



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**Influencia de la velocidad vehicular en la obtención del IRI con
smartphone**

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Gómez Vargas, Luis Julianno

Tutor:

MgSc. Carlos Sebastián Saldaña García

Riobamba, Ecuador. 2025.

DECLARATORIA DE AUTORIA

Yo, **Gómez Vargas Luis Julianno**, con cédula de ciudadanía **1600917940**, autor del trabajo de investigación titulado: **“Influencia de la velocidad vehicular en la obtención del IRI con smartphone”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 03 de octubre de 2025.



Gómez Vargas Luis Julianno

C.I. 1600917940



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-08.15
VERSIÓN 02: 08-03-2022

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Carlos Sebastián Saldaña García catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **"Influencia de la velocidad vehicular en la obtención del IRI con smartphone"**, bajo la autoría de **Luis Julianno Gómez Vargas** con C.I: **1600917940**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 01 días del mes de agosto de 2025



Ing. Carlos Saldaña
C.I: 0301496584

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“Influencia de la velocidad vehicular en la obtención del IRI con smartphone”**, presentado por **Gómez Vargas Luis Julianno** con cédula de ciudadanía **1600917940**, bajo la tutoría de **Ing. Carlos Sebastián Saldaña García Mgs.**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 20 de octubre de 2025.

Ing. Jorge Núñez.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

Ing. Ángel Paredes.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

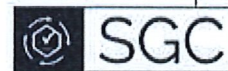
Ing. Tito Castillo PhD.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD

UNACH-RGF-01-04-02.20

VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, Gómez Vargas Luis Julianno con CC: 1600917940; estudiante de la Carrera de **Ingeniería Civil, VIGENTE**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado: "**Influencia de la velocidad vehicular en la obtención del IRI con smartphone**", cumple con el **4%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 01 de octubre de 2025

Mgs. Carlos Saldaña García
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

A Dios, por ser el cimiento principal de mi vida, fuente de todo conocimiento y sabiduría, quien me sostuvo cuando estuve a punto de caer y quien me levantó cuando estaba en mi peor momento. A Él le dedico mi vida.

A mi madre Blanca, mi mayor fuente de inspiración, quien, con su amor incondicional, entrega y sacrificio me formó y me enseñó que se pueden lograr cosas increíbles cuando se pone a Dios en primer lugar.

A mi papá Paúl, mi padre de corazón quien gracias a su amor, guía y enseñanzas formó gran parte de quien soy hoy.

A mi papá Llimmy, quien siempre me ha apoyado, alentado a hacer las cosas bien y a superarme cada día.

A ustedes, con inmensa gratitud y amor, dedico este trabajo de investigación. A quienes han forjado mi carácter y me enseñaron a luchar con entrega y honestidad por los anhelos de mi corazón.

A mi hermana Génesis, quien es el milagro que me demostró que Dios es fiel, a quien amo con todo mi corazón y estoy agradecido con Dios por tener una hermana tan maravillosa.

A mi hermano Josué, a quien amo mucho y con su amor y apoyo constante me acompañó en cada etapa de mi formación y su presencia es fundamental para mí.

Dedico también a mi familia extendida: a mis amadas abuelitas, Sarita y Edelmira; y a mis queridas tías, tíos y primos, quienes siempre me animaron a seguir y creyeron en mis capacidades.

A mi amada prima Erika, quien ha sido parte fundamental y me ha acompañado a lo largo de gran parte de mi vida.

A mi amada hija Luna, a quien extendiendo, hasta el cielo, mi más profunda gratitud y amor eterno.

Finalmente, dedico esta tesis a todas aquellas personas que han sido parte fundamental de mi historia y de mi formación personal y profesional.

Luis J. Gómez V.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar al Señor Todopoderoso, por haber infundido vida en mí, por la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta investigación, así como por bendecirme y acompañarme en todo momento.

A toda mi familia y amigos, motor de cada esfuerzo: a mis padres, Blanca, Paúl y Llimmy, por su amor y apoyo incondicional, por los sacrificios silenciosos y por inculcarme valores de responsabilidad, humildad, perseverancia y fe. A mis hermanos, Génesis y Josué, por su paciencia, comprensión y cariño constantes durante las largas horas de estudio y trabajo.

