	420,00
TOTAL			33806,00

Por otra parte tenemos el [Cuadro 4.4](#) con el presupuesto necesario para la curva del caso 2 ([Subsección 3.1.3](#)).

Cuadro 4.4: Costos para la curva del caso 2

Item	Cantidad	Precio Unitario [USD]	Precio Total [USD]
Saavari SW2000 Road-Side Unit	1	3218,00	3218,00
TAPCO Blinker Chevron	7	1680,00	11760,00
TAPCO Speed Limit BlinkerSign	2	1395,00	2790,00
Instalación de RSU	1	2000,00	2000,00
Instalación de Señalética	9	40,00	360,00
TOTAL			20128,00

Como se puede apreciar, entre los items del [Cuadro 4.3](#) y [Cuadro 4.4](#) no figuran las [OBUs](#); esto se debe a que tanto fabricantes de vehículos como conductores tienen la opción a elegir el equipo que mejor cumpla sus necesidades siempre y cuando sea compatible con la tecnología [DSRC](#). Sin embargo, nosotros recomendamos usar el [OBU](#) MW1000 de Saavari que cuesta \$2296.

Es necesario mencionar que el costo de los equipos listados, es el precio en puerto en los Estados Unidos.

4.4. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

En este capítulo vimos de cerca los elementos que conforma la propuesta de nuestro **SARC**. En primer lugar revisamos los elementos de infraestructura que deben ser instalados en ciertos sectores de la carretera en los que el programa que diseñamos haya marcado como curva de *Alto-Riesgo*. Entre estos elementos se destaca la señalética con iluminación dinámica que ayudará a informar al conductor desde la parte externa del vehículo, y las **RSUs** que transmiten los mensajes de advertencia hacia dentro del vehículo (**OBUs**). Además, analizamos los dispositivos que deben ir dentro del vehículo, y presentamos los tipos de alertas que el conductor de un automóvil, con capacidad para proporcionar alertas multi-modales, verá mientras conduce hacia a una curva peligrosa. Finalmente, planteamos el presupuesto básico necesario para cubrir con las necesidades en dos casos de análisis, selectos por las peculiares características que imponen.

Capítulo 5

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo hemos desarrollado una propuesta para la implementación de un sistema de advertencias en carretera, específicamente para advertir a conductores sobre curvas peligrosas que se encuentran en la vía. Esto con el propósito de disminuir los siniestros de tránsito que cada año cobran un gran número de vidas, especialmente en las carreteras y autopistas de nuestro país.

Los daños mecánicos, el irrespeto a las señales de tránsito sumado a la impericia de los conductores contribuyen para el alto índice de accidentes, por este motivo nuestra propuesta [SARC](#) está enfocada a advertir al conductor de que se aproxima una curva peligrosa e indicarle cual sería el límite de velocidad a la que debería tomar la curva.

Para lograr nuestro cometido, hemos tenido que investigar sobre los sistemas de comunicaciones vehiculares para establecer los equipos con las mejores prestaciones. De la misma forma, se analizaron cuál es la mejor forma de advertir al conductor, dentro del vehículo, sobre peligros próximos que se puedan encontrar en la carretera; esto con la intención de no sobrecargar de información al conductor y disminuir su desempeño cognitivo. Luego de todo este estudio, tuvimos que diseñar un programa que nos permita mapear una carretera para categorizar las curvas en tres niveles de peligrosidad. A partir de esta categorización procedimos a establecer nuestra propuesta diseñándola y delineándola de tal forma de

poder cumplir con el objetivo principal de la tesis; así como también que la propuesta cumpla con la reglamentación actual referente a la normativa de tránsito y señalética vigente en el Ecuador.

En función de lo mencionado, nuestras aportaciones se establecieron principalmente en los siguientes tres ejes:

5.1.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA PARA MAPEAR UNA CARRETERA

Como vimos en el [Capítulo 3](#) fue necesario implementar un programa que nos permita mapear una carretera, esto con el objetivo de establecer el nivel de peligrosidad de la curvas. Este programa nos permite:

- Analizar las curvas de un tramo de la carretera en función de sus parámetros físicos.
- Determinar los niveles de peligrosidad de las curvas, estableciéndolos en tres niveles: deseable, de bajo riesgo y de alto riesgo.
- Analizar los tramos tanto en carreteras antiguas, nuevas e inclusive antes de ser construidas. Esto es posible gracias a que la información necesaria como parámetros de ingreso al programa, es fácilmente adquirida del plano taquimétrico de la carretera.
- Analizar carreteras antiguas, que fueron construidas sin atender los lineamientos de seguridad actuales de tal forma que se pueda brindar atención especial para contrarrestar los efectos de diseños inapropiados; como por ejemplo, la instalación de señalética inteligente que se adapte a las condiciones cambiantes de la carretera, en conjunto con infraestructura de comunicaciones ubicada junto a la carretera que permita informar a los usuarios de las vías sobre posibles factores de riesgo; permitiendo gestionar el tráfico vehicular para mejorar la eficiencia de uso del flujo vehicular y el uso de la carretera.
- Avalar el diseño de proyectos de diseño y construcción de carreteras, de tal forma que entidades gubernamentales puedan fácilmente determinar si

un diseño propuesto garantiza y maximiza la seguridad de los usuarios de la vía. Esto representa un importante cambio de perspectiva, que es la de priorizar la seguridad antes que el costo del proyecto.

