

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN
TRANSPORTES



MODELO PREDICTIVO MULTIVARIABLE DE LA VELOCIDAD DE
OPERACIÓN EN CURVAS HORIZONTALES SEGÚN
RETROREFLECTIVIDAD Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS,
MOQUEGUA - 2026

TESIS

Presentada por:

Bach. Dylan Julio Moscoso Raurau

ORCID: 0009-0009-5012-5518

Asesor:

Dr. Osmar Cuentas Toledo

ORCID: 0000-0003-3612-1309

Para obtener el grado académico de:
MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN
TRANSPORTES



MODELO PREDICTIVO MULTIVARIABLE DE LA VELOCIDAD DE
OPERACIÓN EN CURVAS HORIZONTALES SEGÚN
RETROREFLECTIVIDAD Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS,
MOQUEGUA - 2026

TESIS

Presentada por:

Bach. Dylan Julio Moscoso Raurau

ORCID: 0009-0009-5012-5518

Asesor:

Dr. Osmar Cuentas Toledo

ORCID: 0000-0003-3612-1309

Para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN
TRANSPORTES

Tesis

**“MODELO PREDICTIVO MULTIVARIABLE DE LA VELOCIDAD DE
OPERACIÓN EN CURVAS HORIZONTALES SEGÚN RETRORREFLECTIVIDAD
Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, MOQUEGUA - 2026”**

Presentada por:

Bach. Dylan Julio Moscoso Raurau

**Tesis sustentada y aprobada el 14 de agosto del 2026; ante el siguiente jurado
examinador:**

PRESIDENTE: Dr. Anibal Juan Espinoza Aranciaga

SECRETARIO: Mtro. Rolando Gonzalo Salazar Calderón Juárez

VOCAL: Dr. Oscar Walther Novoa Castillo

ASESOR: Dr. Osmar Cuentas Toledo

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo Dylan Julio Moscoso Raurau, en calidad de: Maestrando de la maestría en Ingeniería civil con mención en Transportes de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 48496515.

Soy autor de la tesis titulada: **MODELO PREDICTIVO MULTIVARIABLE DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN CURVAS HORIZONTALES SEGÚN RETRORREFLECTIVIDAD Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, MOQUEGUA - 2026**, con asesor: Dr. Osmar Cuentas Toledo.

DECLARO BAJO JURAMENTO

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de maestro en ingeniería civil con mención en transportes, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 09% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedora de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: Tacna, 14 de agosto del 2026



.....
Nombres y apellidos : Dylan Julio Moscoso Raurau

DNI : 48496515

DEDICATORIA

Dedico esta obra a mis padres Grissel y Julio, que como raíces de árboles fuertes sus tallos nunca se torcieron.

A mis hermanos Tracy y Sayyid, mis mejores amigos, mi sangre.

A mi Deisy, mi amor, mi valiente compañera.

A mi maestro de Taekwondo Luis Salas, formador de disciplina, un segundo padre.

AGRADECIMIENTOS

Allah, creador del mundo, que con sus noventa y nueve nombres bendice nuestros corazones con fe.

Un especial agradecimiento al doctor Osmar Cuentas Toledo, por aceptar la dirección de esta investigación, quién con su experiencia, conocimiento y paciencia permitió la conclusión satisfactoria de esta tesis.

A los ingenieros Julio Moscoso Valenzuela y William Paz Malca por la asistencia técnica brindada durante el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PÁGINA DEL JURADO	iv
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD.....	v
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA	3
1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Formulación del Problema	7
1.2.1. <i>Problema Principal.....</i>	<i>7</i>
1.2.2. <i>Problemas Secundarios.....</i>	<i>7</i>
1.3. Justificación del Problema	8
1.3.1. <i>Justificación Social</i>	<i>8</i>
1.3.2. <i>Justificación Metodológica</i>	<i>8</i>
1.3.3. <i>Justificación Práctica</i>	<i>9</i>
1.4. Objetivos	10
1.4.1. <i>Objetivo General.....</i>	<i>10</i>
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	<i>10</i>
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL	11
2.1. Antecedentes del Problema	11
2.1.1. <i>Antecedentes Internacionales</i>	<i>11</i>
2.1.2. <i>Antecedentes Nacionales.....</i>	<i>13</i>

2.2. Normativa Vigente	15
2.2.1. <i>Normativa Internacional.....</i>	15
2.2.2. <i>Normativa Nacional.....</i>	16
2.3. Definición de Conceptos Básicos.....	17
2.3.1. <i>Identificación de la Variable Independiente N°1</i>	17
2.3.2. <i>Identificación de la Variable Independiente N°2.....</i>	18
2.3.3. <i>Identificación de la Variable Dependiente</i>	19
2.3.4. <i>Tabla Resumen de Variables, Dimensiones e Indicadores</i>	21
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO	22
3.1. Descripción de la Investigación Aplicada	22
3.1.1. <i>Tipo de Investigación</i>	22
3.1.2. <i>Nivel de Investigación.....</i>	22
3.1.3. <i>Justificación del Enfoque Aplicado.....</i>	22
3.2. Diseño del Proyecto.....	23
3.2.1. <i>Etapas del Proyecto</i>	23
3.2.2. <i>Herramientas y/o software utilizado.....</i>	29
3.3. Evaluación Técnica y Factibilidad.....	30
3.3.1. <i>Análisis de la Estructura del Pavimento.....</i>	31
3.3.2. <i>Modelado Estructural</i>	31
3.3.3. <i>Simulación de Impacto Ambiental</i>	33
3.4. Planificación y Ejecución.....	33
3.4.1. <i>Cronograma de Actividades.....</i>	33
3.4.2. <i>Asignación de Recursos</i>	34
3.4.3. <i>Costos y Financiamiento.....</i>	35
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1. Desarrollo del Proyecto y Validación del Diseño	36
4.1.1. <i>Análisis Exploratorio</i>	36

4.1.2.	<i>Desarrollo del Modelo Predictivo Multivariable</i>	37
4.1.3.	<i>Diagnóstico del Modelo Predictivo</i>	38
4.1.4.	<i>Validación del Modelo Predictivo</i>	42
4.2.	Análisis de Impacto, Beneficios y Comparación con Casos Similares	43
4.3.	Limitaciones del Estudio y Mejoras Identificadas	46
4.4.	Descripción de la Solución Propuesta y su Implementación	46
4.5.	Evaluación de Costos, Sostenibilidad y Viabilidad a Largo Plazo	51
CONCLUSIONES		55
RECOMENDACIONES		59
REFERENCIAS		61
APÉNDICES		66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Infraestructura vial de la IIRSA Sur subtramo 5C	4
Tabla 2 Valores mínimos del coeficiente de retrorreflectividad	18
Tabla 3 Ecuaciones de Fitzpatrick	20
Tabla 4 Tabla resumen de variables	21
Tabla 5 Estructura del pavimento en la IIRSA Sur subtramo 5C	31
Tabla 6 Evaluación de riesgos.....	33
Tabla 7 Presupuesto de investigación	35
Tabla 8 Resultados de la prueba de Breusch - Pagan.....	40
Tabla 9 Resultados de la prueba de Shapiro – Wilk	41
Tabla 10 Resultados de la validación cruzada k – Fold (k =5)	43
Tabla 11 Niveles de seguridad del criterio II de Lamm.....	48
Tabla 12 Clasificación de curvas por nivel de riesgo.....	48
Tabla 13 Plan de intervención para el mantenimiento de la señalización vial.....	49
Tabla 14 Formatos de salida sugeridos	51
Tabla 15 Costo del diagnóstico del plan de intervención	51
Tabla 16 Sostenibilidad técnica.....	52
Tabla 17 Factores que afectan la viabilidad	53
Tabla 18 Horizonte de planificación	54
Tabla 19 Fuentes potenciales de financiamiento.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 IIRSA Sur tramo 5 - Corredor Vial Interoceánico Sur	3
Figura 2 Tipos de accidente de tránsito por consecuencia.....	5
Figura 3 Accidente de tránsito en curva horizontal	6
Figura 4 Retrorreflectancia de las marcas en el pavimento	17
Figura 5 Regresión lineal radio vs velocidad de operación	26
Figura 6 Regresión lineal pendiente promedio vs velocidad de operación.....	26
Figura 7 Regresión lineal retrorreflectividad promedio vs velocidad de operación	27
Figura 8 Pistola radar de velocidad.....	29
Figura 9 Retrorreflectómetro	30
Figura 10 Cronograma de actividades	34
Figura 11 Correlaciones de Pearson de variables predictoras con la velocidad de operación	36
Figura 12 Análisis de multicolinealidad – VIF por variable.....	38
Figura 13 Gráfico de residuos vs valores predichos	39
Figura 14 Gráfico Q-Q de residuales del modelo predictivo	41
Figura 15 Histograma de residuos	42
Figura 16 Flujo de implementación del sistema de monitoreo propuesto	50
Figura 17 Medición de retrorreflectividad en la línea de eje	69
Figura 18 Configuración del radar de velocidad.....	69

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1 Matriz de consistencia.....	66
Apéndice 2 Formato de recolección de datos para retrorreflectividad.....	67
Apéndice 3 Formato de recolección de datos de velocidad de punto	68
Apéndice 4 Panel fotográfico	69

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la influencia de la retrorreflectividad de las marcas viales (eje y borde) y la geometría de la vía (radio y pendiente) en la velocidad de operación nocturna (V85) en curvas horizontales de la carretera IIRSA Sur, subtramo 5C, Moquegua. Se realizó un estudio de tipo aplicado, con un nivel explicativo. La muestra estuvo constituida por 82 curvas horizontales, seleccionadas mediante un censo del tramo de estudio. Se midieron en campo la velocidad de operación nocturna (V85), la retrorreflectividad de las marcas viales, y se recopilieron los datos geométricos (radio y pendiente). Se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple, previa verificación de supuestos y validación mediante validación cruzada k-fold (k=5). El modelo final obtenido fue: $V_{85} = 41.2354 + 0.0176 \times Radio - 0.5229 \times Pendiente + 0.0874 \times RL_Promedio$. El modelo presentó un coeficiente de determinación ajustado $R^2 = 0.7970$, indicando que las tres variables predictoras explican el 79.70% de la variabilidad en la velocidad de operación nocturna. La validación cruzada arrojó un R^2 promedio de 0.7396 ± 0.1485 , confirmando la robustez y generalización del modelo. Se concluye que la retrorreflectividad de las marcas viales influye positiva y significativamente en la velocidad de operación nocturna ($\beta_3 = 0.0874$, $p < 0.05$). El radio influye positivamente ($\beta_1 = 0.0176$) y la pendiente influye negativamente ($\beta_2 = -0.5229$). El modelo desarrollado es estadísticamente robusto, cumple con todos los supuestos de regresión y constituye una herramienta práctica para la priorización de intervenciones de mantenimiento de señalización horizontal y la gestión de la seguridad vial nocturna en la IIRSA Sur.

Palabras clave: Velocidad de operación, retrorreflectividad, parámetros geométricos, modelo de regresión múltiple, seguridad vial nocturna.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the influence of pavement marking retroreflectivity (centerline and edge line) and road geometry (radius and grade) on nighttime operating speed (V85) on horizontal curves of the IIRSA South Highway, subsection 5C, Moquegua. An applied study with an explanatory level was conducted. The sample consisted of 82 horizontal curves, selected through a census of the study segment. Nighttime operating speed (V85), pavement marking retroreflectivity were measured in the field, and geometric data (radius and slope) were collected. A multiple linear regression model was developed, after verifying assumptions and validating through k-fold cross-validation (k=5). The final model obtained was: $V_{85} = 41.2354 + 0.0176 \times \text{Radius} - 0.5229 \times \text{Slope} + 0.0874 \times \text{RL_Average}$. The model presented an adjusted coefficient of determination $R^2 = 0.7970$, indicating that the three predictor variables explain 79.70% of the variability in nighttime operating speed. Cross-validation yielded an average $R^2 = 0.7396 \pm 0.1485$, confirming the model's robustness and generalizability. It is concluded that pavement marking retroreflectivity has a positive and significant influence on nighttime operating speed ($\beta_3 = 0.0874$, $p < 0.05$). Radius has a positive influence ($\beta_1 = 0.0176$), and slope has a negative influence ($\beta_2 = -0.5229$). The developed model is statistically robust, satisfies all regression assumptions, and constitutes a practical tool for prioritizing horizontal signage maintenance interventions and managing nighttime road safety on the IIRSA South Highway.

Keywords: Operating speed, retroreflectivity, geometric parameters, multiple regression model, nighttime road safety.

INTRODUCCIÓN

La seguridad vial en carreteras, especialmente en conducción nocturna, depende críticamente de la percepción y el tiempo de reacción del conductor. Las curvas horizontales representan puntos de riesgo particular, donde la geometría de la vía impone restricciones a la velocidad. Dentro de la seguridad vial, las marcas en el pavimento son un elemento clave para guiar al conductor y comunicar de manera efectiva el trazado de la vía. La retrorreflectividad evalúa la eficiencia con que las marcas en la carretera reflejan la luz de los faros de regreso a su origen. Dicha eficiencia se mide a través del coeficiente de luminancia retrorreflejada (RL, en mcd/lux/m^2), determinado por el cociente entre la luminancia (el brillo que llega al conductor) y la iluminancia (la luz que incide sobre la marca desde los faros)(Li et al., 2024).

La falta de iluminación en las carreteras limita severamente la visibilidad nocturna, impidiendo a los conductores identificar claramente los carriles. Esta baja percepción de las marcas viales compromete la seguridad y la fluidez del tráfico (Guan et al., 2024). En ese sentido podemos afirmar que, la prevención de accidentes depende en gran medida de la visibilidad de los límites laterales de la calzada, puesto que, en un entorno vial oscuro, la presencia de marcas viales retrorreflectantes mejoran la visibilidad y facilitan la seguridad vial (Obeng et al., 2021).

Recientemente, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) publicó una nueva norma que estableció estándares nacionales para los niveles mínimos de RL para las líneas de marcado longitudinal en todas las carreteras dependiendo de los límites de velocidad (Idris et al., 2024), y es aquí donde surge un parámetro

fundamental en la conducción nocturna que es la velocidad de operación. La velocidad de operación del vehículo es un factor crucial para la seguridad vial, ya que afecta estrictamente la ocurrencia y gravedad de los accidentes. Por lo general, el percentil 85 de las distribuciones de velocidad de operación (es decir, V85) en condiciones de tráfico de flujo libre es ampliamente aceptado como un valor base de evaluación de consistencia para la porción homogénea de las carreteras existentes (Martinelli et al., 2023). Sin embargo, en el Perú se suele utilizar las ecuaciones de Fitzpatrick para estimar de forma aproximada la velocidad de operación en curvas horizontales, las cuales están contempladas en el Manual de Diseño Geométrico del MTC (DG-2018) y las cuales tienen una aplicabilidad limitada.

Las velocidades de operación a veces pueden ser más altas que los límites de velocidad establecidos y podrían ser un factor determinante en la generación de accidentes de tráfico (Khaddar et al., 2023), por ello comprender el impacto de la geometría de la carretera en las velocidades de operación nocturna y mejorar la capacidad de predicción de los modelos de velocidad de operación ha sido una preocupación crucial tanto para investigadores como para profesionales (Said et al., 2023), por lo tanto se puede inferir que, el modelado preciso de las velocidades de operación nocturna de los vehículos en curvas horizontales en carreteras rurales de una sola calzada es vital para mejorar la seguridad del conductor (Datta, 2025).