Extiendo un agradecimiento muy especial a la Universidad Nacional de Chimborazo, que me abrió sus puertas y me brindó la formación académica necesaria para desarrollarme como profesional. A mis docentes, por sus enseñanzas y ejemplo, y en particular a mi tutor de tesis, Ing. Carlos Saldaña, por su guía, dedicación y paciencia en cada etapa de este proceso, orientándome con sus valiosos conocimientos y observaciones.

A todos mis compañeros y amigos de carrera, con quienes compartí experiencias inolvidables, retos y aprendizajes valiosos que enriquecieron mi formación académica y personal. En especial, a mis queridos amigos Margarita G. y Leonardo Q., con quienes compartí la totalidad de la carrera y a quienes estimo mucho y agradezco por todo.

Reconozco también a todas las personas e instituciones que de manera directa o indirecta colaboraron en el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, con un gesto, una palabra o una acción me brindaron su apoyo durante estos años. A quienes creyeron en mí, me amaron, me cuidaron y me apoyaron. Cada uno de ustedes tiene un espacio especial en mi corazón y han dejado una huella imborrable en este camino, haciendo posible la culminación de esta meta tan significativa en mi vida.

De todo corazón, ¡gracias!

Luis J. Gómez V.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORIA.....	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR.....	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL.....	
CERTIFICACIÓN ANTIPLAGIO.....	
DEDICATORIA.....	
AGRADECIMIENTOS.....	
ÍNDICE DE TABLAS.....	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
TABLA DE ACRÓNIMOS.....	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Antecedentes.....	17
1.2 Planteamiento del problema	18
1.3 Objetivos.....	18
1.4 Justificación.....	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Antecedentes de la Investigación	20
2.2 Gestión de Pavimentos	21
2.3 Regularidad superficial del pavimento	21
2.4 Modelo de vehículo de un cuarto de carro (quarter-car)	21
2.5 Índice de Regularidad Internacional (IRI).....	22
2.6 Equipos de Primera Clase para la Medición del IRI	23
2.7 Sensores de smartphone para medición del IRI.....	24
2.8 Factores que afectan la medición del IRI con sensores de smartphone.....	24
2.9 Physics Toolbox Sensor Suite	26
2.10 Rugosímetro Merlin.....	26
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	28
3.1 Tipo de investigación.....	28
3.2 Diseño de la investigación.....	28
3.3 Diagrama metodológico	28

3.4	Técnicas de recolección de datos.....	28
3.4.1	Recolección de datos con dispositivo de primera clase Merlin.....	29
3.4.2	Recolección de datos con aplicación Physics Toolbox Sensor Suite	29
3.5	Condiciones del recorrido de recolección de datos	31
3.5.1	Velocidad del vehículo	31
3.5.2	Tipo de vehículo	32
3.5.3	Presión de los neumáticos.....	32
3.5.4	Montaje del smartphone	32
3.6	Población de estudio y tamaño de muestra.....	34
3.6.1	Número de recorridos y velocidades analizadas.....	35
3.6.2	Delimitación del tamaño de muestra inicial	35
3.7	Hipótesis Principal.....	36
3.8	Hipótesis Secundarias.....	36
3.9	Método de cálculo del IRI con Merlin.....	36
3.10	Método de cálculo del IRI con smartphone.....	37
3.10.1	Acelerómetro Lineal.....	37
3.10.2	Método RMS	37
3.11	Procesamiento de datos	38
3.11.1	Corrección en los datos GPS	38
3.11.2	Cálculo de distancia mediante GPS.....	38
3.11.3	Corrección del sesgo de aceleración.....	39
3.11.4	Filtrado de señal con Butterworth – Pasa banda.....	39
3.11.5	Suavizado de señal con filtro Savitzky–Golay	39
3.11.6	Cálculo del IRI RMS con ventana deslizante.....	39
3.11.7	Flujo lógico del script programado en Python.....	40
3.12	Correlación entre el IRI RMS e IRI con Merlin.....	40
3.12.1	Modelo de regresión lineal	40
3.12.2	Coeficiente de determinación R^2	41
3.12.3	Coeficiente de correlación de Pearson.....	41
3.12.4	Error porcentual absoluto medio (MAPE).....	42
3.12.5	Interpretación de resultados de correlación	42
3.13	Desviación estándar (σ).....	42