5.1.2. DISEÑO Y LINEAMIENTOS DEL SISTEMA DE ADVERTENCIAS DE RIESGOS EN CARRETERA

En el ámbito del tráfico vehicular, la meta es fomentar un entorno más seguro para los usuarios de las vías, que muchas veces lidian, incorrectamente, con los peligros intrínsecos de éstas. Por ende, inspeccionar y calificar carreteras, permite suministrar mecanismos necesarios para identificar factores del diseño vial que inciden en la probabilidad y severidad de accidentes, permitiendo implementar sistemas de advertencia en los tramos de alto riesgo que ayuden a contrarrestar el peligro. De esta manera, un enfoque amplio e integrado puede salvar millones de vidas y mitigar los efectos a corto y largo plazo de accidentes en la vía; lo que finalmente se verá expresado en la disminución de recursos económicos invertidos en todos los ámbitos que confluyen cuando existe un accidente de tránsito.

Por tanto, la implementación de un sistema inteligente de advertencias de riesgo en carretera capaz de comunicarse con los vehículos para formar VANETs, a través de los enlaces entre RSUs y OBUs, nos permitirá soportar los siguientes criterios:

- Advertir al conductor sobre la presencia de una curva y la velocidad a la cual deberá circular en este tramo. Bajo esta perspectiva nuestro enfoque se posiciona como un asistente de manejo que permite conocer con suficiente anterioridad (distancia mínima "A" de aviso antes de una curva, recordar [Sección 3.1](#)) la presencia de una curva peligrosa.
- Informar sobre aspectos importantes de la carretera como pudieran ser: embotellamientos, estados climáticos, derrumbes, obstáculos, entre otros. Mediante un proceso de simbiosis entre las RSUs y las OBUs de los vehículos, es posible compartir información de forma bidireccional mientras los vehículos transitan por un tramo que tiene cobertura de la RSU. Este proceso permite que los vehículos, que circulan en un sentido de la carretera,

compartan información sobre la situación de la carretera (en el caso de que el conductor vea alguna anomalía) hacia la [RSU](#) y, ésta pueda compartir esta información con los vehículos que transitan en el otro sentido de la vía y no conocen de posibles problemas suscitados más adelante, en la vía.

- Compartir información sobre eventos de emergencia, como por ejemplo, un accidente en la carretera. En estos casos la información del accidente puede ser compartida, por parte de un vehículo, hacia la [RSU](#) y ésta, a su vez, compartirla con el resto de vehículos que circulan hacia el lugar del siniestro. Estos vehículos, con esta información, pueden tomar las debidas precauciones para disminuir su velocidad y también para dar paso a las entidades de emergencia (ambulancias) y agentes de tránsito que acuden al evento y necesitan llegar lo más pronto posible al lugar del suceso.
- Conectarse con otros tipos de infraestructuras de comunicaciones como pudieran ser las radiobases celulares. Los equipos de [RSUs](#) escogidos para nuestro propuesta ([Sección 1.2](#)) tienen la opción de comunicación [C-V2X](#), es decir son susceptibles de comunicarse con radio bases celulares (LTE y 5G). Cuando esta conexión sean posible, toda la información (indicada en los ítems anteriores) entregada por parte de los vehículos a las [RSUs](#), podrá ser enviada a la nube para su procesamiento y que pueda estar disponible en tiempo real para el resto de conductores que tienen conexión a Internet y que desean conocer el estado de la vías por la que están o van circular.

5.1.3. SISTEMAS DE ADVERTENCIAS DE RIESGOS DENTRO DEL VEHÍCULO

La propuesta de nuestro sistema de advertencia en carretera, contempla el análisis y disposición de los actuadores para un subsistema multi-modal que permita advertir al conductor sobre los diferentes problemas de la carretera y sobre todo de las curvas peligrosas próximas en su trayecto.

5.2. RECOMENDACIONES

En el ámbito del tráfico vehicular, la meta es crear un entorno más seguro en vez de designar la responsabilidad de la seguridad a los usuarios. Por ello, es indispensable armar marcos reglamentarios y entidades reguladoras como las que constan en [23] para garantizar el funcionamiento de éstos sistemas, sobre todo con vistas hacia el futuro donde los vehículos vendrán con toda esta tecnología incorporada.

Una de las ventajas de las [VANET](#) es que no requieren necesariamente de infraestructura fija que brinde cobertura de red ya que sus usuarios son nodos que forman conexiones Ad-Hoc cuando sus equipos se encuentran dentro de rango. Por esto, no incurre costos en la transmisión de datos, pero las entidades que regulan las carreteras pueden optar por [RSUs](#) con acceso al internet para maximizar la seguridad en puntos críticos de la infraestructura, tal como semáforos y señalética vial previa a zonas consideradas peligrosas. Recomendamos que las compañías de telecomunicaciones agreguen valor al tema, ya que redes como las de Movistar y Claro cubren gran parte de las carreteras del Ecuador e incorporar tecnología celular, que permitirá extender el rango de cobertura de 1 km presente en [DSRC](#) a varios kilómetros, por medio de la nube de internet con [C-V2X](#). Bajo esta perspectiva nuestra propuesta amplía los horizontes [21].

Las recomendaciones de la [Sección 2.2](#) y la [Sección 3.1](#), son propuestas de diseño acorde a las normativas establecidas, por lo que la entidad competente encargada de la construcción y diseño deberá realizar un análisis más a fondo con el fin de garantizar la cobertura de las [RSUs](#), en un sector determinado. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el uso de éstos dispositivos serán únicamente como complemento a la señalética vial actual mas no como reemplazo ya que únicamente brindan funcionalidad extra.