Específicamente en el estudio de la velocidad de operación en curvas horizontales, el radio se ha establecido como la variable estadísticamente más significativa en estudios sobre los factores que afectan la velocidad de operación en curvas de todo tipo de carreteras (Vertlberg et al., 2025), por lo tanto, se hace necesario un estudio integral que, mediante el análisis de datos, busque cuantificar la influencia real de la retrorreflectividad de las marcas viales, valide los modelos de predicción de velocidad, evalúe la consistencia del diseño y determine el peso de la geometría en la velocidad de operación nocturna en curvas horizontales.

Asimismo, en la tabla 1 se detalla la subdivisión del subtramo 5C en sectores.

Tabla 1

Infraestructura vial de la IIRSA Sur subtramo 5C

Sectores	Ruta	Inicio	Final	Longitud (Km)	Departamento
Ilo - Repartición	PE-36	0+000	44+497	44.497	Moquegua
Repartición - Dv. Moquegua	PE-1S	1146+763	1184+683	37.920	
Dv. Moquegua - Torata	PE-36A	0+000	28+174	28.174	
Torata - Humajalso	PE-36A	28+174	99+324	71.150	
Binacional	PE-36A	99+324	115+640	16.316	
Humajalso - Pte. Gallatini	PE-36B	97+500	157+212	59.712	

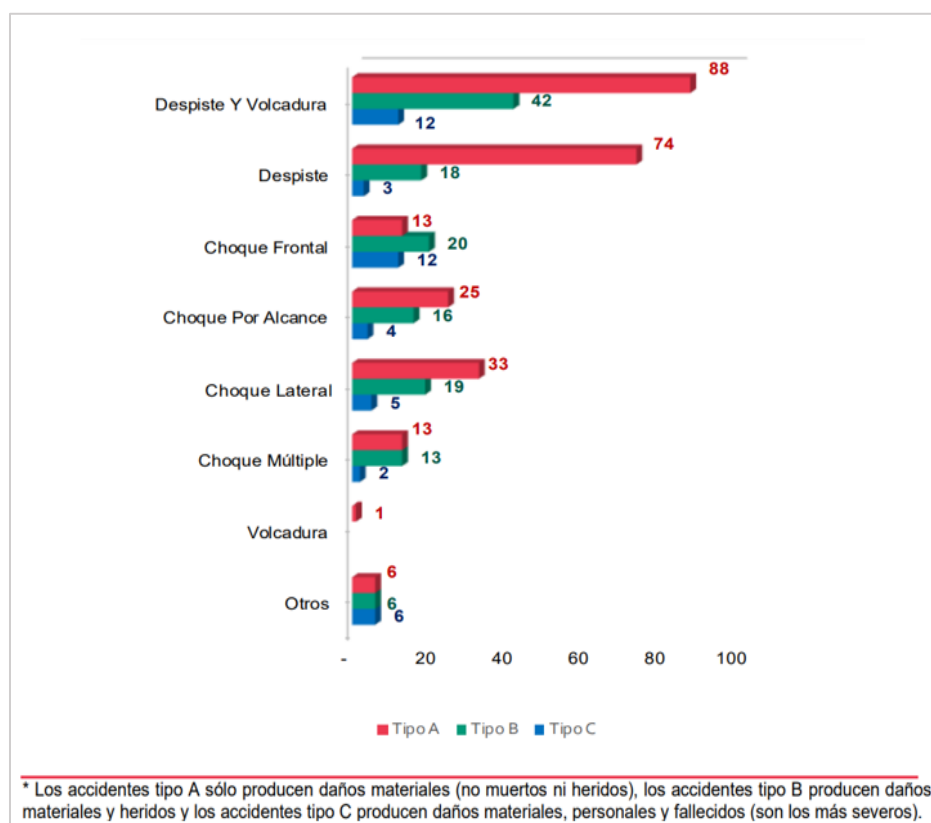
Nota. La tabla muestra la subdivisión del subtramo 5C en sectores con sus respectivos códigos de ruta y progresivas. Fuente: ProInversión (2007).

Sin embargo, particularmente el subtramo 5C de este corredor presenta problemas de seguridad vial que se manifiestan en un elevado índice de siniestralidad, con consecuencias humanas, ambientales y económicas. Durante 2024 se registraron 431 accidentes, lo que representó un incremento del 23.5 % en comparación con el año anterior. Estos accidentes dejaron un saldo de 499 heridos y 59 fallecidos. En relación con 2023, la cantidad de heridos aumentó en 33.4 %, mientras que la de fallecidos disminuyó en 30.6 %. Por otro lado, la mayoría de los accidentes estuvieron relacionados con despistes y volcaduras, los cuales representaron en conjunto el 59.2 % del total (OSITRAN, 2025).

La figura 2 resume los tipos de accidentes por consecuencias acaecidas respecto a la vida humana durante el año 2024 en la IIRSA Sur.

Figura 2

Tipos de accidente de tránsito por consecuencia



Nota. La figura muestra la tipología de accidentes de tránsito por consecuencias en el 2024 en el corredor vial IIRSA Sur tramo 5. Fuente: OSITRAN (2025).

Los reportes del OSITRAN identifican que la tipología de accidente predominante corresponde a despistes y volcaduras, particularmente en curvas horizontales. Entre los factores causales concurrentes se han señalado: la fatiga del conductor, la conducción bajo los efectos del alcohol y quizás la más importante la falta de familiaridad de los conductores con la geometría de la vía.

Figura 3*Accidente de tránsito en curva horizontal*

Nota. Fotografía tomada el 12 de octubre de 2025 a las 4:55 a. m., donde se muestra un accidente de tránsito por despiste y volcadura en una curva horizontal de la vía IIRSA Sur, subtramo 5C. Fuente: Elaboración propia (2025).

Esta investigación busca contribuir al conocimiento científico en la disciplina de la ingeniería de transportes al aportar un modelo predictivo valioso que busca integrar la retrorreflectividad de las marcas viales tanto en el eje como en los bordes, el diseño geométrico de la curva horizontal con la velocidad de operación nocturna en la carretera. El modelo también busca convertirse en una herramienta práctica para los gestores viales en la toma de decisiones, priorizando la seguridad de los usuarios de la carretera, específicamente durante la noche en los tramos curvos más críticos.

También es preciso indicar que, esta investigación busca cerrar una brecha de conocimiento existente entre los modelos predictivos de velocidad y los factores humanos en condiciones nocturnas. Mientras que modelos ampliamente aceptados, como las ecuaciones de Fitzpatrick,

predicen la velocidad de operación (V85) basándose predominantemente en parámetros geométricos (radio, pendiente), este estudio incorpora de manera explícita y cuantitativa la variable de percepción visual del conductor: la retrorreflectividad de las marcas viales.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema Principal

¿Cuál es la influencia de la retrorreflectividad de las marcas viales y la geometría en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2025?

1.2.2. Problemas Secundarios

- a) ¿Cuál es influencia del coeficiente de retrorreflectividad promedio de las marcas viales en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026?
- b) ¿Cuál es influencia del radio de la curva en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026?
- c) ¿Cuál es influencia de la pendiente promedio de la curva en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026?
- d) ¿Cómo se puede desarrollar y validar un modelo predictivo multivariable que estime con precisión la velocidad de operación en curvas horizontales a partir de la retrorreflectividad y parámetros geométricos en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026?

1.3. Justificación del Problema

1.3.1. Justificación Social

Esta investigación abordó directamente la brecha de seguridad que supone la conducción nocturna, y contribuye a la reducción de siniestros viales y la salvaguarda de vidas humanas. Los accidentes de tránsito son una de las principales causas de muerte a nivel global, y las curvas horizontales son lugares de alta concentración de siniestros, especialmente graves en condiciones nocturnas. Según la Administración Federal de Carreteras (FHWA), más del 50% de todas las muertes por accidentes de tráfico ocurren de noche. En consecuencia, un nivel adecuado de retrorreflectividad puede reducir el 50% de los accidentes durante la noche y el 28% de las muertes en condiciones climáticas oscuras, lluviosas o nevadas (Idris et al., 2024).

La presente investigación tiene conexión directa con el ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles, puesto que la meta 11.2 del ODS 11 es, “de aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad”.

1.3.2. Justificación Metodológica

Metodológicamente, esta investigación integró variables tradicionales de diseño geométrico con variables de percepción visual como la retrorreflectividad, utilizando técnicas de análisis estadístico robustas (correlación, regresión lineal múltiple) para aislar y cuantificar efectos

individuales y conjuntos. Sirve como un modelo para futuras investigaciones que busquen entender fenómenos complejos de tránsito donde interactúan la infraestructura, el vehículo y el comportamiento humano.

1.3.3. Justificación Práctica

Desde una perspectiva práctica, este estudio proporciona herramientas para la gestión de la infraestructura vial. La importancia de las marcas viales para la seguridad se incrementa durante la conducción nocturna, puesto que los conductores enfrentan una mayor carga de trabajo mental y una menor conciencia de la alineación de la carretera y el entorno, es por ello que, el mantenimiento de la señalización vial es una práctica entre las agencias viales para prevenir condiciones inseguras (Dimauro et al., 2025). Los estudios han demostrado que un aumento en RL se asoció con una menor tasa de accidentes por la noche en carreteras sin iluminación en ausencia de otros factores de interferencia. El RL mínimo que la Federación Europea de Carreteras recomienda mantener en todas las carreteras en todo momento es de 150 mcd/m²/lux (Babić et al., 2024).

Aunque el cálculo de la velocidad de operación es simple, muchas autoridades viales no pueden recopilar datos de velocidad para cada carretera. Por lo tanto, proporcionar modelos de predicción podría ser una herramienta útil para investigar la relación entre V 85 y las características de la carretera. La literatura propuso varios modelos para tenerlo en cuenta. Sin embargo, hasta donde sabemos, los efectos de algunas características geométricas de la carretera, marcas viales y señales, datos de tráfico, tipo de terreno y la consideración simultánea de diferentes categorías de carreteras en la predicción de V 85 no se analizaron por completo (Martinelli et al., 2023).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo predictivo multivariable que estime la velocidad de operación en curvas horizontales en función de la retrorreflectividad de las marcas viales y parámetros geométricos en la red vial IIRSA Sur Tramo 5C, Moquegua.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a) Determinar la influencia del coeficiente de retrorreflectividad promedio de las marcas viales sobre la velocidad de operación en curvas horizontales en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026.
- b) Determinar la influencia del radio de la curva sobre la velocidad de operación en curvas horizontales en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026.
- c) Determinar la influencia de la pendiente promedio de la curva sobre la velocidad de operación en curvas horizontales en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026.
- d) Desarrollar y validar un modelo predictivo multivariable para estimar la velocidad de operación en curvas horizontales a partir de la retrorreflectividad y parámetros geométricos en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026.

CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes del Problema

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

El estudio de (Idris et al., 2024) se centró en la creación de modelos predictivos robustos que permitan a las agencias de transporte prever la retrorreflectividad de la señalización vial. Para ello, utilizó como variables principales la retrorreflectividad inicial medida y otras condiciones clave de los proyectos. La investigación analizó 49,632 mediciones de retrorreflectividad transversal de siete materiales diferentes, obtenidas de las plataformas de prueba más recientes del Programa Nacional de Evaluación de Productos de Transporte (NTPEP). Se evaluaron algoritmos de árbol de decisión (DT) y red neuronal artificial (ANN) para desarrollar modelos capaces de predecir el rendimiento hasta por tres años. Tras entrenar los modelos con el 80% de los datos y validarlos con el 20% restante, se determinó que las redes neuronales secuenciales superaron significativamente a los árboles de decisión. Los modelos de RNA lograron valores de R^2 entre 0.76-0.96 (entrenamiento) y 0.55-0.94 (prueba), superando ampliamente los rangos (0.14-0.75) de modelos de regresión anteriores. Las variables más influyentes fueron la retrorreflectividad inicial, la cantidad de nevadas y el volumen de tráfico.

El estudio de (Tottadi & Mehar, 2024) se propuso desarrollar un modelo predictivo de la velocidad de operación para tramos rectos y curvos en autopistas de cuatro carriles. La investigación se basó en datos

recopilados de 44 secciones viales en India, distribuidas equitativamente entre 22 curvas y 22 tangentes. La metodología consistió en registrar las características geométricas de la vía y las velocidades de flujo libre de distintos tipos de vehículos, analizando sus perfiles de velocidad a partir de distribuciones estadísticas no normales. Para el desarrollo de los modelos, se emplearon y compararon dos técnicas: la regresión lineal múltiple (RLM) y las redes neuronales artificiales (RNA). El análisis identificó que el radio, la longitud y el ángulo de deflexión de la curva eran las variables más significativas para predecir la velocidad en los tramos curvos. En contraste, para los tramos rectos, los factores más influyentes fueron el ancho del arcén, el ancho de la mediana y la densidad de accesos laterales. Tras su desarrollo, los modelos fueron validados exitosamente con datos de campo, utilizando métricas de rendimiento como la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) para cuantificar su precisión. Los resultados demostraron un desempeño predictivo superior en los modelos basados en RNA, tanto para curvas como para tangentes, en comparación con los obtenidos mediante RLM. Se concluye que estos modelos representan una herramienta valiosa para que los ingenieros viales establezcan límites de velocidad seguros y consistentes en segmentos críticos de la red de autopistas.

El estudio de (Casanova et al., 2021) analizó la consistencia del diseño geométrico en curvas horizontales de carreteras tipo A2 de la Red Federal mexicana, con el propósito de mejorar la seguridad vial. La investigación se centró en estimar la velocidad de operación vehicular en estas curvas, tomando en cuenta parámetros geométricos clave como el radio, el grado de curvatura, la longitud de la curva y el ángulo de deflexión. Para ello, se realizaron mediciones puntuales de velocidad en 60 curvas horizontales seleccionadas. Con los datos recopilados, se desarrolló un modelo predictivo de la velocidad de operación, específicamente adaptado a las carreteras convencionales tipo A2, caracterizadas por tener un carril

por sentido, control de accesos total o parcial, y velocidades de proyecto entre 80 km/h y 110 km/h. La aplicación de este modelo permite evaluar la consistencia del trazado vial, lo que resulta una herramienta de gran utilidad para optimizar la infraestructura carretera. En consecuencia, su implementación contribuye a una mejora sustancial en la operatividad del transporte y a una reducción efectiva de la siniestralidad en las carreteras de México.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

De acuerdo con el estudio longitudinal y comparativo de (Cáceres, 2020), realizado en la carretera Panamericana Sur PE-1S entre los años 2013 y 2014, se analizó la influencia del tiempo en el coeficiente de retroreflectividad de la demarcación vial. La investigación, que empleó la observación como método principal y consideró 600 unidades de análisis, además utilizó un modelo de regresión lineal simple para determinar la influencia del tiempo en la evolución del coeficiente de retrorreflexión. Como conclusiones, esta investigación determinó que la demarcación con microesferas tiene una vida útil máxima de cinco meses para el eje central y de seis meses para los ejes laterales, y que el coeficiente de retroreflectividad en la demarcación de la carretera presenta un comportamiento lineal negativo, llegando a alcanzar al límite de 80 mcd/m²/lx, en el caso del eje central a los 174 días y los ejes laterales a los 189 días. Por lo que se puede decir que, el tiempo ha influido significativamente en el coeficiente de retroreflectividad en la demarcación superficial de la carretera.