3.14	Coeficiente de variación (CV).....	43
3.15	Valor p en pruebas de hipótesis	43
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		44
4.1	Cálculo del IRI con Merlin.....	44
4.2	Cálculo del IRI con smartphone	45
4.3	Cálculo de la correlación entre IRI con Merlin e IRI con smartphone.....	47
4.3.1	Modelo de regresión lineal para cada dispositivo y velocidad.	48
4.3.2	Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson	50
4.3.3	Cálculo del MAPE en la estimación del IRI.....	52
4.4	Correlación de datos	54
4.5	Análisis de la influencia de la velocidad en el IRI obtenido con smartphone	57
4.5.1	Prueba de hipótesis nula	57
4.5.2	Simulación de estimación de IRI.....	58
4.5.3	Desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (CV).....	60
4.5.4	Pearson entre velocidad y el ajuste del modelo	61
4.6	Análisis de hipótesis	62
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		64
5.1	Conclusiones.....	64
5.2	Recomendaciones	65
BIBLIOGRAFÍA		67
ANEXOS		70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de IRI con Merlin.....	45
Tabla 2. IRI RMS Redmi 9s a 20 km/h	47
Tabla 3. Resumen de resultados de ajuste lineal IRI smartphone vs IRI Merlin	49
Tabla 4. Resultados de correlación de Pearson: IRI smartphone vs IRI Merlin	51
Tabla 5. MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 55 km/h.....	52
Tabla 6. Resultados de MAPE para cada dispositivo y velocidad	53
Tabla 7. Indicadores estadísticos de correlación: IRI smartphone vs IRI Merlin	57
Tabla 8. Resultados de la prueba de hipótesis para los tres indicadores	58
Tabla 9. Desviación estándar y coeficiente de variación para smartphone Redmi 9s.....	60
Tabla 10. Desviación estándar y coeficiente de variación para smartphone Redmi 11s.....	60
Tabla 11. Pearson: velocidad para desviación y CV dispositivo Redmi 9s	61
Tabla 12. Pearson: velocidad para desviación y CV dispositivo Redmi 11s	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación gráfica del modelo "Quarter-car"	22
Figura 2. IRI por niveles de comodidad (vía pavimentada)	23
Figura 3. Dispositivo de primera clase Merlin	23
Figura 4. Aplicación móvil Physics Toolbox Sensor Suite	26
Figura 5. Componentes del dispositivo Merlin	27
Figura 6. Diagrama metodológico	28
Figura 7. Calibración inicial del rugosímetro Merlin	29
Figura 8. Ubicación del equipo en el carril de avance	29
Figura 9. Opción de Multi Registro y permiso GPS	30
Figura 10. Selección de los sensores adecuados	31
Figura 11. Modelo de vehículo utilizado	32
Figura 12. Ejes de un dispositivo smartphone	33
Figura 13. Montaje del smartphone en el vehículo	33
Figura 14. Tamaño de la muestra	34
Figura 15. Flujo lógico del script programado en Python	40
Figura 16. Interpretación clásica del valor de R^2	41
Figura 17. Rangos de correlación según el coeficiente de Pearson	42
Figura 18. Resultados del IRI medido Merlin	45
Figura 19. Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 20 km/h	48
Figura 20. Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 55 km/h	49
Figura 21. Coeficiente de determinación R^2 para cada dispositivo y velocidad	50
Figura 22. Coeficiente de correlación de Pearson para cada dispositivo y velocidad	52
Figura 23. Porcentaje de error medio absoluto para cada dispositivo y velocidad	54
Figura 24. Correlación y modelo lineal smartphone Redmi 9s	55
Figura 25. Validación de datos smartphone Redmi 11s	56
Figura 26. Simulación de estimación de IRI para el dispositivo Redmi 9s	59
Figura 27. Simulación de estimación de IRI para el dispositivo Redmi 11s	59