5.3. TRABAJOS FUTUROS

Como trabajo futuro de este proyecto, está implementar una aplicación móvil como asistente de conducción a través de un agente virtual que de instrucciones de manejo y alerte sobre los potenciales riesgos y estado de la carretera. Para que

permita relacionar la información obtenida por nuestro algoritmo con un mapa de navegación satelital, con el fin de brindar al usuario información de todo el tramo de carretera con las zonas de riesgo y la velocidad de circulación que deberá mantener para contrarrestar la probabilidad de un siniestro. En este mismo campo, al obtener un mapa de navegación satelital con las curvas de riesgo incorporadas, puede ser de gran utilidad, por ejemplo para los corredores de rally poseer este tipo de información con antelación, ya que les permitirá maniobrar de mejor manera en zonas de peligro.

Otra de las proyecciones de este trabajo está en recaudar la información de todos las [RSUs](#) que estén implementados en la infraestructura vial con el fin de obtener la incidencia de accidentes de tránsito suscitados en las carreteras de nuestro país, con datos más exactos, para prestar mayor atención a estas zonas y dirigir los recursos necesarios a fin de contrarrestar esta problemática. Esta información también servirá para ampliar la aplicación móvil, para que esta considere la incidencia de accidentes entre sus parámetros de estudio.

De igual manera, se puede agregar funcionalidad a nuestra propuesta SARC, incorporando más variables de análisis, como por ejemplo distancia de visibilidad y tiempo de reacción, que son importantes cuando hablamos de seguridad vial con el propósito de robustecer la aplicación con la implementación de otros modelos matemáticos que complementen al funcionamiento de nuestro programa de mapeo de carreteras

Bibliografía

- [1] World Health Organization, “Global status report on road safety 2018,” World Health Organization, Geneva, Tech. Rep., 2018.
- [2] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos 2016, “Anuario de Transporte 2016,” Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Tech. Rep., 2016.
- [3] M. Hayashi, S. Fukuzawa, H. Ichikawa, T. Kawato, J. Yamada, T. Tsuboi, S. Matsui, and T. Maruyama, “Development of vehicular communication (WAVE) system for safety applications,” *ITST 2007 - 7th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, Proceedings*, pp. 94–98, 2007.
- [4] U.S. Department of Transportation, “Multi-Modal Intelligent Traffic Safety System (MMITSS).” [Online]. Available: https://www.its.dot.gov/research/{_}archives/dma/bundle/mmits_{_}plan.htm
- [5] M. County, “Connected Vehicles Program,” 2017. [Online]. Available: <https://www.maricopa.gov/640/Connected-Vehicles-Program>
- [6] F. Saleem and L. Head, “Safety and Mobility Advances,” *Institute of Transportation Engineers. ITE Journal*, vol. 87, no. 10, pp. 27–32, 2017. [Online]. Available: <http://search.proquest.com/docview/1954419428/?pq-origsite=primo>
- [7] B. University of California, “California Partner for Advanced Transportation California Connected Vehicle Testbed,” 2017. [Online]. Available: <https://path.berkeley.edu/research/connected-and-automated-vehicles/california-connected-vehicle-testbed>
- [8] Caltrans, “California Connected Vehicle Testbed,” 2017. [Online]. Available: <http://www.caconnectedvehicletestbed.org/index.php/>

- [9] La Ville de Montréal, “Montréal: Smart and Digital City,” LabUrbain, Montréal, Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <https://laburbain.montreal.ca/sites/villeintelligente.montreal.ca/files/montreal-strategy-smart-and-digital-city-an.pdf>
- [10] I. Pray, S. Wold, and B. Koeberlein, “Connected Vehicle CRA-DA Partnership,” Idaho DOT, Yreka, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: <http://www.westernstatesforum.org/Documents/2016/presentations/Idaho{ }KoeberleinPray{ }FINAL{ }CV{ }CRADA.pdf>
- [11] Southwest Research Institute, “Basic Infrastructure Message Development and Standards Support for Connected Vehicles Applications,” Southwest Research Institute, San Antonio, TX, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <http://www.cts.virginia.edu/wp-content/uploads/2018/12/Task3-Standards-and-Related-Activities-Whitepaper-20180425{ }Final.pdf>
- [12] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos 2017, “Anuario de Estadísticas de Transporte 2017 (2018),” Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Tech. Rep., 2017.
- [13] I. U. Rasool, Y. B. Zikria, and S. W. Kim, “A review of wireless access vehicular environment multichannel operational medium access control protocols: Quality-of-service analysis and other related issues,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, no. 5, 2017.
- [14] F. Cunha, L. Villas, A. Boukerche, G. Maia, A. Viana, R. A. Mini, and A. A. Loureiro, “Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 44, pp. 90–103, jul 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.02.017><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1570870516300580>
- [15] V. Dahiya and A. Dureja, “Vehicular Ad Hoc network – Various Challenges and Applications,” *Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities*, pp. 45–54, 2014.
- [16] A. Pachón, C. F. Nieto, and M. L. Velasco, “Behavioral Models for Typical Scenarios in Vehicular Networks: Simulation in NCTUns,”