El estudio de (Vallejos & Bayona, 2021) buscó utilizar las herramientas del Manual de Seguridad Vial en la realización de Inspecciones de Seguridad Vial. El propósito era detectar elementos mejorables, analizar sus deficiencias y sugerir acciones prioritarias para

aumentar la seguridad en la infraestructura del Sistema Nacional de Carreteras (SINAC) del Perú. El análisis se centró en 202 km de carreteras, donde entre 2015 y 2018 se registraron 563 accidentes. La distribución de las causas fue: 61% colisiones y choques, 24% despistes y 15% atropellos, con una mayor incidencia durante la madrugada. El análisis de los datos indicó que el 93% de los accidentes se atribuyeron al factor humano, el 23% a la infraestructura y el 2% al vehículo. La intensidad media diaria de tráfico (IMDA) mostró un 53% de vehículos pesados y un 48% de ligeros, con velocidades entre 60 y 90 km/h. Las principales causas humanas identificadas fueron la imprudencia del conductor, el exceso de velocidad y la invasión del carril contrario. El diagnóstico de la infraestructura vial identificó problemas geométricos como curvas con radios excesivamente cerrados, sobreanchos inadecuados y accesos mal ubicados en tramos curvos, lo que genera una visibilidad reducida. Finalmente, también se observó una percepción inadecuada de la señalización horizontal. Concluye con que, sobre los problemas de seguridad vial que se han identificado a lo largo de las carreteras, en lo que se refiere a la señalización horizontal el 89.33% no cumplen con los niveles de retroreflectividad.

El estudio aplicado y experimental de (Trujillo, 2023) se propuso analizar si la velocidad de operación en tramos rectos (tangentes) y curvos mejora la consistencia del diseño geométrico. La investigación se llevó a cabo en cuatro sectores de la Carretera Huánuco a Pasco. En cada uno de estos sectores, tanto en las rectas como en las curvas, se midieron los tiempos y longitudes de recorrido. Esta recolección de datos permitió calcular la velocidad de operación utilizando el percentil 85 de la distribución de velocidades y mediante modelos de estimación. Finalmente, con estos resultados, se evaluó la consistencia del diseño geométrico aplicando el criterio de seguridad II de Lamm. Esta investigación concluye con, que a mayor velocidad de Operación (Percentil 85) de la tangente y

curva mejora la consistencia de diseño geométrico en elementos geométricos consecutivos.

2.2. Normativa Vigente

2.2.1. Normativa Internacional

El método de ensayo ASTM E1710 (Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with CEN-Prescribed Geometry Using a Portable Retroreflectometer) abarca la medición de las propiedades retrorreflectivas de materiales de señalización horizontal de pavimentos que contienen microesferas retrorreflectantes, como rayas de tráfico y símbolos de superficie, utilizando un retrorreflectómetro portátil que se puede colocar sobre la señalización vial para medir la retrorreflexión con una geometría predefinida (ASTM, 2018).

La práctica ASTM D7585/D7585M-10 (Standard Practice for Evaluating Retroreflective Pavement Markings Using Portable Hand-Operated Instruments) describe técnicas de campo para evaluar las propiedades retrorreflectantes de las marcas viales que contienen elementos ópticos retrorreflectantes (por ejemplo, líneas centrales y líneas de borde) aplicadas a la superficie de la carretera. Las técnicas descritas en esta práctica incluyen criterios de muestreo como la longitud de las secciones de prueba y el número de mediciones necesarias. La práctica se basa en mediciones retrorreflectantes realizadas con instrumentos portátiles de mano, de conformidad con el método de ensayo ASTM E1710 (ASTM, 2022).

La norma AASTHO Policy on Geometric Design of Highways and Streets en su séptima edición conocida como el Libro Verde, ofrece orientación a ingenieros y diseñadores que buscan crear soluciones de

diseño únicas que satisfagan las necesidades de todos los usuarios de carreteras y calles en cada proyecto, también define formalmente el concepto de velocidad de operación y establece que la V85 es la métrica que representa esta velocidad y es la que debe usarse para evaluar la consistencia del diseño (AASTHO, 2018).

2.2.2. Normativa Nacional

Las Especificaciones Técnicas de Pintura para Obras Viales del MTC aprobado por Resolución Directoral N° 02-2013-MTC/14, es un documento de carácter normativo y de cumplimiento obligatorio en la adquisición de los materiales y servicios para demarcación de carreteras, calles o avenidas, preparación de superficies, inspección y pruebas de laboratorio de los materiales para demarcación; que lleve a cabo el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Por lo que debe ser incluida en los procedimientos de contratación: licitación pública o adjudicación directa, como parte de los requisitos que debe cumplir el proveedor, contratista o licitante (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).

El Manual de Carreteras Mantenimiento o Conservación Vial del MTC, aprobado por Resolución Directoral N° 08-2014-MTC/14 es un documento de carácter normativo y de cumplimiento obligatorio que tiene por finalidad brindar los criterios apropiados que se deben aplicar para la gestión del conjunto de actividades técnicas de naturaleza rutinaria y periódica, que se ejecuten en las vías, incluyendo los puentes, túneles y demás elementos de la misma, para que estos se conserven en niveles de servicios adecuados (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018b).

El Manual de Diseño Geométrico (DG-2018) del MTC, aprobado por Resolución Directoral N° 03-2018-MTC/14 es un documento de carácter normativo y de cumplimiento obligatorio que organiza y recopila

las técnicas y procedimientos para el diseño de la infraestructura vial, en función a su concepción y desarrollo, y acorde a determinados parámetros. Contiene la información necesaria para diferentes procedimientos, en la elaboración del diseño geométrico de los proyectos, de acuerdo con su categoría y nivel de servicio, en concordancia con las demás normativas vigente sobre la gestión de la infraestructura vial. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018a)

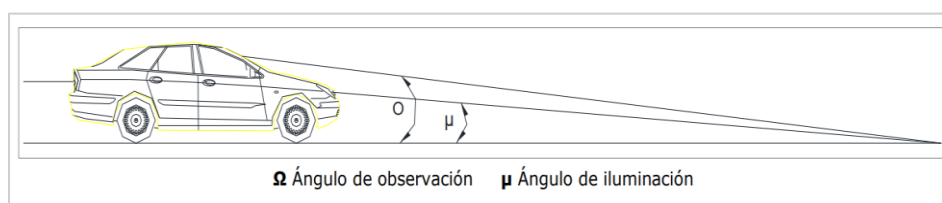
2.3. Definición de Conceptos Básicos

2.3.1. Identificación de la Variable Independiente N°1

Retroreflectividad de las Marcas Viales (VI 1). La retroreflectancia es la propiedad de un material que permite que las marcas en el pavimento sean claramente visibles durante la noche y en condiciones climáticas severas durante el día, al ser iluminadas por las luces de los vehículos que generan ángulos de iluminación y observación tal como se muestra en la figura 4, los materiales que brindan dicha propiedad retroreflectiva son microesferas y/o esferas de vidrio u otros materiales certificados (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2024).

Figura 4

Retroreflectancia de las marcas en el pavimento



Nota. La figura muestra los ángulos de observación e iluminación generados por las luces del vehículo durante el proceso de retroreflectividad. Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2024).

Indicador:

Coefficiente de Retrorreflectividad (R_L). Es relación entre la luminancia de una superficie proyectada y la iluminancia normal en la superficie sobre un plano normal a la luz incidente, expresada en milicandelas por lux por metro cuadrado (mcd/lux/m²) (ASTM, 2018). Los valores mínimos del coeficiente de retrorreflectividad que deben presentar las marcas en el pavimento se aprecian en la tabla 2.

Tabla 2

Valores mínimos del coeficiente de retrorreflectividad

Retrorreflectancia Inicial	Retrorreflectancia para Repintado
El coeficiente mínimo de retrorreflectancia (geometría de 30 m) inicial, para la demarcación de color blanco y amarillo, debe ser respectivamente de 230 mcd/lux/m ² y 175 mcd/lux/m ² .	Si el coeficiente de retrorreflectancia (geometría de 30 m), corresponde a un valor menor o igual a 80 mcd/lux/m ² , tanto para la demarcación de color blanco como para la amarilla, se debe efectuar el repintado correspondiente.

Nota. La tabla muestra los umbrales mínimos de retrorreflectividad para marcas nuevas y en mantenimiento. Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.3.2. Identificación de la Variable Independiente N°2

Parámetros Geométricos (VI 2). Llamados elementos de la vía, son los componentes físicos individuales y dimensionables que, en su conjunto, conforman la infraestructura vial. Estos elementos se diseñan y ajustan en base a las características de los usuarios (conductores, peatones), los vehículos y el entorno, con el fin de garantizar la seguridad, la eficiencia del flujo vehicular y la comodidad en la vía (Garber & Hoel, 2009).

Indicadores:

Radio de curva. La distancia de un punto cualquiera de la circunferencia al centro se llama radio (Lehmann & García, 1989).

Pendiente. Las pendientes longitudinales del terreno son las inclinaciones del terreno, medidas en el sentido longitudinal del eje de la vía (Cárdenas Grisales, 2015).

2.3.3. Identificación de la Variable Dependiente

Velocidad de Operación (VD). Es la velocidad máxima a la que pueden circular los vehículos en un determinado tramo de una carretera, en función a la velocidad de diseño, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, estado del pavimento, meteorológicas y grado de relación de ésta con otras vías y con la propiedad adyacente (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018a). Las siguientes características de diseño geométrico y demanda de tráfico pueden tener un impacto directo en la velocidad operativa: Radio de curva horizontal, pendiente, densidad de acceso, tratamientos de mediana, estacionamiento en la calle, densidad de semáforos, volumen de tráfico vehicular y actividad peatonal y ciclista (AASTHO, 2018).

Indicador:

Percentil 85 (V85). El percentil 85 de la distribución de velocidades observadas es la medida más utilizada de la velocidad operativa asociada a una ubicación o característica geométrica particular (AASTHO, 2018), el cual consiste en determinar la velocidad bajo la cual circula el 85% de los vehículos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018a). En la Tabla 3 (ecuaciones de Fitzpatrick), se puede apreciar estimaciones para la determinación de velocidades de operación.

Tabla 3*Ecuaciones de Fitzpatrick*

Condiciones de alineamiento	Ecuación
Curva horizontal sobre pendiente ($-9\% < i < -4\%$)	$V_{85} = 102.10 - \frac{3077.13}{R}$
Curva horizontal sobre pendiente ($-4\% < i < 0\%$)	$V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$
Curva horizontal sobre pendiente ($0\% < i < 4\%$)	$V_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$
Curva horizontal sobre pendiente ($4\% < i < 9\%$)	$V_{85} = 96.61 - \frac{2752.19}{R}$
Curva horizontal combinada con curvas cóncavas (sag)	$V_{85} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$
Curva horizontal combinada con curvas convexas sin limitación de visibilidad	(Ver 2)
Curva horizontal combinada con curvas convexas con limitación de visibilidad ($K \leq 43$ m / %)	$V_{85} = 103.24 - \frac{3576.51}{R}$; (Ver 2)
Curva vertical cóncava sobre recta horizontal	V_{85} se asume como la velocidad deseada
Curva vertical convexa con distancia de visibilidad no limitada ($K > 43$ m / %) sobre recta horizontal	V_{85} se asume como la velocidad deseada
Curva vertical convexa con distancia de visibilidad limitada ($K \leq 43$ m / %) sobre recta horizontal	$V_{85} = 105.08 - \frac{149.69}{K}$
1. Usa la menor velocidad estimada con las ecuaciones 1 o 2 (para pendientes descendentes) y 3 o 4 (para pendientes ascendentes). 2. Además, comparar con la velocidad estimada con las ecuaciones 1 o 2 (para pendientes descendentes) y 3 o 4 (para pendientes ascendentes) y usar la menor. Esto asegurará que la velocidad estimada a lo largo de curvas combinadas no será mejor que si sólo la curva horizontal está presente. Es decir, la inclusión de una curva convexa con visibilidad limitada resulte en una mayor velocidad.	
V_{85} Percentil 85 de velocidad de automóviles (km/h).	
R Radio de curva (m).	

Nota. La tabla muestra las ecuaciones propuestas por Fitzpatrick para estimar el percentil V85 de acuerdo a parámetros geométricos en curvas horizontales y verticales. Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018a).

2.3.4. Tabla Resumen de Variables, Dimensiones e Indicadores

En la tabla 4 se presenta un resumen de las variables de estudio.

Tabla 4

Tabla resumen de variables

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad	Instrumento(s)	Método/Frecuencia de medición
Retroreflectividad (VI 1)	Retroreflectividad promedio	Coefficiente de retroreflectividad línea de eje	mcd/lux/m ²	Retroreflectómetro horizontal	3 mediciones por curva – promedio representativo
		Coefficiente de retroreflectividad línea de borde	mcd/lux/m ²	Retroreflectómetro horizontal	3 mediciones por curva – promedio representativo
Parámetros geométricos (VI 2)	Geometría de la curva horizontal	Radio de curva	m	Planos de planta y perfil longitudinal	validación con diseño vial
	Geometría de la curva horizontal	Pendiente promedio	%	Planos de planta y perfil longitudinal	Cálculo mediante cotas de rasante en curvas seleccionadas
Velocidad de operación (VD)	Velocidad de operación nocturna	Percentil 85 (V85)	km/h	Pistola radar – Registro en campo	100 vehículos por curva, horario nocturno (flujo libre), promedio V85

Nota. La tabla muestra un resumen de las variables, dimensiones e indicadores que se utilizarán en la investigación. Fuente: Elaboración propia (2025).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO

3.1. Descripción de la Investigación Aplicada

3.1.1. Tipo de Investigación

Esta investigación es del tipo aplicada, puesto que tiene el propósito de resolver problemas aplicando conocimientos existentes (Hernández Sampieri et al., 2014). Los resultados de esta investigación buscan resolver un problema concreto (seguridad vial nocturna) y generar conocimiento para una aplicación directa en la gestión y el mantenimiento de carreteras. Los resultados tienen una utilidad inmediata para los ingenieros y agencias de transportes.

3.1.2. Nivel de Investigación

La presente investigación es un estudio de nivel explicativo, puesto que, se pretende establecer las causas de los sucesos o fenómenos que se estudian, es decir, se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta (Hernández Sampieri et al., 2014). Al construir y analizar un modelo de regresión que busca explicar la variabilidad de la velocidad de operación V85 en función de otras variables para explicar el "por qué" de las velocidades observadas.