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados del cálculo del IRI con smartphone.....	70
Anexo 2. Modelos de ajuste lineal	86
Anexo 3. Cálculos del MAPE para cada dispositivo y velocidad	91

TABLA DE ACRÓNIMOS

CSV	Comma-Separated Values (Archivo separado por comas)
CV	Coeficiente de Variación
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
Hz	Hertz (unidad de frecuencia)
IRI	Índice de Regularidad Internacional
km/h	Kilómetros por hora
MAPE	Mean Absolute Percentage Error (Error porcentual absoluto medio)
m/km	Metros por kilómetro
NEVI	Norma Ecuatoriana Vial
PMS	Pavement Management System (Sistema de Gestión de Pavimentos)
R²	Coeficiente de determinación
RMS	Root Mean Square (Raíz Cuadrática Media)
RSP	Road Surface Profiler
σ (sigma)	Desviación estándar
TRL	Transport Research Laboratory

RESUMEN

La presente investigación analiza la influencia de la velocidad vehicular en la estimación del Índice de Regularidad Internacional (IRI) utilizando smartphones. Se empleó el método RMS a partir de la aceleración vertical registrada por los sensores integrados en dos dispositivos móviles (Redmi 9s y Redmi 11s), cuyos resultados fueron comparados con los valores reales obtenidos mediante el rugosímetro Merlin, equipo de primera clase normado en Ecuador. Se realizaron recorridos sobre una vía pavimentada a ocho velocidades constantes entre 20 y 55 km/h, registrando los datos mediante la aplicación Physics Toolbox Sensor Suite y procesándolos con scripts desarrollados en Python. El análisis estadístico incluyó modelos de regresión lineal, coeficiente de correlación de Pearson, MAPE, desviación estándar y coeficiente de variación. Los resultados muestran que la velocidad no influye significativamente en la correlación entre los valores de IRI estimados y los reales, pero sí afecta estructuralmente la dispersión y la estabilidad de los modelos generados. Se concluye que el método propuesto es viable, de bajo costo y confiable, permitiendo estimaciones precisas del IRI mediante smartphones, siempre que se controle adecuadamente el procesamiento de la señal y las condiciones del recorrido.

Palabras clave: Smartphone, IRI, velocidad vehicular, RMS, regresión lineal, rugosímetro Merlin, sensores inerciales, variabilidad estructural

ABSTRACT

This research analyzes the influence of vehicle speed on the estimation of the International Roughness Index (IRI) using smartphones. The RMS method was applied based on vertical acceleration recorded by the built-in sensors of two mobile devices (Redmi 9s and Redmi 11s), and the results were compared with actual IRI values obtained using the Merlin device, a first-class device standardized in Ecuador. Data collection was conducted on a paved road at eight constant speeds, ranging from 20 to 55 km/h, using the Physics Toolbox Sensor Suite application. Data was processed using custom Python scripts. Statistical analysis included linear regression models, Pearson's correlation coefficient, MAPE, standard deviation, and coefficient of variation. The results show that speed does not significantly affect the correlation between estimated and actual IRI values; however, it does impact the dispersion and stability of the generated models. It is concluded that the proposed method is viable, low-cost, and reliable for estimating IRI using smartphones, if signal processing and test conditions are properly controlled.

Keywords: Smartphone, IRI, vehicle speed, RMS, linear regression, Merlin profiler, inertial sensors, structural variability.



Reviewed by:

Mgs. Sofía Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La principal filosofía y enfoque de una adecuada gestión vial se basa en que la inversión del Estado debe ser igual o lo más cercana posible al costo asumido por los usuarios de la infraestructura vial, puesto que es imprescindible en el desarrollo económico de una zona poblada, ya que gracias a ello se generan conexiones necesarias para el crecimiento y emprendimiento de diversas actividades públicas y privadas. De igual modo, “en América Latina, el 80 % de los pasajeros se transportan por medio de las carreteras. Asimismo, más del 60 % del transporte de carga también lo hacen por las carreteras, esto indica que la infraestructura vial es sumamente importante, ya que permite la interconexión entre ciudades, regiones y países; por ello, es necesario asegurar el funcionamiento y mantenimiento constante de las mismas.” [1].