- Sistemas y Telemática*, vol. 8, no. 15, p. 13, nov 2010. [Online]. Available: <http://biblioteca2.icesi.edu.co/cgi-olib/?infile=details.glu&loid=242082&rs=561573&hitno=3http://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas{ }telematica/article/view/1018>
- [17] N. Vivek, S. Srikanth, P. Saurabh, T. Vamsi, and K. Raju, "On Field Performance Analysis of IEEE 802.11p and WAVE Protocol Stack for V2V & V2I Communication," *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*, pp. 1–6, 2014.
- [18] IEC 60529, "Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Codes)," *Geneva: International Electrotechnical Commission*, vol. Ed. 2.1, pp. 1–3, 2013. [Online]. Available: <https://www.sis.se/api/document/preview/572258/http://www.dsmt.com/pdf/resources/iprating.pdf>
- [19] S. Fuentes and A. Valencia, "Estudio de las VANET para Control de los Vehiculos en las carreteras del Ecuador," Ph.D. dissertation, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, 2015.
- [20] O. Faiza, B. Lila, and G. Mourad, "The Involvement of RSUs in VANETs : Survey and Perspectives," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 3, no. 7, pp. 1–5, 2013.
- [21] 5g Americas, "5G Americas V2X Cellular Solutions," 5G Americas, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/5GA{ }V2X{ }Report{ }FINAL{ }for{ }upload-1.pdf>
- [22] F. Ordoñez, "Mecanismos multinivel para soportar Servicios Móviles basados en Computación de Nubes Esporádicas mediante la compartición de recursos en redes Ad-Hoc." Ph.D. dissertation, Universidade de Vigo, 2018.
- [23] European Parliament, "ITS-G5 technology – A Fact Sheet," European Comission, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/feedback/18167/attachment/090166e5c12a3443{ }en>

BIBLIOGRAFÍA

- [24] Unex Technology Corporation, "OBU-301E Specification," Unex Technology Corporation, Zhubei, Taiwan, Tech. Rep. 0.91, 2019.
- [25] Cohda Wireless, "Cohda Wireless MK5 OBU Specification," Cohda Wireless, North Adelaide, Australia, Tech. Rep. 1.6, 2017.
- [26] Savari, "MobiWAVE On-Board-Unit (OBU) MW1000," Savari, Tech. Rep., 2019.
- [27] DanLaw Automotive Made Smart, "AutoLink - V2X Aftermarket Safety Device," DanLaw Automotive Made Smart, Tech. Rep., 2019.
- [28] Commsignia, "ITS-OB4," Commsignia, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: https://www.commsignia.com/wp-content/uploads/2019/04/Commsignia_{ }ITS_{ }OB4_{ }ProductBrief.pdf
- [29] U.S. Department of Transportation, "Connected Vehicle Certification Testing," USDOT, Austin, Tech. Rep., 2015. [Online]. Available: <http://www.transtats.bts.gov/>
- [30] Omniair Consortium, "Omniair Testing and Certification Overview," pp. 1–3, 2019. [Online]. Available: <https://omniair.org/services/connected-vehicle-certification/>
- [31] DanLaw Automotive Made Smart, "Through Glass Integrated V2X Antenna," DanLaw, Novi, USA, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: https://www.danlawinc.com/wp-content/uploads/DS_{ }Through_{ }Glass_{ }Integrated_{ }V2X_{ }Antenna_{ }V9.pdf
- [32] U.S. Department of Transportation, "An Overview of USDOT Connected Vehicle Roadside Unit Research Activities," USDOT, Washington, Tech. Rep. May, 2017. [Online]. Available: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/34763{ }0Ahttps://trid.trb.org/view/1477652>
- [33] Federal Highway Administration Technical Support and Tasks for the Saxton Transportation Operations Laboratory, "DSRC Roadside Unit (RSU) Specifications v4.1," RSUspecs, Tech. Rep., 2016.
- [34] ETSI (European Telecommunications Standards Institute), "Intelligent Transport Systems ITS-G5 Access layer specification for

- Intelligent Transport Systems operating in the 5Ghz frequency band,” ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Antipolis - France, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi{}_en/302600{}_302699/302663/01.03.00{}_20/en{}_302663v010300a.pdf
- [35] SAE International, “Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary,” SAE International, Warrendale, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: http://www.sae.org/technical/standards/J2735{}_201603
- [36] Cohda Wireless, “Cohda Wireless MK5 RSU Specification,” Cohda Wireless, North Adelaide, Australia, Tech. Rep., 2017.
- [37] Savari, “Savari SW-2000 C-V2X Road-Side-Unit (RSU),” Savari, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: http://savari.net/wp-content/uploads/2019/01/SW2000{}_Jan2019.pdf
- [38] Commsignia, “ITS-RS4,” Commsignia, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: https://www.commsignia.com/wp-content/uploads/2019/04/Commsignia{}_ITS{}_RS4{}_ProductBrief.pdf
- [39] Savari, “Savari SW-1000 Road-Side-Unit (RSU),” Savari, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: http://savari.net/wp-content/uploads/2017/05/SW-1000{}_April2017.pdf
- [40] S. Grafling, P. Mahonen, and J. Riihijarvi, “Performance evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11p for vehicular communications,” in *2010 Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE, jun 2010, pp. 344–348. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5547184/>
- [41] J. B. Kenney, “Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1162–1182, jul 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5888501/>