3.1.3. Justificación del Enfoque Aplicado

El objetivo central fue desarrollar un modelo de predicción multivariable que cuantifique la influencia de parámetros geométricos (radio, pendiente) y de condición de la señalización (retroreflectividad de marcas viales) sobre la velocidad de operación (V85) en curvas horizontales de la vía IIRSA Sur, subtramo 5C. El estudio se sustenta en la recolección de datos primarios en campo y el posterior análisis estadístico para generar un modelo matemático con aplicabilidad directa en la gestión de la seguridad vial de la carretera.

3.2. Diseño del Proyecto

3.2.1. Etapas del Proyecto

El proyecto se ejecutó en cuatro etapas secuenciales:

i. Planificación y Selección de Muestra

1) Delimitación del Área de Estudio. Identificación de curvas horizontales del corredor vial IIRSA Sur subtramo 5C mediante planos de planta y perfil longitudinal

2) Determinación de la Muestra. Para determinar el tamaño de la muestra, se empleó la expresión propuesta por Green (1991), utilizada para evaluar la significancia global en modelos de regresión múltiple.

$$n \geq 50 + 8m$$

Donde:

n : Tamaño de muestra mínimo.

m : Número de variables predictoras independientes.

$$n \geq 50 + (8 \times 4)$$

$$n \geq 82$$

Se necesitan mínimamente 82 curvas para garantizar que el modelo es significativo como un todo.

En ese entender se consideró como muestra 82 curvas horizontales circulares, contenidas dentro de los kilómetros sorteados seleccionados al aplicar la metodología descrita en el contrato de concesión para fines de evaluación de desempeño en la vía (ProInversión, 2007).

3) Diseño de Protocolos. Se elaboraron formatos para el registro de datos de velocidad y retrorreflectividad en campo.

ii. Levantamiento de Datos en Campo

1) Medición de Velocidad de Operación. Utilizando una pistola radar marca Bushnell modelo 101911, y de acuerdo a la metodología utilizada por Cal y Mayor & Cárdenas (2007) se registró la velocidad instantánea de 100 vehículos livianos libres por sentido en cada curva. La V85 se calculará como el percentil 85 de la distribución de velocidades. Es preciso indicar que las mediciones de velocidad se realizaron en condiciones nocturnas (6:00pm a 4:00am).

2) Medición de Retrorreflectividad. Se empleó un retrorreflectómetro horizontal portátil marca Zehntner modelo ZRM 6013+ para medir en cada curva horizontal los coeficientes de retrorreflectividad de la línea de eje y líneas de borde derecho e izquierdo en al menos tres puntos representativos.

3) Recolección de Datos Geométricos. El radio de la curva se obtuvo a partir de planos de planta del expediente técnico de la vía. La pendiente promedio se determinó a partir de los planos de perfil longitudinal del expediente técnico de la vía. Las mediciones de retrorreflectividad se tomaron en condiciones diurnas (7:00am a 5:00pm).

iii. Modelado y Análisis Estadístico

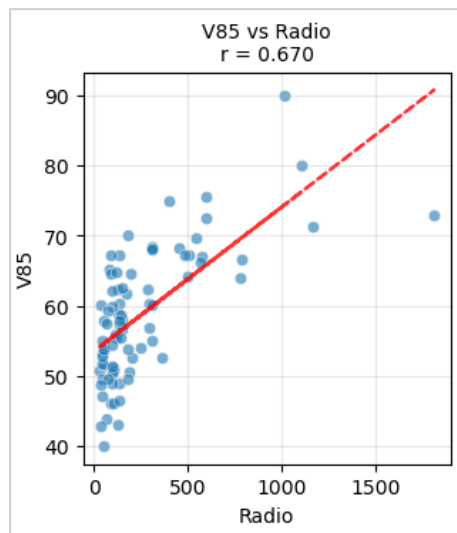
1) Sistematización y Limpieza de Datos. Se creó una base de datos unificada en una hoja de cálculo con toda la información recolectada por curva, asimismo se procedió con la limpieza de datos.

2) Análisis Exploratorio. Mediante algoritmo en lenguaje de programación Python, se realizó el análisis de correlación de Pearson para determinar el grado de correlación entre las variables predictoras (radio, pendiente promedio, coeficiente de retrorreflectividad promedio (promedio de mediciones entre línea de eje y línea de borde) con la velocidad de operación nocturna.

El coeficiente de correlación de Pearson entre la variable predictora radio y la velocidad de operación V85 fue de 0.670, como puede apreciarse en la figura 5.

Figura 5

Regresión lineal radio vs velocidad de operación

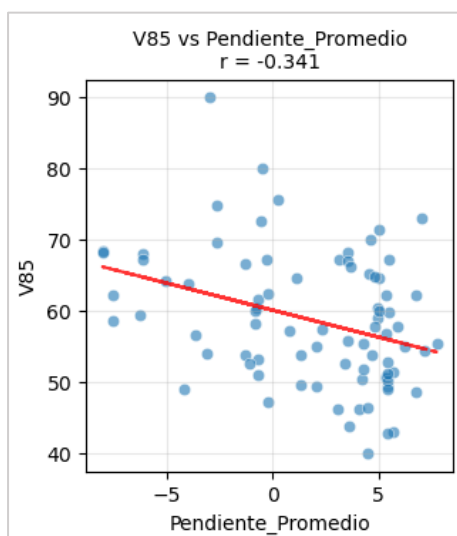


Fuente. Elaboración propia (2026)

El coeficiente de correlación de Pearson entre la variable predictora pendiente promedio y la velocidad de operación V85 fue de -0.341, como puede apreciarse en la figura 6.

Figura 6

Regresión lineal pendiente promedio vs velocidad de operación

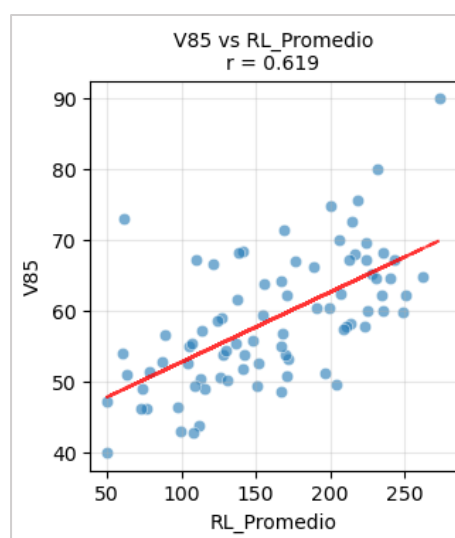


Fuente. Elaboración propia (2026)

El coeficiente de correlación de Pearson entre la variable predictora coeficiente de retrorreflectividad promedio y la velocidad de operación V85 fue de 0.619, como puede apreciarse en la figura 7.

Figura 7

Regresión lineal retrorreflectividad promedio vs velocidad de operación



Fuente. Elaboración propia (2026)

3) Desarrollo del Modelo Predictivo Multivariable. Se implementó un modelo de regresión lineal múltiple en lenguaje de programación Python para predecir la V85 en función de las 3 variables predictoras: Radio, Pendiente, Retrorreflectividad promedio (línea de eje y línea de borde). Posteriormente se realizó el diagnóstico del modelo en tres puntos clave: Ausencia de multicolinealidad, homocedasticidad y normalidad.

Se evaluó la ausencia de multicolinealidad mediante el método del Factor de Inflación de la Varianza (VIF) para garantizar que las variables predictoras no estén altamente correlacionadas entre sí, puesto que de estarlo el modelo no podría distinguir su efecto individual, inflando los errores

estándar de los coeficientes. Los valores de VIF >10 sugieren altas correlaciones (Pisică et al., 2022).

Para garantizar que los estimadores de mínimos cuadrados ordinarios sean fiables se analizó el supuesto de homocedasticidad mediante el método de Breusch-Pagan. La homocedasticidad, o igualdad de varianzas, es una condición para aplicar un modelo de regresión lineal e implica que los residuos presentan varianza homogénea para cada valor de la variable independiente. Por consiguiente, la heterocedasticidad (o la falta de homocedasticidad) es una condición indeseable en la regresión lineal (Rodríguez del Águila & Benítez-Parejo, 2011).

Se realizó el análisis del supuesto de normalidad de residuales mediante la prueba de Shapiro – Wilk, puesto que, las pruebas de normalidad resultan indispensables para determinar si resulta adecuado realizar inferencias sobre los coeficientes estimados en una regresión cuando se dispone de muestras reducidas, ya sea con fines de análisis de regresión o para construir intervalos de confianza en la predicción de la variable dependiente (Alonso & Montenegro, 2015)

4) Validación del Modelo. Se utilizó la validación cruzada K-Fold ($K = 5$) que, es una de las herramientas importantes en el aprendizaje automático, que generalmente se utiliza para la evaluación del rendimiento de un modelo predictivo (Li et al., 2023)

iv. Conclusiones, Recomendaciones y Discusión

Se redactaron las conclusiones en base a los hallazgos y se propuso directrices técnicas para la gestión y el mantenimiento de la vía. Asimismo, se realizó la discusión para interpretar y analizar los resultados, y al

compararlos con estudios previos, se explicó sus implicaciones teóricas y prácticas.

3.2.2. Herramientas y/o software utilizado

a) Pistola Radar. Se utilizó la pistola radar marca Bushnell modelo 10191. En la figura 8 se muestra el modelo empleado en la presente investigación

Figura 8

Pistola radar de velocidad



Nota. La figura muestra el radar marca Bushnell modelo 10191. Fuente: Bushnell Holdings (2025).

b) Retroreflectómetro. Se empleó un retroreflectómetro horizontal portátil marca Zehntner modelo ZRM 6013+ para realizar las mediciones del coeficiente de retroreflectividad en las marcas viales. En la figura 9 se muestra el modelo empleado en la presente investigación.

Figura 9

Retrorreflectómetro



Nota. La figura muestra el retrorreflectómetro horizontal marca Zehntner ZRM 6013+. Fuente: Proceq (2025).

c) Microsoft Excel y Word. Para la digitación inicial, base de datos y gráficos básicos.

d) Python. Se utilizó Python como lenguaje de programación para realizar los algoritmos para los análisis estadísticos avanzados como correlaciones, regresión múltiple, diagnóstico del modelo, validación cruzada, etc. Asimismo, se empleó para la visualización de gráficos mediante sus bibliotecas como Seaborn.

e) Microsoft Word. Como procesador de texto.

3.3. Evaluación Técnica y Factibilidad

La metodología propuesta emplea técnicas estandarizadas en ingeniería de transportes (medición de V85, RL) y análisis estadístico robusto y ampliamente documentado. El contar con una muestra de 82

curvas, que cumple con el criterio de Green, garantiza la viabilidad técnica para obtener resultados estadísticamente confiables.

El equipamiento requerido (radar, retroreflectómetro) es de uso común en entidades vinculadas a la infraestructura vial, y podría obtenerse mediante convenio o alquiler. Los softwares de análisis como Python son de código abierto y gratuitos. Los costos principales estarán asociados a las campañas de campo (logística, personal, viáticos).

3.3.1. *Análisis de la Estructura del Pavimento*

El corredor vial interoceánico IIRSA Sur Perú Brasil tramo 5 subtramo C es una vía pavimentada y asfaltada, en la tabla 5 se describe las características de la estructura del pavimento de sus sectores conformantes.

Tabla 5

Estructura del pavimento en la IIRSA Sur subtramo 5C

Sectores	Tipo de pavimento	Espesor carpeta asfáltica (m)	Espesor base granular (m)	Espesor sub base (m)
Ilo - Repartición	Flexible	0.10	0.20 a 0.25	0.30
Repartición - Dv. Moquegua		0.10	0.25	0.40
Dv. Moquegua - Torata		0.10	0.20	0.20 a 0.40
Torata - Humajalso		0.05	0.30	0.40
Binacional		0.10	0.20	0.20
Humajalso - Pte. Gallatini		0.075	0.20	0.15 a 0.2

Nota. La tabla muestra los espesores de las capas del pavimento en los sectores conformantes del subtramo 5C. Fuente: ProInversión (2007).

3.3.2. *Modelado Estructural*

El modelado estructural del comportamiento de la velocidad constituye el núcleo analítico de esta investigación. Consiste en el desarrollo

de un modelo de regresión lineal múltiple que represente matemáticamente la relación entre la velocidad de operación nocturna (V85) y las características de la vía para la realización de predicciones de V85.

a) Estructura del Modelo Propuesto. La ecuación general del modelo es la siguiente

$$V_{85} = \beta_0 + \beta_1 \times Radio + \beta_2 \times Pendiente + \beta_3 \times RL_Promedio + \varepsilon$$

Donde:

V_{85} : Velocidad de operación percentil 85 predicha (km/h).

$RL_Promedio$: Promedio del coeficiente de retrorreflectividad entre la línea de eje y línea de borde (mcd/m²/lux).

$Pendiente$: Pendiente promedio de la curva (%).

$Radio$: Radio de la curva horizontal (m).

β_0 : Intercepto o término constante.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Coeficientes de regresión.

ε : Residual.

b) Proceso de Modelado.

Análisis Exploratorio. Se evaluó las correlaciones bivariadas entre la V85 y cada variable predictora, así como la distribución de los datos.

Estimación de Parámetros. Mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios implementado en lenguaje de programación Python.

Diagnóstico del Modelo. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de regresión (normalidad, homocedasticidad y ausencia de multicolinealidad).

Validación del Modelo. Se empleó la validación cruzada k-fold ($k=5$) para evaluar la capacidad de generalización y prevenir el sobreajuste.

Interpretación. Los coeficientes obtenidos (β_1 , β_2 y β_3) fueron interpretados en términos prácticos, indicando el cambio esperado en la velocidad de operación V85 por cada unidad de cambio en la variable predictora, manteniendo constantes las demás.

3.3.3. Simulación de Impacto Ambiental

Los posibles riesgos identificados y su mitigación durante la etapa de recolección de datos se presentan en la tabla 6.

Tabla 6

Evaluación de riesgos

Riesgo	Mitigación
Condiciones climáticas adversas durante el levantamiento nocturno	Las mediciones se programarán para temporada de cielos despejados y se suspenderán ante lluvia o neblina.
Fallas en equipos de medición	Se verificará la calibración de los equipos previo a su uso.

Nota. La tabla muestra los posibles riesgos detectados durante la recolección de datos. Fuente: Elaboración propia (2026).

3.4. Planificación y Ejecución

3.4.1. Cronograma de Actividades

El proyecto se ejecutó en un plazo estimado de 6 meses, distribuidos en las cuatro fases (etapas) descritas con sus actividades correspondientes. La herramienta de gestión propuesta es un Diagrama de Gantt como el de la figura 11.

Figura 10*Cronograma de actividades*

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																									
Actividad	Duración (semanas)	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fase 1																									
Revisión bibliográfica y metodológica	2																								
Gestión de permisos	2																								
Formatos de recolección de datos	1																								
Preparación de logística																									
Fase 2																									
Medición de velocidades	4																								
Medición de retrorreflectividad	4																								
Recolección de datos geométricos	3																								
Fase 3																									
Sistematización de datos	2																								
Análisis estadístico	3																								
Desarrollo y validación del modelo	4																								
Fase 4																									
Resultados, discusión y conclusiones	2																								
Revisión final y entrega de la tesis	1																								

Nota. La figura muestra el cronograma semanal de actividades. Fuente: Elaboración propia (2026).