Por otro lado, “La gestión de pavimentos es una disciplina de la ingeniería que tiene por misión especificar todas aquellas acciones de mantenimiento que, aplicadas en el tiempo, mantengan el nivel de servicio de una red vial sobre un mínimo deseable” [2]. Por ello, considerando la importancia que tiene el estado de la infraestructura vial y su impacto en lo social, económico e incluso político, resulta fundamental asegurar que las vías se mantengan en condiciones adecuadas. No obstante, tanto en el pasado como en la actualidad, en el Ecuador persiste un déficit en la gestión y mantenimiento vial, especialmente por parte de los gobiernos autónomos descentralizados (GAD) y otras entidades públicas responsables, que en muchos casos carecen de las herramientas y estrategias necesarias para una gestión eficiente.

En este contexto, el Índice de Regularidad Internacional (IRI) es un señalizador estadístico de la regularidad superficial, resume el perfil longitudinal, es el valor del movimiento vertical acumulado del asiento del que conduce el vehículo en una distancia determinada. El Índice de Regularidad Internacional (IRI) es una medida universal utilizada para evaluar la regularidad superficial de los pavimentos. Cuando las vías urbanas presentan un bajo nivel de serviciabilidad, se ven comprometidas la seguridad como el confort de los usuarios, lo que puede derivar en un aumento de accidentes de tránsito, mayores tiempos de viaje, mayor emisión de gases contaminantes y presencia de polvo en suspensión. Además, el mal estado de las vías acelera el desgaste de los vehículos, generando mayores costos de mantenimiento para la ciudadanía. Esta situación contradice el principio fundamental de una gestión vial eficiente, que establece que el costo asumido por los usuarios debe ser equivalente o proporcional a la inversión realizada por el Estado o entidad responsable de la infraestructura vial [3].

Por ello, proponer una alternativa de bajo costo para medir el IRI en las vías urbanas del cantón Riobamba, mediante el uso de “*smartphones*” y vehículos convencionales, representa una iniciativa de gran relevancia y potencial beneficio para los habitantes de la provincia de Chimborazo. Contar con una herramienta accesible y confiable para determinar la regularidad superficial de las vías permitiría mejorar los procesos de toma de decisiones en la gestión vial, mantener niveles adecuados de serviciabilidad y garantizar mayor

seguridad y confort para los usuarios. Este estudio busca aportar a un enfoque más integral y sostenible en el uso y mantenimiento de la red vial en la provincia, contribuyendo así al desarrollo territorial y al bienestar de las generaciones presentes y futuras.

1.2 Planteamiento del problema

La medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI) está regulada por la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI), que establece una escala común y estandarizada para evaluar la regularidad superficial de las vías. Esta norma permite correlacionar las mediciones realizadas con diferentes tipos de equipos clasificados en las clases 1, 2 y 3.

No obstante, en Ecuador persisten deficiencias significativas en la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial. Muchas entidades responsables, como los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD), carecen de herramientas técnicas adecuadas para realizar mediciones confiables del IRI, lo que limita la implementación de acciones preventivas y correctivas oportunas, conllevando un deterioro prematuro de las carreteras y mayores costos de mantenimiento.

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado aplicaciones móviles que permiten estimar el IRI utilizando los sensores integrados en los smartphones. Estas herramientas representan una alternativa de bajo costo y requieren menos recursos humanos y logísticos. Si bien estas aplicaciones presentan ciertas limitaciones en cuanto a precisión frente a los equipos tradicionales como el Merlin, pueden considerarse viables para contextos específicos por su eficiencia y accesibilidad [4].

Sin embargo, los mismos autores advierten que factores externos como la velocidad del vehículo, el tipo de neumáticos o el tipo de automóvil pueden afectar los resultados obtenidos con smartphones. Por ello, se recomienda que futuras investigaciones analicen el impacto de estas variables para mejorar la confiabilidad del método.