- [42] R. Jiang and Y. Zhu, "Wireless Access in Vehicular Environment," in *Encyclopedia of Wireless Networks*. Dallas: Springer International Publishing, 2019, no. May, pp. 1–5. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32903-1_{_}309-1
- [43] Intelligent Transportation Systems Committee - Ieee Vehicular Technology Society, *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)— Multi-Channel Operation IEEE Vehicular Technology Society IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)— Multi-Channel Operation*. Proceedings of the IEEE, 2016, vol. 2016, no. December.
- [44] —, "IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture - Redline," *IEEE Std 1609.0-2019 (Revision of IEEE Std 1609.0-2013) - Redline*, no. April, pp. 1–219, 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8748232>
- [45] IEEE Vehicular Technology Society, "Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager," *IEEE Std 1609.1-2006*, no. October, pp. 1–71, 2006. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=1715701>
- [46] U.S. Department of Transportation, "ITS Standards Program - Fact Sheets - ITS Standards Fact Sheets," 2019. [Online]. Available: <https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/80>
- [47] IEEE Vehicular Technology Society, "IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages," *IEEE Std 1609.2-2016 (Revision of IEEE Std 1609.2-2013)*, pp. 1–240, 2016. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=7426684>
- [48] U.S. Department of Transportation, "Connected Vehicle Standards," USDOT, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: https://www.its.dot.gov/factsheets/pdf/ITSJPO_{_}Connected_{_}Vehicle_{_}Standards.pdf
- [49] IEEE Vehicular Technology Society, "IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Networking Services - Redline,"

- IEEE, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7873211>
- [50] —, “IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Multi-Channel Operation - Redline,” *IEEE Std 1609.4-2016 (Revision of IEEE Std 1609.4-2010)*, pp. 1–206, 2016. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7553418>
- [51] —, “IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)– Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS),” *IEEE Std 1609.11-2010*, pp. 1–62, 2010. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5692959>
- [52] —, “IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)–Identifiers,” *IEEE Std 1609.12-2019 (Revision of IEEE Std 1609.12-2016)*, pp. 1–17, 2019. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7786995>
- [53] S. Gao, A. Lim, and D. Bevly, “An empirical study of DSRC V2V performance in truck platooning scenarios,” *Digital Communications and Networks*, vol. 2, no. 4, pp. 233–244, nov 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dcan.2016.10.003><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235286481630075X>
- [54] Agencia de Regulacion y Control de las Telecomunicaciones, “Norma tecnica de espectro de uso libre y espectro para uso determinado en bandas libres,” ARCOTEL, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2018.
- [55] U.S. Department of Transportation, “Questions & Answers: About DOT’s Safety Pilot - Model Deployment,” U.S. Department of Transportation, Ann Arbor, Michigan, Tech. Rep., 2013. [Online]. Available: https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/technical_fact_sheet_model_deployment.pdf
- [56] P. Gaspar, Z. Szalay, and S. Aradi, *Highly Automated Vehicle Systems*. Budapest: BME-MOGI, 2014, no. Oc-

- tober. [Online]. Available: <http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/jarmurendszerk{ }iranyitasa{ }angol/book.html>
- [57] Y. J. Li, *An Overview of the DSRC-WAVE Technology*, 7th ed., X. Zhang and D. Qiao, Eds. Evesleigh: Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, 2011, vol. 7.
- [58] Euro-NCAP, “How To Read The Stars,” pp. 1 – 3, 2015. [Online]. Available: www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/how-to-read-the-stars/
- [59] ANCAP, “Safety Testing Explained,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ancap.com.au/safety-testing-explained>
- [60] Euro-NCAP, “The Rewards Explained,” p. 1, 2015. [Online]. Available: <http://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/>
- [61] —, “Blind Spot Monitoring,” 2010. [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/blind-spot-monitoring/>
- [62] Queensland Government, “Forward collision avoidance technology,” 2017. [Online]. Available: <https://www.tmr.qld.gov.au/Safety/Vehicle-standards-and-modifications/Vehicle-standards/Forward-collision-avoidance-technology>
- [63] Euro-NCAP, “Lane Support,” 2011. [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/lane-support/>
- [64] O. Sri-Jayantha, “Road Hazard Detection and Warning System and Method,” pp. 1–21, 2014.
- [65] U. Zakir, A. Hamid, and K. Pushkin, “Current Collision Mitigation Technologies for Advanced Driver Assistance Systems - A Survey,” *Perintis eJournal*, vol. 6, no. 2, pp. 78–90, 2016.
- [66] Euro-NCAP, “Speed Alert,” 2019. [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/speed-alert/>

- [67] C. Catten and S. McClellan, "System and Method for Alerting Drivers to Road Conditions," pp. 1–22, 2012.
- [68] Euro-NCAP, "Autonomous Emergency Braking," p. 5, 2014. [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/autonomous-emergency-braking/>
- [69] —, "Attention Assist," 2015. [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/attention-assist/>
- [70] —, "eCall," 2010. [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/ecall/>
- [71] J. Breu, A. Brakemeier, and M. Menth, "A quantitative study of Cooperative Awareness Messages in production VANETs," *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2014, no. 1, pp. 1–18, 2014.
- [72] C. T. Barba, M. A. Mateos, P. R. Soto, A. M. Mezher, and M. A. Igartua, "Smart city for VANETs using warning messages, traffic statistics and intelligent traffic lights," in *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, jun 2012, pp. 902–907. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6232229/>
- [73] Euro-NCAP, "Euro NCAP Advanced Rewards," 2016. [Online]. Available: <http://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/euro-ncap-advanced-rewards/2011-ford-driver-alert/>
- [74] S. R. Azimi, G. Bhatia, R. R. Rajkumar, and P. Mudalige, "Vehicular Networks for Collision Avoidance at Intersections," *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 406–416, 2011.
- [75] H. de Rosario, M. Louredo, I. Díaz, A. Soler, J. J. Gil, J. S. Solaz, and J. Jornet, "Efficacy and feeling of a vibrotactile Frontal Collision Warning implemented in a haptic pedal," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 13, no. 2, pp. 1–12, mar 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2009.11.003https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369847809000771>