3.4.2. Asignación de Recursos

a) **Investigador Principal (Tesisista).** Responsable de la ejecución de todas las fases.

b) **Asistentes de Campo.** Apoyo en logística, seguridad y registro de datos durante las campañas de medición con equipos.

c) **Asesor de Tesis.** Supervisión técnica y científica.

d) **Pistola Radar de Velocidad.** Compra de pistola radar para mediciones de velocidad instantánea.

e) **Retrorreflectómetro Horizontal Portátil.** Alquiler por un mes, para medición del coeficiente de retrorreflectividad de las marcas viales.

f) Vehículo de Transporte. Alquiler de vehículo según duración de las mediciones en campo.

g) Equipos de Seguridad Vial. Chalecos reflectantes, conos, señalización temporal.

3.4.3. Costos y Financiamiento

El costo total de la investigación fue de s/. 7384.00 soles peruanos, en la tabla 7 se aprecia con detalle la inversión realizada. En cuanto a la fuente de financiamiento es preciso indicar que, fue con recursos propios del tesista.

Tabla 7

Presupuesto de investigación

Presupuesto de investigación					
Tesis: Modelo predictivo multivariable de la velocidad de operación en curvas horizontales según retrorreflectividad y parámetros geométricos, Moquegua – 2025.					
Tesista: Bach. Dylan Julio Moscoso Raurau					
Universidad Privada de Tacna					
Descripción	Und.	Cant.	Frecuencia	Costo	Parcial
Asistente de campo	mes	2	2	1000.00	4000.00
Alquiler de retrorreflectómetro	mes	1	1	700.00	700.00
Compra de radar de velocidad	und	1	1	1000.00	1000.00
Combustible	gln	18	2	19.00	684.00
Equipos de seguridad	und	1	1	400.00	400.00
Imprevistos	mes	1	2	300.00	600.00
Costo total					7384.00

Nota. La tabla muestra el costo total para la realización de la investigación.

Fuente: Elaboración propia (2026).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

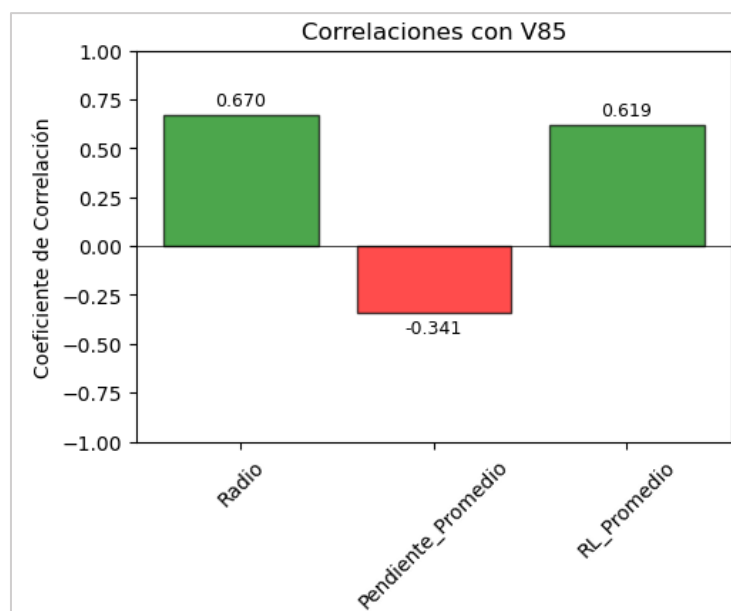
4.1. Desarrollo del Proyecto y Validación del Diseño

4.1.1. Análisis Exploratorio

Los coeficientes de correlación de Pearson entre cada una de las variables predictoras y la velocidad de operación V85 se muestran en la figura 11.

Figura 11

Correlaciones de Pearson de variables predictoras con la velocidad de operación



Nota. La figura muestra los coeficientes de correlación entre variables predictoras con la velocidad de operación V85. Fuente: Elaboración propia (2026).

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido entre la variable predictora radio y la velocidad de operación V85 fue de 0.670, lo cual indica que existe una correlación positiva moderada.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido entre la variable predictora pendiente promedio y la velocidad de operación V85 fue de -0.341, lo cual indica que existe una correlación negativa débil.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido entre la variable predictora retrorreflectividad promedio y la velocidad de operación V85 fue de 0.619, lo cual indica que existe una correlación positiva moderada.

4.1.2. Desarrollo del Modelo Predictivo Multivariable

La ecuación obtenida de la regresión lineal múltiple implementada en lenguaje de programación Python fue la siguiente: $V_{85} = 41.2354 + 0.0176 \times Radio - 0.5229 \times Pendiente + 0.0874 \times RL_Promedio$.

La interpretación de los coeficientes de regresión es la siguiente.

- a) $\beta_0 = 41.2354$, velocidad base cuando todas las variables son cero.
- b) $\beta_1 = 0.0176$, por cada unidad de aumento en el radio de la curva, V85 aumenta en 0.0176 km/h.
- c) $\beta_2 = -0.5229$, por cada unidad de aumento en la pendiente, V85 disminuye en 0.5229 km/h.
- d) $\beta_3 = 0.0874$, por cada unidad de aumento en la retrorreflectividad promedio, V85 aumenta en 0.0874 km/h.

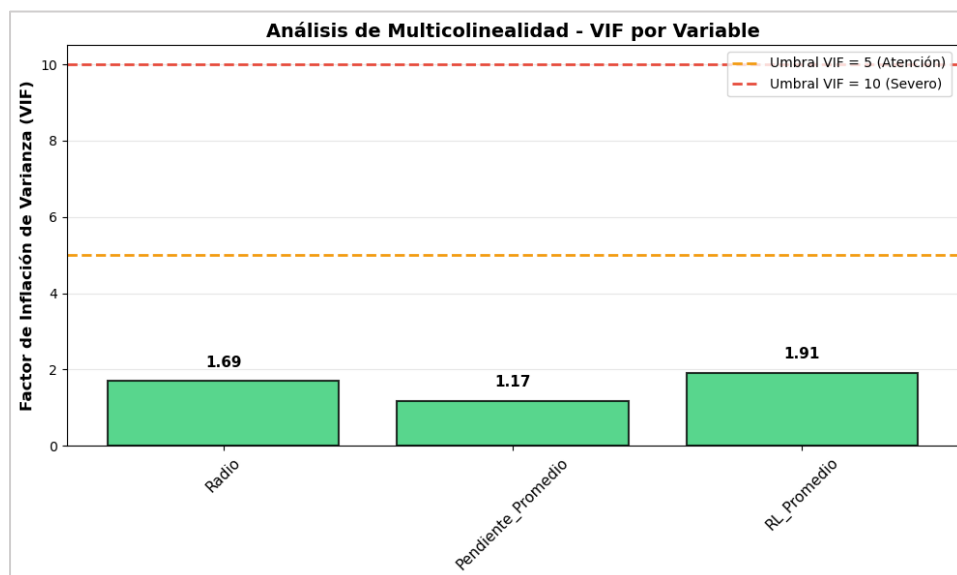
En cuanto al coeficiente de determinación R^2 se obtuvo 0.8046, y un coeficiente de determinación R^2 ajustado de 0.7970 lo cual indica que el modelo explica el 79.7% de la variabilidad en la velocidad de operación V85, en cuanto a la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se obtuvo un valor de 4.05 km/h, por lo tanto, el modelo tiene un buen poder predictivo.

4.1.3. Diagnóstico del Modelo Predictivo

a) **Análisis de Multicolinealidad.** Se evaluó la ausencia de multicolinealidad mediante el método del Factor de Inflación de la Varianza (VIF) obteniéndose los resultados mostrados en la figura 12. Como puede observarse todas las variables predictoras tienen $VIF < 5$, razón por la cual no existe multicolinealidad problemática, por lo tanto se puede afirmar que, los coeficientes del modelo son estables y confiables.

Figura 12

Análisis de multicolinealidad – VIF por variable

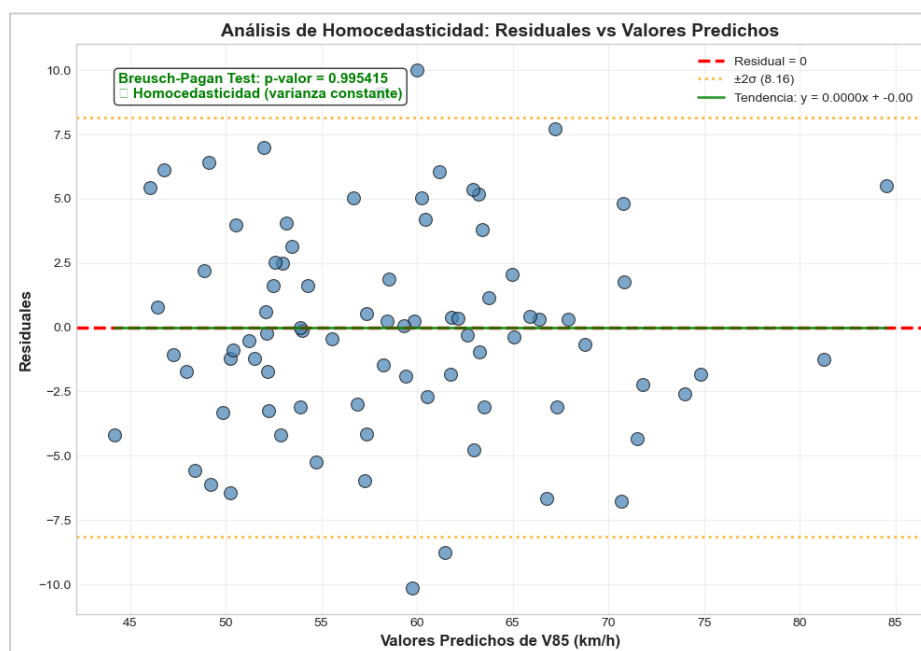


Nota. La figura muestra la evaluación de la ausencia de multicolinealidad por variable predictora mediante VIF. Fuente: Elaboración propia (2026).

b) Análisis del Supuesto de Homocedasticidad. Se analizó la propiedad de homocedasticidad mediante la prueba de Breusch-Pagan, de los resultados de la prueba mostrados en la tabla 8 se percibe un valor p (p-value) igual a 0.995415, el cual es mayor a 0.05 lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula. Además, en la figura 13 se aprecia el gráfico de residuos, donde se observa que, la nube de puntos está dispersa aleatoriamente alrededor de cero, sin forma de "embudo" o "cono". Por lo tanto se cumple con el supuesto de homocedasticidad garantizando que el modelo lineal es consistente y adecuado para realizar predicciones.

Figura 13

Gráfico de residuos vs valores predichos



Nota. La figura muestra el análisis de homocedasticidad para el modelo de predicción. Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 8*Resultados de la prueba de Breusch - Pagan*

Prueba de Breusch - Pagan
Hipótesis
Hipótesis nula (H0): Los errores son homocedásticos (varianza constante)
Hipótesis alternativa (H1): Los errores son heterocedásticos (varianza no constante)
Resultados de la prueba
Estadístico LM (Breusch-Pagan): 0.0676
p-valor LM: 0.995415
Estadístico F: 0.0215
p-valor F: 0.995699

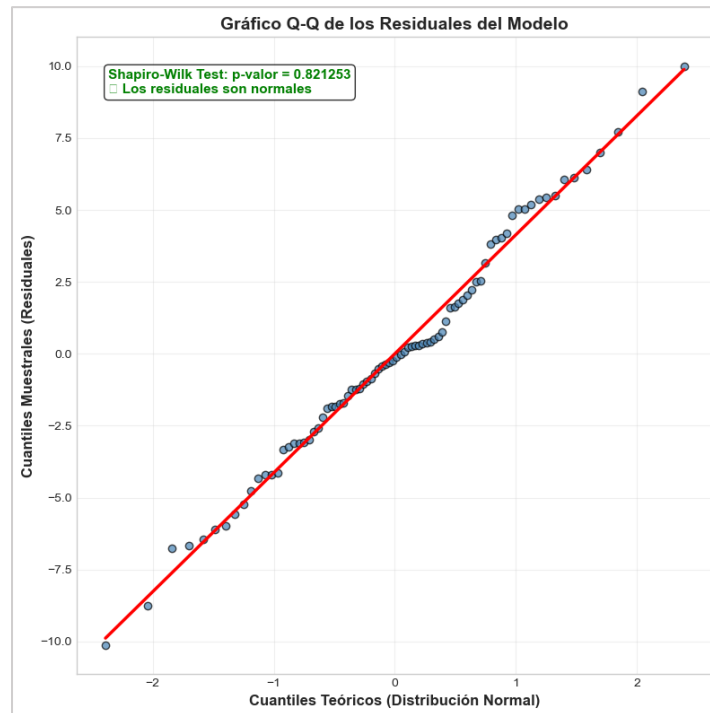
Nota. La tabla muestra los resultados de la prueba de Breusch – Pagan realizada en lenguaje de programación Python. Fuente: Elaboración propia (2026).

c) Análisis del Supuesto de Normalidad de Residuales.

Mediante la Prueba de Shapiro-Wilk se verificó la normalidad de los residuales para evaluar si estos siguen una distribución normal. De los resultados de la prueba mostrados en la tabla 9 se percibe un valor p (p-value) igual a 0.8213 el cual es mayor a 0.05 lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula. Además, en la figura 14 se aprecia el gráfico Q-Q de los residuales del modelo, donde se observa que, los puntos se alinean sobre la línea roja diagonal, mientras que en la figura 15 se aprecia el histograma de residuales con curva normal, el cual muestra la distribución de frecuencias de los residuales en forma de campana simétrica. Por lo tanto, se concluye que los residuales del modelo siguen una distribución normal, cumpliendo así con el supuesto de normalidad requerido para la validez de los intervalos de confianza.

Figura 14

Gráfico Q-Q de residuales del modelo predictivo



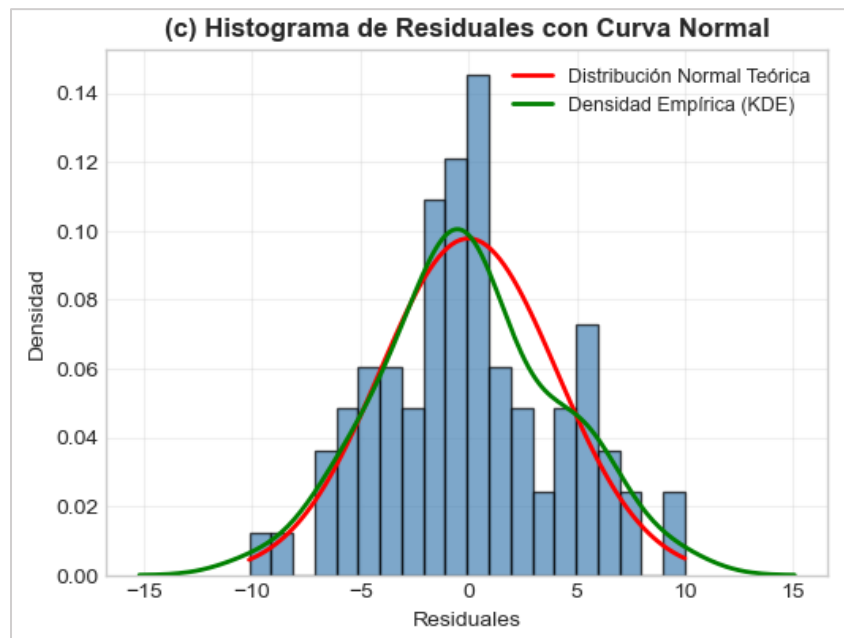
Nota. La figura muestra el gráfico Q – Q de residuales comparando los cuantiles de los residuales con los de una distribución normal teórica. Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 9

Resultados de la prueba de Shapiro – Wilk

Prueba de Shapiro - Wilk	
Hipótesis	
Hipótesis nula (H0): Los residuales siguen una distribución normal	
Hipótesis alternativa (H1): Los residuales no siguen una distribución normal	
Resultados de la prueba	
Estadístico de Shapiro-Wilk: 0.990614	
p-valor: 0.821253	

Nota. La tabla muestra los resultados de la prueba de Shapiro – Wilk realizada en lenguaje de programación Python. Fuente: Elaboración propia (2026).