En este contexto, se hace necesario evaluar hasta qué punto estas variables externas — particularmente la velocidad del vehículo — influyen en la correlación entre las mediciones del IRI obtenidas mediante smartphones y las realizadas con equipos de referencia.

Así, esta investigación plantea la siguiente interrogante:

¿Cómo influye la velocidad del vehículo en la correlación entre las mediciones de IRI obtenidas con smartphones y aquellas registradas con equipos tradicionales?

1.3 Objetivos

General

- Analizar la influencia de la velocidad vehicular en la obtención del IRI con smartphone.

Específicos

- Medir el IRI mediante un equipo de primera clase.
- Estimar el IRI utilizando los sensores de aceleración y ubicación de un smartphone variando la velocidad de recorrido en la toma de datos.
- Establecer una correlación entre los valores del IRI obtenidos con el equipo de primera clase y los obtenidos con el smartphone.

1.4 Justificación

Al tener como antecedente investigaciones previas en la aplicación de dispositivos móviles para la medición del IRI en las distintas carreteras de nuestro país, es fundamental continuar desarrollando este método de medición y ajustándolo cada vez más a valores precisos como los que un dispositivo de primera clase arrojaría. En este contexto, es importante considerar que existen múltiples factores que tienen incidencia directa tanto en la toma de datos como en el cálculo de IRI a través de smartphone, siendo una de estas variables de gran incidencia la velocidad con la que se realiza el recorrido vehicular en la toma de datos, motivo por el cual la presente investigación plantea el conocer el impacto de la velocidad en la relación entre las mediciones de IRI obtenidas con smartphones y aquellas registradas con equipos de primera clase, esto permitirá a futuro poder ajustar estos valores para que se asemejen a la realidad de la regularidad de la vía.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

En múltiples investigaciones realizadas a nivel internacional, se ha planteado como eje central el diseño de métodos alternativos para poder medir la regularidad superficial del pavimento de una vía mediante los sensores que un smartphone posee. Esta línea de investigación ha cobrado relevancia debido a que los métodos tradicionales para medir el índice de regularidad internacional (IRI) de una vía, al menos en nuestro país resultan deficientes en efectividad y rapidez.

En Ecuador, el dispositivo de primera clase de uso común tanto en instancias académicas de investigación, técnicas y de gestión vial en los gobiernos autónomos descentralizados (GADs municipales) es el dispositivo Merlin, que debido a su método preciso y probado múltiples veces a lo largo de los años, se ha establecido como referencia normativa en cuanto a cálculo del IRI en Ecuador.

Investigaciones previas que han desarrollado el diseño de métodos alternativos para medir la regularidad superficial del pavimento han arrojado conclusiones interesantes. Como que se ha demostrado que “las mediciones de regularidad del pavimento basadas en smartphone expresan una buena correlación ($R^2 = 0.76$) respecto al índice de regularidad internacional (IRI) medidas por Road Surface Profiler” [5]. Además, los autores también destacan que:

Las opiniones de los usuarios sobre la regularidad del pavimento presentaron una buena correlación ($R^2 = 0.8$) con las mediciones de regularidad estimadas mediante smartphones. Esto enfatiza que los smartphones pueden representar la regularidad del pavimento de forma compatible con la percepción de confort de los usuarios. Por lo tanto, los smartphones pueden utilizarse como herramienta válida para estimar el nivel de irregularidad de una vía [5].

De igual modo, múltiples autores han llegado a la realización de que existen múltiples factores a tomar en cuenta al momento de realizar una estimación del IRI de una vía empleando los sensores integrados en un smartphone. Muchos de estos no tienen que ver únicamente con el dispositivo móvil, sino que van desde, el tipo de vehículo, la suspensión de este, la presión de sus neumáticos, la velocidad a la que se realiza el recorrido, la sensibilidad y configuración de fábrica de los sensores del smartphone, etc. Tal como lo expresa la recomendación dada en [4], “Investigaciones futuras podrían enfocarse en analizar más a fondo el impacto de las variables externas, como la velocidad del vehículo, el tipo de neumáticos o el tipo de vehículo, en la medición del IRI con smartphones.”