- [76] M. Ahtamad, C. Spence, C. Ho, and R. Gray, "Warning Drivers about Impending Collisions Using Vibrotactile Flow," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2016.
- [77] F. S. M. Zuki and S. Sulaiman, "Using multimodal warning as a method of optimizing an in-vehicle warning system," *Proceedings - 2016 4th International Conference on User Science and Engineering, i-USEr 2016*, pp. 1–4, 2017.
- [78] Y. Gaffary and A. Lécuyer, "The Use of Haptic and Tactile Information in the Car to Improve Driving Safety: A Review of Current Technologies," *Frontiers in ICT*, vol. 5, no. MAR, pp. 1–11, mar 2018. [Online]. Available: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fict.2018.00005/full>
- [79] H. Rosario Martínez, J. Solaz Sanahuja, E. Signes i Pérez, A. Soler Valero, N. Palomares Olivares, J. Jornet Vidal, M. Dominguis, J. Gil Nobajas, I. Díaz Garmendia, and M. Echeverría Larrañaga, "Tecnologías hápticas para mejorar la seguridad en la conducción," *Revista de biomecánica*, no. 56, pp. 7–10, 2011.
- [80] W. Chang, W. Hwang, and Y. G. Ji, "Haptic Seat Interfaces for Driver Information and Warning Systems," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 27, no. 12, pp. 1–15, dec 2011. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447318.2011.555321>
- [81] V. Duthoit, J.-M. Sieffermann, E. Enregle, and D. Blumenthal, "Perceived Intensity of Vibrotactile Stimuli - Do You Clothes Really Matter," in *Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications*, 1st ed., ser. EuroHaptics, F. Bello, H. Kajimoto, and Y. Visell, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, vol. 9774, no. 37, pp. 229–239. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-42321-0>
- [82] E. S. Ege, F. Cetin, and C. Basdogan, "Vibrotactile feedback in steering wheel reduces navigation errors during GPS-guided car driving," *2011 IEEE World Haptics Conference, WHC 2011*, pp. 1–4, 2011.

- [83] J. Chuna, I. Leeb, G. Parkb, J. Seob, S. Choi, and S. H. Hana, "Efficacy of haptic blind spot warnings applied through a steering wheel or a seatbelt," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 21, pp. 1–11, nov 2013. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369847813000892>
- [84] Traffic And Parking Control, "Curve warning solutions," TAPCO, Brown Deer, Tech. Rep., 2017.
- [85] B. Willborn and E. Olson, "Slow Moving Object Road Warning System," pp. 1–16, 2018.
- [86] I. Turnbull, Z. Ye, and D. Veneziano, "Speed impacts of an icy curve warning system," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 93–101, mar 2014. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-its.2012.0110>
- [87] S. Hallmark, *Toolbox of Countermeasures for Rural Two-Lane Curves*, 1st ed. Iowa: Iowa State University, 2013, no. October. [Online]. Available: https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/rural{}_two-lane{}_curves{}_toolbox{}_w{}_cvr2.pdf
- [88] T. Mangel, O. Klemp, and H. Hartenstein, "5.9 GHz inter-vehicle communication at intersections: a validated non-line-of-sight path-loss and fading model," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011, no. 1, p. 182, dec 2011. [Online]. Available: <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2011/1/182https://jwcn-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2011-182>
- [89] T. M. Kwon, "Advanced LED Warning Signs for Rural Intersections Powered by Renewable Energy," Local Road Research Board, Minnesota, Tech. Rep. December 2010, 2010.
- [90] INEN, "Reglamento Tecnico Ecuatoriano - Señalización Vial 1 - Señalización Vertical," INEN, Quito, Tech. Rep. Señalización Vial, 2011. [Online]. Available: <https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/>

- LOTAIP2015{ }reglamento-tecnico-ecuadoriano-rte-inen-004-1-2011.pdf
- [91] N. J. Garber and L. a. Hoel, *Traffic and Highway Engineering*, 3rd ed. California: Thomson Learning, 2009.
- [92] Dirección General de Servicios Técnicos, “Manual De Proyecto Geométrico De Carreteras 2018,” Ciudad de Mexico, p. 584, 2018. [Online]. Available: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual-pg/MPGC{ }2018{ }310718.pdf>
- [93] Ministerio de Transporte y Obras Publicas, “Norma para estudios y diseños viales Vol.2-Libro A,” Ministerio de Transporte y Obras Publicas, Quito, Tech. Rep., 2013. [Online]. Available: <http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013{ }Manual{ }NEVI-12{ }VOLUMEN{ }2A.pdf>
- [94] S. Phani, R. Veer, S. Gupte, and J. Juremalani, “A Review of Literature on Geometric Design of Highway,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 1–4, 2018.
- [95] American Association of State Highway and Transportation Officials, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 6th ed., AASHTO, Ed. Washington DC: AASHTO, 2011.
- [96] A. Aram, “Effective Safety Factors on Horizontal Curves of Two-lane Highways,” *Journal of Applied Sciences*, vol. 10, no. 22, pp. 1–10, 2010.
- [97] W. H. Schneider IV, K. Zimmerman, D. Van Boxel, and S. Vavilikolanu, “Bayesian analysis of the effect of horizontal curvature on truck crashes using training and validation data sets,” *Transportation Research Record*, pp. 41–46, 2009.
- [98] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Roadside Design Guide*, 4th ed., AASHTO, Ed. Washington DC: AASHTO, 2011.
- [99] Australian Road Assessment Program (AusRAP), “Star Rating - Australias National Network of Highways,” *Australian Automobile Association*,