Figura 15*Histograma de residuos*

Nota. La figura muestra la distribución de frecuencias de los residuos.
 Fuente: Elaboración propia (2026).

4.1.4. Validación del Modelo Predictivo

Los resultados de la validación del modelo predictivo utilizando la validación cruzada K-Fold ($K=5$) se muestran en la tabla 10, donde se percibe un coeficiente de determinación R^2 promedio validado de 0.7396, por lo tanto, existe una diferencia de 0.0649 en comparación con el coeficiente de determinación del modelo completo de 0.8046. Por consiguiente, el modelo presenta un R^2 validado promedio superior a 0.7 en validación cruzada, lo que indica un buen poder predictivo. La baja desviación estándar del R^2 (estabilidad entre folds) de 0.1485 sugiere que el modelo es robusto y no presenta problemas de sobreajuste.

Tabla 10

Resultados de la validación cruzada k – Fold (k =5)

Resultados de Validación Cruzada k-Fold (k=5)		
Fold	R^2	RMSE (km/h)
1	0.6787	3.76
2	0.8786	3.4
3	0.9038	3.75
4	0.7428	4.01
5	0.4943	5.74
Promedio	0.7396	4.13
Desv. Estándar	0.1485	0.83

Nota. La tabla muestra los resultados de la validación cruzada k – Fold (k = 5) realizada en lenguaje de programación Python. Fuente: Elaboración propia (2026).

4.2. Análisis de Impacto, Beneficios y Comparación con Casos Similares

Esta investigación generó resultados tangibles que representan una innovación en la gestión de la infraestructura vial, ofreciendo beneficios directos en seguridad y eficiencia.

4.2.1 Impacto e Innovación

Esta investigación aporta mediante modelamiento predictivo el conocimiento necesario para transformar tramos de alto riesgo en un elemento más confiable y seguro de la infraestructura vial regional, el que es un pilar del desarrollo sostenible de las comunidades. Las innovaciones que implican el desarrollo de la presente investigación son las siguientes.

a) Modelo Predictivo Validado. Se desarrolló el primer modelo predictivo multivariable para la predicción de velocidades de operación nocturnas en curvas horizontales específicamente validado y

calibrado para las condiciones de la vía IIRSA Sur, subtramo 5C. Esta es una innovación frente al uso genérico de modelos internacionales como las ecuaciones de Fitzpatrick descritas en el Manual de Conservación Vial de MTC, que no consideran factores como la retrorreflectividad.

b) Metodología Integrada de Diagnóstico. El desarrollo del modelo de predicción multivariable estableció una metodología que integra por primera vez en un solo análisis, la evaluación de la geometría de la curva horizontal (radio y pendiente), la condición de la señalización (retrorreflectividad) y el comportamiento real del conductor (velocidad de operación), permitiendo un diagnóstico vial integral para evaluar la consistencia del diseño geométrico de la vía.

c) Cuantificación del Impacto de la Retrorreflectividad. El estudio provee evidencia cuantitativa y robusta (a través del coeficiente del modelo β_3) del impacto específico que tiene la retrorreflectividad en la velocidad nocturna, un tema a menudo abordado de manera cualitativa o subjetiva.

4.2.2 Beneficios de la Investigación

a) Reducción de la Siniestralidad. La aplicación de los resultados permitirá implementar contramedidas específicas, lo que se espera conduzca a una reducción en la tasa de accidentes por despistes y volcaduras en el tramo de estudio.

b) Mayor Seguridad Nocturna. Una carretera con mejor señalización y diseño consistente se traduce directamente en un viaje más seguro para conductores, pasajeros y transportistas, puesto que el estudio del percentil 85 es usado generalmente para la implementación de señalización vertical en la vía.

4.2.3 Comparación con Casos Similares

El modelo desarrollado presenta un buen poder predictivo ($R^2 = 0.7396$) comparable a los reportados por Fitzpatrick et al. (2000) en su investigación para carreteras rurales de dos carriles y a la investigación de Casanova et al. (2021) para carreteras tipo A2 de la red vial mexicana, cuyos modelos explican entre el 56% y 76% de la variabilidad en velocidad de operación. Sin embargo, a diferencia de estos modelos predictivos que se basan exclusivamente en parámetros geométricos de la vía como el radio y la pendiente, el presente estudio incorpora la retrorreflectividad como variable predictora, lo que resulta especialmente relevante para el manejo en condiciones nocturnas.

Tottadi & Mehar (2024) en su investigación utilizaron el método de regresión lineal múltiple para desarrollar su modelo predictivo para estimar la velocidad de operación en curvas en base al radio, longitud de la curva y ángulo de deflexión obteniendo un coeficiente de determinación ajustado R^2 igual a 0.786, el cual garantiza un buen poder predictivo. No obstante, la incorporación de la retrorreflectividad de las marcas viales en el modelo desarrollado mejora la capacidad predictiva en escenarios de baja luminosidad, abordando una limitación identificada en la literatura, donde la mayoría de los modelos de velocidad han sido calibrados con datos de manejo en condición diurna y para la realidad de sus países de origen.

En conjunto, los resultados confirman que la retrorreflectividad de las marcas viales influye significativamente en la velocidad de operación nocturna, incluso después de controlar por los efectos del radio y la pendiente. El modelo desarrollado no solo contribuye al conocimiento en ingeniería de transportes al incorporar un factor usualmente omitido, sino que proporciona una herramienta práctica para la gestión de la seguridad

vial en la IIRSA Sur, con potencial aplicabilidad a otras carreteras en contextos similares

4.3. Limitaciones del Estudio y Mejoras Identificadas

La primera limitación identificada fue la alta correlación existente entre los coeficientes de retrorreflectividad medidos en el eje y en el borde dando indicios de multicolinealidad severa al ser evaluada mediante el método del Factor de Inflación de la Varianza resultando en un VIF superior a 10. La explicación a este fenómeno surge a partir del mantenimiento de la señalización horizontal en la vía, el cual se aplica de manera uniforme, es decir, si se repinta un tramo, se repintan tanto la línea de eje como la de borde. Por lo tanto, es completamente esperable que el coeficiente de retrorreflectividad en la línea de eje y en la línea de borde estén altamente correlacionadas. Ante esta limitación observada se optó por la combinación de estas dos posibles variables predictoras en una sola que represente el promedio de los coeficientes de retrorreflectividad en ambas marcas viales.

Otra limitación fue que no se consideraron variables como condiciones climáticas o habilidad y fatiga del conductor, esto debido a la magnitud de la investigación a la cual conllevaría la inclusión de estos factores, que también influyen en la velocidad de operación nocturna y quedan capturados y reconocidos en el término de error ε del modelo.

4.4. Descripción de la Solución Propuesta y su Implementación

4.4.1 *Modelo Predictivo Multivariable como Herramienta de Diagnóstico*

La solución propuesta se basa en el modelo de regresión lineal múltiple desarrollado en esta investigación, cuya ecuación es:

$$V_{85} = 41.2354 + 0.0176 \times \text{Radio} - 0.5229 \times \text{Pendiente} \\ + 0.0874 \times \text{RL_Promedio}$$

Este modelo permite estimar la velocidad de operación nocturna (V85) en función de tres variables fácilmente medibles en campo: el radio de la curva, la pendiente promedio y la retrorreflectividad promedio de las marcas viales.

4.4.2 Protocolo de Priorización de Curvas Críticas

El modelo desarrollado permite identificar curvas que requieren de una intervención prioritaria mediante el siguiente protocolo:

a) Recopilación y medición de datos.

- Obtención del radio y pendiente de cada curva desde los planos de la vía
- Medir el coeficiente de retrorreflectividad en el eje y bordes de las marcas viales con retrorreflectómetro horizontal.

b) Cálculo de la velocidad de operación V85 predicha

- Aplicar la ecuación del modelo predictivo para cada curva horizontal.

c) Clasificación de curvas por nivel de riesgo. El Criterio II de Lamm et al. (1999) para evaluar la consistencia de diseño geométrico, establece tres niveles de seguridad para determinar qué tan "sorpresivo" o peligroso es el cambio entre dos curvas o entre una recta y una curva, los cuales están descritos en la tabla 11

Tabla 11*Niveles de seguridad del criterio II de Lamm*

Criterio II de Lamm		
Nivel de seguridad	Rango	Significado
Bueno	$*V_{85} \leq 10 \text{ km/h}$	Diseño consistente, no se requieren correcciones.
Tolerable	$10 > *V_{85} \geq 20 \text{ km/h}$	Diseño moderadamente inconsistente, se recomienda señalización o mejoras menores.
Pobre	$*V_{85} > 20 \text{ km/h}$	Inconsistencia crítica, el diseño debe ser modificado para evitar accidentes.

*V85 = diferencia en el 85 percentil de velocidad entre elementos geométricos sucesivos (km / h)

Nota. La tabla muestra el nivel de diseño de seguridad propuesto por Lamm.

Fuente: Lamm et al. (1999)

Con estos niveles de seguridad y los umbrales de niveles de servicio para señalización horizontal, se propone la clasificación de curvas por nivel de riesgo descritas en la tabla 12 para su correspondiente atención por parte de los responsables del mantenimiento vial.

Tabla 12*Clasificación de curvas por nivel de riesgo*

Clasificación de curvas por nivel de riesgo		
Nivel	Condición	Acción recomendada
Crítico	$V_{85} \text{ predicha} > \text{Velocidad límite} + 20 \text{ km/h}$ y $\text{retroreflectividad promedio} < 80 \text{ mcd/lux/m}^2$	Intervención inmediata (Repintado urgente)
Alto	$V_{85} \text{ predicha} > \text{Velocidad límite} + 10 \text{ km/h}$ y $\text{retroreflectividad promedio} < 80 \text{ mcd/lux/m}^2$	Programar repintado en 3 meses
Moderado	$V_{85} \text{ predicha} > \text{Velocidad límite} + 5 \text{ km/h}$	Monitoreo semestral de RL
Bajo	$V_{85} \text{ predicha} \leq \text{Velocidad límite} + 5 \text{ km/h}$	Mantenimiento rutinario

Nota. La tabla muestra la clasificación de curvas por nivel de riesgo propuesta para intervención en el mantenimiento de las marcas viales.

Fuente: Elaboración propia (2026).

4.4.3 Plan de Intervención para el Mantenimiento de Señalización

En la tabla 13 se describe la propuesta de un plan de intervenciones en la infraestructura existente para garantizar una mejor seguridad vial para los usuarios de la vía.

Tabla 13

Plan de intervención para el mantenimiento de la señalización vial

Plan de Intervención para el Mantenimiento de la señalización		
Tipo de intervención	Descripción	Curvas objetivo
Repintado de marcas	Aplicación de pintura termoplástica o con microesferas de vidrio para aumentar la retrorreflectividad en las marcas viales	Curvas con RL_Promedio < 80-100
Renovación de señalización vertical	Instalación de señales reflectivas de advertencia en curvas críticas y adicionar elementos de encarrilamiento y defensa	V85 predicha > Velocidad límite + 10 km/h
Mejora geométrica	Peralte, sobreancho o rediseño de radio (solo si es viable)	Curvas con radio < 100 m y alta siniestralidad; V85 predicha > Velocidad límite + 20 km/h

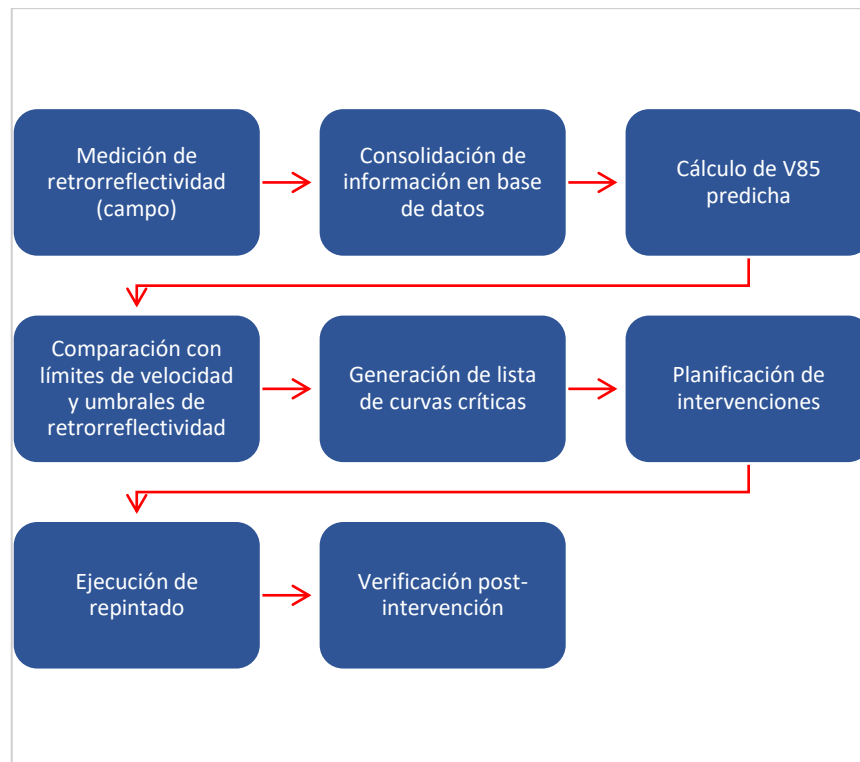
Nota. La tabla muestra la propuesta del plan de intervenciones en la infraestructura existente para lograr una mejor seguridad vial. Fuente: Elaboración propia (2026).

4.4.4 Implementación del Sistema de Monitoreo

En la figura 16 se muestra el flujo de implementación del sistema de monitoreo propuesto para seguridad vial en curvas horizontales.

Figura 16

Flujo de implementación del sistema de monitoreo propuesto



Nota. La figura muestra el flujo del sistema de monitoreo propuesto en curvas horizontales. Fuente: Elaboración propia (2026).

4.4.5 Integración con Sistemas de Gestión Vial Existentes

La solución propuesta puede integrarse con el sistema de gestión de conservación vial (SGCV) actualmente utilizado por Provías Nacional. El modelo desarrollado se implementa fácilmente en una hoja de cálculo (Excel) o como un script en Python (como el presentado en esta investigación), lo que permite su adopción inmediata sin requerir inversiones significativas en software especializado. En la tabla 14 se muestran formatos de salida sugeridos.