BIBLIOGRAFÍA

vol. 2, pp. 1–57, sep 2013. [Online]. Available: <http://journals.rcni.com/doi/10.7748/ns.2.49.17.s33>

- [100] U.S. Department of Transportation, “Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application,” National Highway Traffic Safety Administration, Tech. Rep. August, 2014. [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/V2V/Readiness-of-V2V-Technology-for-Application-812014.pdf>

Apéndice A

ALGORITMO

```
1 # Edgar A. Mendez (0301337747)
2   #Alexander Medina
3 # Sistema de Advertencia de Riesgos en Carretera (SARC)
4
5 from numpy import sqrt, where
6 from pandas import read_csv, DataFrame
7 from os import getcwd, listdir
8 from reportlab.lib.pagesizes import A4, landscape
9 from reportlab.platypus import SimpleDocTemplate, Table,
10  TableStyle, Paragraph, Spacer, Image
11 from reportlab.lib.styles import getSampleStyleSheet,
12  ParagraphStyle
13 from reportlab.lib import colors
14 from reportlab.lib.units import cm
15 from time import strftime
16 from utm import to_latlon
17 from simplekml import Kml, Color
18 from tkinter import Tk, messagebox, Label, Entry, Button
19 from tkinter.ttk import Combobox
20
21 def SARC():
22     nombreArchivo = comboArchivo.get()
23     infoMapa = read_csv(nombreArchivo)
24     longitudC, latitudC = to_latlon(infoMapa["PCE"],
25     infoMapa["PCN"],17,'M')
26     longitudT, latitudT = to_latlon(infoMapa["PTE"],
27     infoMapa["PTN"],17,'M')
28     infoMapa["Longitud C"] = longitudC
29     infoMapa["Longitud T"] = longitudT
30     infoMapa["Latitud C"] = latitudC
31     infoMapa["Latitud T"] = latitudT
32     tiempo = strftime("%Y%m%d-%H%M%S")
33     tablaResultados = DataFrame()
34
35     velocidad = int(textoVelocidad.get())
36     zonaTipo = comboZona.get()
37     if zonaTipo == "Urbana":
38         zona = 4
39     elif zonaTipo == "Suburbana":
40         zona = 6
41     elif zonaTipo == "Rural Plana":
42         zona = 8
```

APÉNDICE A. ALGORITMO

```

39     elif zonaTipo == "Rural Montañosa":
40         zona = 10
41
42         friccionReal = -((0.002)*velocidad) + (0.564)
43         radioReal = infoMapa["Radio Real"]
44         peralteReal = infoMapa["Peralte Real"]*0.01
45         velocidadSegura = sqrt(127 * radioReal * (
46         friccionReal + peralteReal))
47         radioMinimo = (velocidad**2) / (127 * (friccionReal +
48         peralteReal))
49
50         infoMapa["Radio Mínimo"] = radioMinimo
51         infoMapa["Velocidad Segura"] = velocidadSegura
52         infoMapa["Condición Radio"] = where(radioReal >
53         radioMinimo,1,0)
54         infoMapa["Condición Peralte"] = where(infoMapa["
55         Peralte Real"] <= zona,1,0)
56         infoMapa["Condición Velocidad"] = where(velocidad <
57         velocidadSegura,1,0)
58         infoMapa["Calificación"] = infoMapa["Condición Radio"
59         ] \
60         + infoMapa["Condición Velocidad"] \
61         + infoMapa["Condición Peralte"]
62         tablaResultados = infoMapa[["Curva","Radio Real","
63         Radio Mínimo","Condición Radio", \
64         "Peralte Real","Condición
65         Peralte", "Velocidad Segura", \
66         "Condición Velocidad"],"
67         Calificación"]].round(2)
68
69         reporte = SimpleDocTemplate("Reporte " +
70         nombreArchivo[: -4] + "-" + tiempo + ".pdf", pagesize=
71         landscape(A4))
72         style = getSampleStyleSheet()
73         contenidoReporte = []
74         contenidoReporte.append(Paragraph("Resultados del
75         SARC", style['Title']))
76         infoTabla = [tablaResultados.columns.astype(str).
77         tolist()] + tablaResultados.values.tolist()
78         tablaReporte = Table(infoTabla)
79         tablaReporte.setStyle(TableStyle([('BOX', (0,0),
80         (-1,-1), 2, colors.black),
81         ('INNERGRID', (0,0),
82         (-1,-1), 0.25, colors.black),
83         ('ALIGN', (0,0), (-1,-1),
84         'CENTER'),
85         ('VALIGN', (0,0), (-1,-1),
86         'MIDDLE'),
87         ('FONTSIZE', (0,0),
88         (-1,-1), 10)
89         ]))
90         contenidoReporte.append(tablaReporte)
91         reporte.build(contenidoReporte)
92
93         mapaGenerado = Kml()
94         for index, row in infoMapa.iterrows():
95             punto = mapaGenerado.newpoint()