Tabla 14*Formatos de salida sugeridos*

Formato	Contenido	Usuario objetivo
Informe ejecutivo	Resumen de curvas críticas, presupuesto estimado	Directivos, gerentes, gestores de presupuesto
Lista priorizada	Ranking de curvas por nivel de riesgo	Ingenieros de campo
Mapa de riesgo	Visualización GIS de curvas críticas	Planificadores territoriales
Base de datos	Registro histórico de RL y V85	Analistas de seguridad vial

Nota. La tabla muestra formatos de salida propuesto para diversos gestores de la conservación vial. Fuente: Elaboración propia (2026).

4.5. Evaluación de Costos, Sostenibilidad y Viabilidad a Largo Plazo

4.5.1 Costos de diagnóstico del plan de intervención

La estimación de costos asociados al diagnóstico para la identificación del nivel de riesgo en las curvas horizontales en la vía se muestra en la tabla 15, donde se aprecia que el costo total por diagnóstico es de diecisiete mil y 00/100 Soles.

Tabla 15*Costo del diagnóstico del plan de intervención*

Costo del diagnóstico del plan de intervención		
Concepto	Descripción	Costo Estimado (S/.)
Servicio de medición de retroreflectividad de las marcas viales	82 curvas; lecturas en el PC y PT por cada línea (ejes y bordes)	8000.00
Servicio de medición de velocidades mediante radar	100 - 150 mediciones por curva	5000.00
Procesamiento de datos, Identificación de curvas críticas e informe de diagnóstico	Ingeniero de ciencia de datos	4000.00
Total por diagnóstico (S/.)		17000.00

Nota. La tabla muestra costos estimados para el diagnóstico del nivel de riesgo de las curvas. Fuente: Elaboración propia (2026).

4.5.2 Sostenibilidad de la Solución

a) **Sostenibilidad técnica.** La sostenibilidad técnica de la solución propuesta se detalla en la tabla 16.

Tabla 16

Sostenibilidad técnica

Sostenibilidad técnica	
Aspecto	Evaluación
Simplicidad del modelo	El modelo se implementa mediante algoritmo en lenguaje Python o similares, hoja de cálculo en Microsoft Excel, por lo que no requiere de software especializado
Capacitación requerida	Capacitación mínima en materia de recolección de datos (2 - 3 días para personal técnico de campo)
Intuitivo	El procedimiento puede ser ejecutado por cualquier ingeniero de transportes
Adaptabilidad	El modelo puede recalibrarse con nuevos datos en el futuro

Nota. La tabla describe los aspectos en los cuales es sostenible técnicamente la solución propuesta. Fuente: Elaboración propia (2026).

b) **Sostenibilidad institucional.** La solución propuesta mediante modelamiento predictivo puede ser adoptada por Provías Nacional o la concesionaria a cargo del mantenimiento de la vía como parte de sus procedimientos operativos estándar.

c) **Sostenibilidad ambiental.** La implementación del sistema de monitoreo mediante el modelamiento predictivo propuesto busca la prevención de accidentes vehiculares por despiste, y así reducir significativamente el riesgo de derrames de materiales peligrosos hacia fuentes hídricas.

4.5.3 Viabilidad a Largo Plazo

a) **Factores que afectan la viabilidad.** Los factores identificados, que afectan la viabilidad del sistema de monitoreo mediante el modelamiento predictivo propuesto, se describen en la tabla 17.

Tabla 17

Factores que afectan la viabilidad

Factores que afectan la viabilidad		
Factor	Riesgo	Mitigación
Disponibilidad de equipos	El retroreflectómetro puede ser costoso de adquirir o no estar disponible para alquilar	Contratación de un servicio de medición de retrorreflectividad por periodos
Rotación de personal	Pérdida de conocimiento técnico	Documentación y protocolos detallados del procedimiento
Cambios en la geometría vial	Rehabilitaciones que modifiquen radios	Actualización de la base de datos de curvas
Disponibilidad presupuestaria	Recortes presupuestarios en mantenimiento y conservación vial	Priorización de curvas críticas

Nota. La tabla describe los factores identificados que afectan la viabilidad de la solución propuesta. Fuente: Elaboración propia (2026).

b) **Horizonte de planificación.** El periodo de tiempo futuro que se considerará para proyectar las actividades necesarias para implementar la propuesta del sistema de monitoreo mediante el modelamiento predictivo, se describe en la tabla 18.

Tabla 18*Horizonte de planificación*

Horizonte de planificación	
Plazo	Actividades
Corto plazo (0-6 meses)	Medición inicial, identificación de curvas críticas y repintado urgente
Mediano plazo (6-24 meses)	Monitoreo semestral, mantenimiento preventivo
Largo plazo (>24 meses)	Recalibración del modelo con nuevos datos, evaluación de efectividad

Nota. La tabla describe el horizonte de planificación de la solución propuesta, para la ejecución de las actividades correspondientes a cada plazo de tiempo. Fuente: Elaboración propia (2026).

4.5.4 Mecanismos de Financiamiento

Entre las fuentes potenciales de financiamiento para implementar la propuesta del sistema de monitoreo mediante el modelamiento predictivo se han identificados a las descritas en la tabla 19.

Tabla 19*Fuentes potenciales de financiamiento*

Fuentes potenciales de financiamiento		
Fuente	Descripción	Aplicabilidad
Presupuesto de Provías Nacional	Partida de conservación vial	Alta
Concesión vial - Asociaciones público privadas	Obligaciones contractuales del concesionario	Alta
Cooperación internacional	Banco Interamericano de Desarrollo, Banco Mundial	Media
Canon minero	Por el impacto que tiene en la vía el desarrollo de la actividad minera	Baja

Nota. La tabla describe las posibles fuentes potenciales de financiamiento para la implementación de la solución propuesta. Fuente: Elaboración propia (2026).

CONCLUSIONES

Conclusión general

La presente investigación ha demostrado que la retrorreflectividad de las marcas viales y la geometría de la curva (radio y pendiente) influyen significativamente en la velocidad de operación nocturna (V_{85}) en las curvas horizontales de la IIRSA Sur, subtramo 5C. El modelo de regresión múltiple desarrollado ($V_{85} = 41.2354 + 0.0176 \times \text{Radio} - 0.5229 \times \text{Pendiente} + 0.0874 \times \text{RL_Promedio}$) presenta un coeficiente de determinación R^2 ajustado igual a 0.7970, lo que indica que las tres variables predictoras explican el 79.70% de la variabilidad observada en la velocidad de operación. La validación cruzada k-fold ($k=5$) confirmó la robustez del modelo con un coeficiente de determinación R^2 promedio de 0.7396 ± 0.1485 , evidenciando que el modelo es generalizable y no presenta problemas de sobreajuste. Se concluye que la velocidad de operación nocturna en curvas horizontales es el resultado de una interacción compleja entre el diseño geométrico de la vía y la calidad de la señalización horizontal, siendo posible predecirla con un nivel de confianza aceptable mediante el modelo propuesto.

Conclusiones específicas

a) Influencia de la retrorreflectividad de las marcas viales en la velocidad de operación

La retrorreflectividad de las marcas viales influye positiva y significativamente en la velocidad de operación nocturna. El coeficiente estimado β_3 para la variable predictora “retrorreflectividad promedio” en el modelo de regresión fue igual a 0.0874 ($p < 0.05$), lo que indica que,

manteniendo constantes el radio y la pendiente, por cada incremento de 1 mcd/m²/lux en la retrorreflectividad promedio, la velocidad de operación V85 aumenta en 0.0874 km/h. Este hallazgo confirma la hipótesis de investigación y tiene importantes implicaciones prácticas: una señalización horizontal de mayor calidad (con mejores niveles de retrorreflectividad) brinda mayor confianza al conductor en condiciones de manejo nocturnas, permitiéndole mantener velocidades más cercanas a las que adoptaría en condiciones diurnas. Por el contrario, niveles bajos de retrorreflectividad (< 80-100 mcd/m²/lux) inducen comportamientos más cautelosos. Se destaca que los indicadores “retrorreflectividad en la línea de eje” y “retrorreflectividad en la línea de borde” presentaron una alta correlación, dando indicios de multicolinealidad severa, lo que llevó a combinarlas en un único indicador “retrorreflectividad promedio” reflejando la realidad del mantenimiento uniforme de la señalización en la vía.

b) Influencia del radio de la curva en la velocidad de operación

El radio de la curva influye positivamente en la velocidad de operación nocturna, aunque con una magnitud moderada. El coeficiente estimado fue β_1 igual a 0.0176 ($p < 0.01$), lo que indica que, manteniendo constantes la pendiente y la retrorreflectividad, por cada metro adicional de radio, la velocidad de operación V85 aumenta en 0.0176 km/h. Este resultado es consistente con la teoría del diseño geométrico vial y con los hallazgos de Fitzpatrick et al. (2000). La implicación práctica es que un incremento de 100 metros en el radio de la curva se traduce en un aumento de aproximadamente 1.76 km/h en la velocidad de operación. Las curvas cerradas (radio < 100 m) presentan velocidades significativamente más bajas que las curvas de radio amplio (> 400 m). Este hallazgo refuerza la necesidad de prestar especial atención a las curvas de radio reducido en los

programas de gestión de seguridad vial, ya que son puntos críticos donde la velocidad de operación se reduce naturalmente, pero también donde el riesgo de despiste es mayor si la señalización no es adecuada.

c) Influencia de la pendiente promedio de la curva en la velocidad de operación

La pendiente promedio de la curva influye negativamente en la velocidad de operación nocturna, siendo el coeficiente de mayor magnitud absoluta entre las variables predictoras. El coeficiente estimado β_2 fue igual a -0.5229 ($p < 0.05$), lo que indica que, manteniendo constantes el radio y la retrorreflectividad, por cada punto porcentual de aumento en la pendiente (hacia valores más pronunciados o negativos), la velocidad de operación V85 disminuye en 0.5229 km/h. Este resultado refleja la realidad topográfica de la IIRSA Sur, que atraviesa un terreno montañoso con pendientes variables entre -8.03% y +7.73%

d) Desarrollo y validación del modelo predictivo multivariable

Se ha desarrollado y validado exitosamente un modelo de regresión lineal múltiple para estimar la velocidad de operación nocturna en curvas horizontales. El modelo final, tras resolver problemas de multicolinealidad combinando las lecturas de los coeficientes de retrorreflectividad en la línea de eje y de borde en la variable predictoras “retrorreflectividad promedio”, presenta la siguiente estructura:

$$(V_{85} = 41.2354 + 0.0176 \times Radio - 0.5229 \times Pendiente + 0.0874 \times RL_Promedio$$

La validación del modelo se realizó mediante tres enfoques complementarios, detallados a continuación.

1. Diagnóstico de supuestos. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de regresión, obteniendo:

- VIF máximo = 1.91 (multicolinealidad baja, muy por debajo del umbral de 5).
- Breusch-Pagan p-valor = 0.9954 (homocedasticidad, varianza constante).
- Shapiro-Wilk p-valor = 0.8213 (normalidad de residuales).

Todos los supuestos se cumplen satisfactoriamente, garantizando la validez de las inferencias estadísticas.

2. Validación cruzada k-fold (k=5). El modelo arrojó un coeficiente de determinación R^2 promedio igual a 0.7396 con una desviación estándar de 0.1485, lo que confirma su capacidad de generalización a curvas no utilizadas durante el entrenamiento y descarta problemas de sobreajuste.

3. Comparación con modelos existentes. El poder predictivo del modelo ($R^2 = 0.7396$) es comparable al reportado por Fitzpatrick et al. (2000) para carreteras rurales ($R^2 = 0.65-0.76$), con la ventaja adicional de incorporar la retrorreflectividad como variable predictora, lo que lo hace especialmente relevante para condiciones nocturnas.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones planteadas a continuación buscan no solo superar las limitaciones del presente estudio, sino también abrir nuevas líneas de investigación que permitan avanzar hacia una gestión de la seguridad vial basada en evidencia, donde la predicción de la velocidad de operación se convierta en una herramienta rutinaria para la priorización de inversiones y la prevención de siniestros, especialmente en condiciones nocturnas donde la retrorreflectividad de las marcas viales juega un papel crítico.

1. Modelos no lineales y de machine learning. El presente estudio utilizó regresión lineal múltiple. Se recomienda explorar modelos alternativos que podrían capturar relaciones más complejas entre las variables, tales como los mencionados a continuación.

- Regresión no lineal (incluyendo términos cuadráticos o de interacción)
- Árboles de decisión y Random Forest
- Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM)
- Redes neuronales artificiales
- Regresión de procesos Gaussianos (GPR)

2. Estudio de la relación entre velocidad predicha y siniestralidad. No se dispuso de datos históricos de accidentes desagregados por curva para este estudio. Se recomienda vincular las predicciones del modelo con los registros de siniestros de los últimos 5-10 años para establecer curvas de rendimiento en seguridad (performance functions) que relacionen la velocidad de operación predicha con la

frecuencia y severidad de accidentes. Esto permitiría identificar umbrales de velocidad crítica asociados a un aumento significativo del riesgo.

3. Incorporación de variables ambientales y de visibilidad.

La visibilidad nocturna también depende de factores ambientales como la presencia de niebla, llovizna o contaminación lumínica. Se recomienda incorporar variables que permitan verificar distancias de visibilidad y condiciones meteorológicas al momento de las mediciones de velocidad para controlar estos efectos.

4. Incorporación de variables de infraestructura complementaria. Se sugiere incorporar elementos pertenecientes a la infraestructura complementaria de seguridad vial como las mencionadas a continuación.

- Presencia y estado de la señalización vertical.
- Existencia de elementos de encarrilamiento y defensa (postes delineadores, captafaros en guardavías, tachas retrorreflectivas, etc.).
- Estado del pavimento (IRI, textura, coeficiente de fricción).
- Peralte de la curva horizontal.