```

```

78     punto.name = row["Curva"].astype(str) + "-C"
79     punto.coords = [(row["Longitud C"].astype(float),
row["Latitud C"].astype(float))]
80     if row["Calificación"] <= 1:
81         punto.style.iconstyle.color = Color.red
82         punto.style.iconstyle.scale = 2
83     elif row["Calificación"] == 2:
84         punto.style.iconstyle.color = Color.yellow
85         punto.style.iconstyle.scale = 1.5
86     elif row["Calificación"] == 3:
87         punto.style.iconstyle.color = Color.green
88
89     for index, row in infoMapa.iterrows():
90         punto = mapaGenerado.newpoint()
91         punto.name = row["Curva"].astype(str) + "-T"
92         punto.coords = [(row["Longitud T"].astype(float),
row["Latitud T"].astype(float))]
93         if row["Calificación"] <= 1:
94             punto.style.iconstyle.color = Color.red
95             punto.style.iconstyle.scale = 2
96         elif row["Calificación"] == 2:
97             punto.style.iconstyle.color = Color.yellow
98             punto.style.iconstyle.scale = 1.5
99         elif row["Calificación"] == 3:
100             punto.style.iconstyle.color = Color.green
101     mapaGenerado.save("Mapa " + nombreArchivo[:-4] + "-"
+ tiempo + ".kml")
102
103 def clicked():
104     SARC()
105     messagebox.showinfo("SARC", "Análisis ejecutado
correctamente. Revisar informe y mapa ubicados en " +
path)
106
107
108 if __name__ == '__main__':
109     listaDeCSVs = []
110     path = getcwd()
111     files = listdir(path)
112     for file in files:
113         if file.endswith('.csv'):
114             listaDeCSVs.append(file)
115
116     window = Tk()
117     window.geometry('400x100')
118     window.title("SARC")
119
120     labelArchivo = Label(window, text="Escoger archivo: "
)
121     labelArchivo.grid(column=0, row=1)
122     comboArchivo = Combobox(window)
123     comboArchivo['values'] = listaDeCSVs
124     comboArchivo.current(0)
125     comboArchivo.grid(column=1, row=1)
126
127     labelZona = Label(window, text='Seleccionar zona: ')
128     labelZona.grid(column=0, row=2)

```

```
129     comboZona = Combobox(window)
130     comboZona['values'] = ("Urbana", "Suburbana","Rural
131     Plana", "Rural Montañosa")
132     comboZona.current(0)
133     comboZona.grid(column=1, row=2)
134
135     labelVelocidad = Label(window, text='Ingresar
136     velocidad directriz en km/h: ')
137     labelVelocidad.grid(column=0, row=3)
138     textoVelocidad = Entry(window)
139     textoVelocidad.grid(column=1, row=3)
140
141     botonAnalizar = Button(window, text='Analizar', command
142     =clicked)
143     botonAnalizar.grid(column=1, row=5)
144
145     window.mainloop()
```

Código A.1: SARC.py

Apéndice B

MAPA TAQUIMÉTRICO

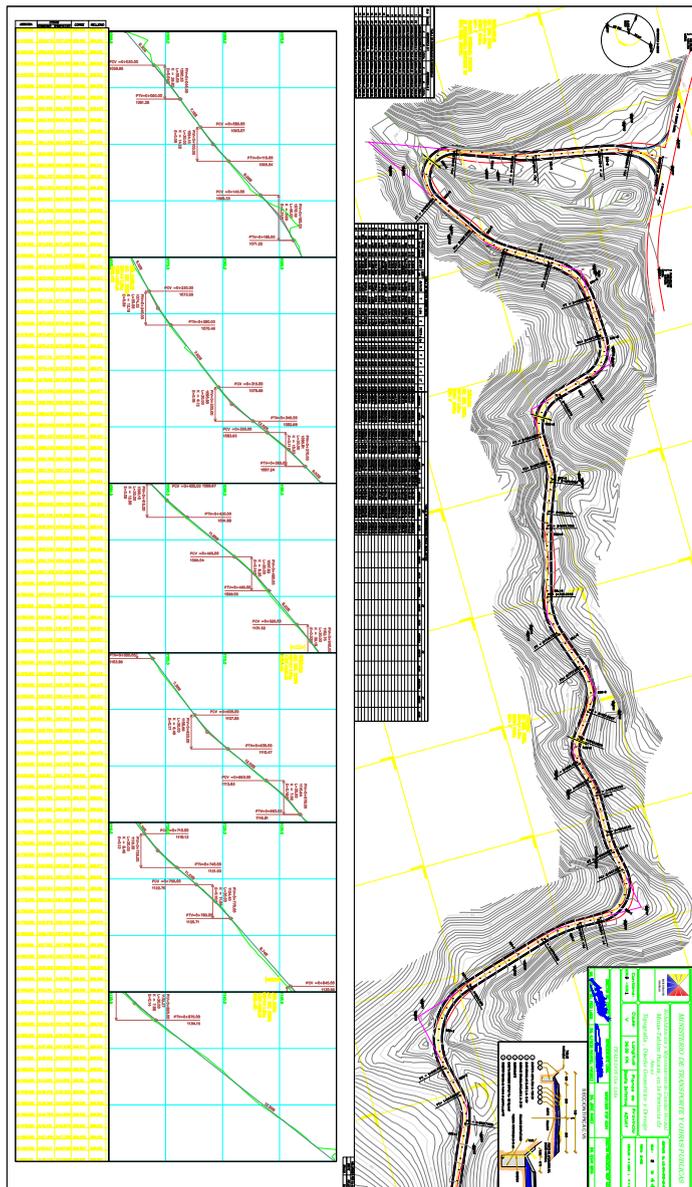


Figura B.1: Vía a Pucará - Tramo 1.
Fuente: MTOP del Azuay