REFERENCIAS

- AASHTO. (2018). *A policy on geometric design of highways and streets, 2018* (7th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alonso, J. C., & Montenegro, S. (2015). A Monte Carlo Study to compare 8 normality tests for least-squares residuals following a first order autoregressive process. *Estudios Gerenciales*, 31, 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.12.003>
- ASTM. (2018). *ASTM E1710-18 Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with CEN-Prescribed Geometry Using a Portable Retroreflectometer*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1710-18>
- ASTM. (2022). *ASTM D7585/D7585M-10 Practice for Evaluating Retroreflective Pavement Markings Using Portable Hand-Operated Instruments*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D7585_D7585M-10R22
- Babić, D., Fiolić, M., Babić, D., & Burghardt, T. E. (2024). Systematic Testing of Road Markings' Retroreflectivity to Increase Their Sustainability through Improvement of Properties: Croatia Case Study. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 6653, 16(15), 6653. <https://doi.org/10.3390/SU16156653>
- Bushnell Holdings. (2025). *Velocity Speed Gun*. <https://www.bushnell.com/additional-products/speed-guns/velocity-speed-gun/BU-101911.html>
- Cáceres, S. (2020). *Retroreflectividad de la demarcación de la carretera Panamericana Sur PE-1S* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/5493?locale-attribute=en>

- Cal y Mayor, R., & Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones* (8th ed.). Alfaomega.
- Cárdenas Grisales, James. (2015). *Diseño geométrico de carreteras* (2nd ed.). Ecoe Ediciones.
- Casanova, W., Galindo, D., Sarmiento, I., Abarca, E., & Mendoza, A. (2021). *Evaluación de la consistencia en curvas horizontales a través de la velocidad de operación, en carreteras tipo A2 de la red carretera federal*. <https://imt.mx/descarga-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNPb25lcy9QdWJsaWNhY2lvblRlY25pY2EvchQ2NDUucGRm>
- Datta, S. (2025). Modeling operating speed of mixed vehicular classes at horizontal curves on two-lane undivided rural highways. *Discover Civil Engineering* 2025 2:1, 2(1), 1–41. <https://doi.org/10.1007/S44290-025-00306-9>
- Dimauro, G. A., Cafiso, S., Ghaderi, O., & Pappalardo, G. (2025). Development of decay curve for paint pavement marking using machine learning and generalized estimation equation. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/S43065-025-00124-4/TABLES/11>
- Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., Krammes, R. A., Irizarry, N., Parma, K. D., Bauer, K. M., & Passetti, K. (2000). *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/ihsdm/99171/index.cfm>
- Garber, N. J. ., & Hoel, L. A. . (2009). *Traffic and highway engineering* (4th ed.). Cengage Learning.
- Green, S. B. (1991). How Many Subjects Does It Take To Do A Regression Analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 26(3), 499–510. https://doi.org/10.1207/S15327906MBR2603_7
- Guan, Y., Hu, J., Wang, R., Cao, Q., & Xie, F. (2024). Research on the nighttime visibility of white pavement markings. *Heliyon*, 10(16), e36533. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E36533>

- Hernández Sampieri, Roberto., Fernandez-Collado, C. F. ., & Baptista Lucio, Pilar. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Idris, I. I., Mousa, M., & Hassan, M. (2024). Modeling retroreflectivity degradation of pavement markings across the US with advanced machine learning algorithms. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 5(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/S43065-024-00094-Z/FIGURES/12>
- Khaddar, S., Pathivada, B. K., & Perumal, V. (2023). Modeling over speeding behavior of vehicles using a random parameter negative binomial approach: A case study of Mumbai, India. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 18, 100790. <https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2023.100790>
- Lamm, Ruediger., Psarianos, Basil., & Mailaender, Theodor. (1999). *Highway design and traffic safety engineering handbook*. McGraw-Hill.
- Lehmann, C. H. ., & García, Rafael. (1989). *Geometría analítica* (1st ed.). Limusa/Noriega Editores.
- Li, J., Gao, F., Lin, S., Guo, M., Li, Y., Liu, H., Qin, S., & Wen, Q. Y. (2023). Quantum k-fold cross-validation for nearest neighbor classification algorithm. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 611, 128435. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2022.128435>
- Li, J., Zhang, J., Gao, J., Peng, J., Wang, W., Mazzoni, L. N., Vasconcelos, K., Albarracín, O., Bernucci, L., & Linhares, G. (2024). Field Data Analysis of Pavement Marking Retroreflectivity and Its Relationship with Paint and Glass Bead Characteristics. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 4205, 14(10), 4205. <https://doi.org/10.3390/APP14104205>
- Martinelli, V., Ventura, R., Bonera, M., Barabino, B., & Maternini, G. (2023). Estimating operating speed for county road segments – Evidence from Italy. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(2), 560–577. <https://doi.org/10.1016/J.IJTST.2022.05.007>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Especificaciones Técnicas de Pintura para Obras Viales*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/4519540-02-2013-mtc-14>

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018a). *Manual de Carreteras Diseño Geométrico (DG-2018)*. MTC.
<https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/10438-03-2018-mtc-14>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018b). *Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial*. MTC.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_9%20MCV-2014_2016.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2024). *Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras*. MTC.
<https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/6150395-26-2024-mtc-18>
- Obeng, D. A., Owusu, V., & Tuffour, Y. A. (2021). Degradation of retro-reflectivity of thermoplastic pavement markings on trunk roads in Ghana. *Transportation Engineering*, 5, 100082. <https://doi.org/10.1016/J.TRENG.2021.100082>
- OSITRAN. (2025). *Informe de desempeño 2024: Concesión del Corredor Vial Interoceánico Sur Perú Brasil: Tramo N° 5: Matarani – Azángaro – Ilo*.
- Pisică, D., Dammers, R., Boersma, E., & Volovici, V. (2022). Tenets of Good Practice in Regression Analysis. A Brief Tutorial. *World Neurosurgery*, 161, 230-239.e6. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2022.02.112>
- Proceq. (2025). *Zehntner Marcado Retrorreflexión ZRM 6013+ RL-Qd*.
<https://www.screeningeagle.com/es/products/zehntner-zrm6013-rl-qd>
- ProInversión. (2007). *Contrato de concesión para la construcción, conservación y explotación del tramo N° 5 del proyecto corredor vial interoceánico sur Perú – Brasil*. Agencia de Promoción de la Inversión Privada.
<https://www.ositran.gob.pe/anterior/carreteras/iirsa-sur-t5/>
- Rodríguez del Águila, M. M., & Benítez-Parejo, N. (2011). Simple linear and multivariate regression models. *Allergologia et Immunopathologia*, 39, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.aller.2011.02.001>
- Said, D., Reyad, F., & Talaat, H. (2023). Developing operating speed models for elevated multilane urban arterials using artificial neural networks. *Journal of*

- Engineering and Applied Science*, 70(1), 1–25.
<https://doi.org/10.1186/S44147-023-00288-4/TABLES/17>
- Tottadi, K. K., & Mehar, A. (2024). Estimating Operating Speed on Highways using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network Technique. *Http://Tots.Upol.Cz/Doi/10.5507/Tots.2024.001.Html*, 15(2), 28–35.
<https://doi.org/10.5507/TOTS.2024.001>
- Trujillo, D. (2023). *Velocidad de operación en tangente y curva mejora la consistencia geométrica en carreteras bidireccionales. Ruta PE-3N Huánuco – Pasco 2021*. [Tesis de postgrado, Universidad Ricardo Palma].
<https://hdl.handle.net/20.500.14138/7061>
- Vallejos, C. M. C., & Bayona, G. I. P. (2021). Manual de seguridad vial para aumentar los niveles de infraestructura en las carreteras del Perú. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 5(38), 179–196.
<https://doi.org/10.29018/ISSN.2588-1000VOL5ISS38.2021PP179-196>
- Vertlberg, J. L., Jakovljević, M., Abramović, B., & Ševrović, M. (2025). Determining Factors Influencing Operating Speeds on Road Tangents. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 7549, 15(13), 7549.
<https://doi.org/10.3390/APP15137549>

APÉNDICES

Apéndice 1 matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES/DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA	RECOMENDACIONES
1. INTERROGANTE PRINCIPAL ¿Cuál es la influencia de la retrorreflectividad de las marcas viales y la geometría en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur Tramo 5C, Moquegua 2026? 2. INTERROGANTES ESPECÍFICAS a) ¿Cuál es influencia del coeficiente de retrorreflectividad promedio en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026? b) ¿Cuál es influencia del radio de la curva en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026? c) ¿Cuál es influencia de la pendiente promedio de la curva en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026? d) ¿Cómo se puede desarrollar y validar un modelo predictivo multivariable que estime con precisión la velocidad de operación en curvas horizontales a partir de la retrorreflectividad y parámetros geométricos en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026?	1. OBJETIVO GENERAL Desarrollar un modelo predictivo multivariable que estime la velocidad de operación en curvas horizontales en función de la retrorreflectividad de las marcas viales y parámetros geométricos en la red vial IIRSA Sur Tramo 5C, Moquegua 2026. 2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS a) Determinar la influencia del coeficiente de retrorreflectividad promedio sobre la velocidad de operación en curvas horizontales en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026. b) Determinar la influencia del radio de la curva sobre la velocidad de operación en curvas horizontales en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026. c) Determinar la influencia de la pendiente promedio de la curva sobre la velocidad de operación en curvas horizontales en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026. d) Desarrollar y validar un modelo predictivo multivariable para estimar la velocidad de operación en curvas horizontales a partir de la retrorreflectividad y parámetros geométricos en la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026.	1. HIPÓTESIS GENERAL La retrorreflectividad de las marcas viales y la geometría de la curva influyen de forma significativa y conjunta en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur Tramo 5C, Moquegua 2026. 2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS a) El coeficiente de retrorreflectividad promedio influye positivamente en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026. b) El radio de la curva horizontal influye positivamente en la velocidad de operación nocturna en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026. c) La pendiente promedio de la curva influye negativamente en la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026. d) El modelo predictivo multivariable basado en la retrorreflectividad de las marcas viales y parámetros geométricos permite estimar con precisión la velocidad de operación en curvas horizontales de la red vial IIRSA Sur subtramo 5C, Moquegua 2026.	Variable independiente N°1: Retrorreflectividad de las marcas viales Dimensión: Retrorreflectividad promedio Indicadores: - Coeficiente de retrorreflectividad línea de eje (mcd/m²/lux). - Coeficiente de retrorreflectividad línea de borde (mcd/m²/lux). Variable independiente N°2: Parámetros geométricos Dimensión: Geometría de la curva horizontal. Indicadores: - Radio de curva (m). - Pendiente promedio (%). Variable dependiente: Velocidad de operación. Dimensión: Velocidad de operación nocturna. Indicador: - Percentil 85 (V85) (km/h).	Tipo de investigación: - Aplicada. Diseño de la investigación: - No experimental. Ámbito de estudio: - Provincia de Moquegua. Población: - Curvas horizontales circulares de la vía IIRSA Sur subtramo 5C (267.623 km). Muestra: - 82 curvas horizontales. Técnicas de recolección de datos: - Medición directa en campo. Instrumentos: - Formato de registro de velocidad. - Formato de registro de Retrorreflectividad. - Pistola radar de velocidad. - Retrorreflectómetro horizontal. - Tablet	1. Modelos no lineales y de machine learning. 2. Estudio de la relación entre velocidad predicha y siniestralidad. 3. Incorporación de variables ambientales y de visibilidad. 4. Incorporación de variables de infraestructura complementaria. Contribución de la investigación al logro de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS): ODS 11 ciudades y comunidades sostenibles: "Proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial"

[illegible]

Apéndice 3 formato de recolección de datos de velocidad de punto

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA - ESCUELA DE POSTGRADO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
FORMATO DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE VELOCIDAD DE PUNTO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	ESCUELA DE POSTGRADO UPT	MODELO PREDICTIVO MULTIVARIABLE DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN CURVAS HORIZONTALES SEGÚN RETRORREFLECTIVIDAD Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Progresivas de la curva</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Km de inicio</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Km de fin</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #d9e1f2;">Sentido</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">Simbología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Puno - Moquegua</td> <td>P - M</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Moquegua - Puno</td> <td>M - P</td> </tr> </tbody> </table>		Progresivas de la curva		Km de inicio		Km de fin		Sentido	Simbología	Puno - Moquegua	P - M	Moquegua - Puno	M - P	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Fecha:</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Hora de inicio:</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Hora de final:</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Aforador:</td> <td>Bach. Dylan Moscoso Raurau</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9e1f2;">Supervisor:</td> <td>Dr. Osmar Cuentas Toledo</td> </tr> </tbody> </table>		Fecha:		Hora de inicio:		Hora de final:		Aforador:	Bach. Dylan Moscoso Raurau	Supervisor:	Dr. Osmar Cuentas Toledo																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Progresivas de la curva																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Km de inicio																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Km de fin																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Sentido	Simbología																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Puno - Moquegua	P - M																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Moquegua - Puno	M - P																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Fecha:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Hora de inicio:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Hora de final:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Aforador:	Bach. Dylan Moscoso Raurau																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Supervisor:	Dr. Osmar Cuentas Toledo																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Nro.</th> <th rowspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Velocidad km/h</th> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Sentido</th> </tr> <tr> <th style="background-color: #d9e1f2;">P - M</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">M - P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>16</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>17</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>18</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>19</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>21</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>22</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>23</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>24</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>25</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>26</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>27</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>28</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>29</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>30</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>31</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>32</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>33</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>34</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nro.	Velocidad km/h	Sentido		P - M	M - P	1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12				13				14				15				16				17				18				19				20				21				22				23				24				25				26				27				28				29				30				31				32				33				34				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Nro.</th> <th rowspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Velocidad km/h</th> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Sentido</th> </tr> <tr> <th style="background-color: #d9e1f2;">P - M</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">M - P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>35</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>36</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>37</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>38</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>39</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>41</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>42</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>43</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>44</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>45</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>46</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>47</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>48</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>49</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>50</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>51</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>52</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>53</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>54</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>55</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>56</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>57</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>58</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>59</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>60</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>61</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>62</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>63</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>64</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>65</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>66</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>67</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>68</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nro.	Velocidad km/h	Sentido		P - M	M - P	35				36				37				38				39				40				41				42				43				44				45				46				47				48				49				50				51				52				53				54				55				56				57				58				59				60				61				62				63				64				65				66				67				68				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Nro.</th> <th rowspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Velocidad km/h</th> <th colspan="2" style="background-color: #d9e1f2;">Sentido</th> </tr> <tr> <th style="background-color: #d9e1f2;">P - M</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">M - P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>69</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>70</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>71</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>72</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>73</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>74</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>75</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>76</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>77</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>78</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>79</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>80</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>81</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>82</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>83</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>84</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>85</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>86</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>87</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>88</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>89</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>90</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>91</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>92</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>93</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>94</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>95</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>96</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>97</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>98</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>99</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>100</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>101</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>102</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nro.	Velocidad km/h	Sentido		P - M	M - P	69				70				71				72				73				74				75				76				77				78				79				80				81				82				83				84				85				86				87				88				89				90				91				92				93				94				95				96				97				98				99				100				101				102			
Nro.			Velocidad km/h	Sentido																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	P - M	M - P																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
16																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
17																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
21																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
23																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
24																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
25																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
27																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
29																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
32																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
33																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
34																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Nro.	Velocidad km/h	Sentido																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		P - M	M - P																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
35																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
37																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
38																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
39																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
41																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
42																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
44																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
47																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
49																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
51																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
52																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
53																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
54																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
58																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
59																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
61																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
62																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
64																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
65																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
66																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
67																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
68																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Nro.	Velocidad km/h	Sentido																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		P - M	M - P																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
69																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
71																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
72																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
76																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
77																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
78																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
79																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
82																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
83																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
84																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
86																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
87																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
88																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
89																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
91																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
92																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
93																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
94																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
95																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
96																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
97																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
98																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
99																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
101																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
102																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												

Apéndice 4 panel fotográfico

Figura 17

Medición de retrorreflectividad en la línea de eje



Nota. Medición del coeficiente de retrorreflectividad en la línea de eje en curva horizontal en el corredor vial interoceánico IIRSA Sur Perú – Brasil. Fuente: Elaboración propia (2026).

Figura 18

Configuración del radar de velocidad



Nota. Configuración de radar para lecturas de velocidad instantánea nocturna. Fuente: Elaboración propia (2026).