Ahora bien, centrándonos en la variable de la velocidad del vehículo, “Varios estudios han demostrado que la aceleración vertical medida está directamente relacionada a la velocidad del vehículo” [6]. Y puesto que, el sensor más importante en la estimación del IRI con smartphone es el acelerómetro lineal, pues es de suma importancia conocer cuál es el efecto real que tiene la velocidad del vehículo en los datos captados por el acelerómetro, de modo que esta investigación centra su enfoque en determinar dicho efecto.

2.2 Gestión de Pavimentos

La gestión de pavimentos es el procedimiento de toma de decisiones para el mantenimiento y preservación de la infraestructura vial [7]. En este procedimiento se incluyen etapas como la planificación, programación y ejecución de actividades tanto de mantenimiento preventivo como correctivo, así como de rehabilitación todo con el fin de que la infraestructura mantenga un nivel de servicio adecuado y confort para el usuario. Usualmente, este tipo de actividades requieren de una importante inversión, pero lo que es crucial para su correcta implementación es la información disponible del estado de la vía.

Es por tal motivo que se fomenta la implementación de un Pavement Management System (PMS), es un sistema estructurado de recolección y análisis de datos sobre las condiciones del pavimento. Y como se establece en [8] su principal función es “desarrollar estrategias de tratamiento que garanticen condiciones óptimas del pavimento, al menor costo posible tanto a corto como a largo plazo”.

2.3 Regularidad superficial del pavimento

El estado en el que se encuentra la capa superficial del pavimento de cualquier vía viene determinado por diversos factores tanto en su diseño y construcción, como por el desgaste acumulado por el paso del tiempo en la estructura del pavimento. La regularidad que presenta el pavimento de una vía a lo largo de su longitud es el factor principal que determina el estado de la vía en general, y su importancia recae en que como lo indica [9] “La regularidad es una de las características más importantes del pavimento, ya que tiene efectos directos en la seguridad vial, el confort de los usuarios y el costo operativo de los vehículos.”. De modo que, al definir qué es la regularidad superficial del pavimento de una vía estamos hablando acerca de la medida entre las variaciones en la elevación del perfil longitudinal del pavimento de una vía. Esta medida representa directamente cuán lisa o irregular es la superficie de rodadura y tiene incidencia directa en los distintos indicadores que se utilizan para emplear una gestión vial adecuada, por ejemplo, el IRI que pese a su nombre en inglés (International Roughness Index) indica en su nombre como traducción literal que es un índice de rugosidad, lo que en realidad mide la regularidad de la superficie del pavimento.

2.4 Modelo de vehículo de un cuarto de carro (quarter-car)

Este es un modelo matemático que simula la respuesta vertical de un vehículo simplificado como su nombre lo indica en un “cuarto de carro” al circular sobre un perfil de pavimento. Motivo por el cual, únicamente representa una sola rueda con su respectiva suspensión, como si el vehículo se dividiera en cuatro partes iguales [10]. Ejemplificado de la siguiente manera:

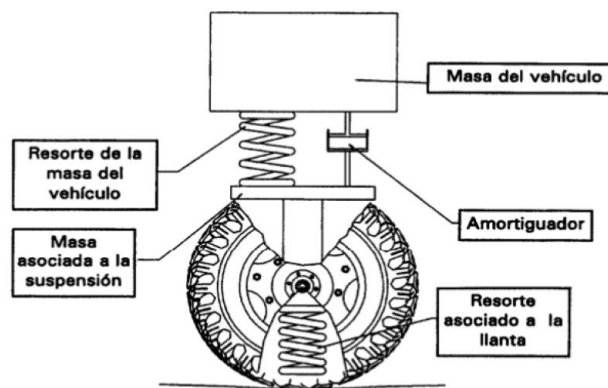


Figura 1. Representación gráfica del modelo "Quarter-car"

2.5 Índice de Regularidad Internacional (IRI)

Desarrollado por el Banco Mundial en 1986 Índice de Regularidad Internacional (IRI) es una medida cuantitativa de evaluación de la regularidad de la superficie del pavimento longitudinal de una vía. Esta medida se ha convertido en el estándar para evaluar la condición superficial de las vías, así como su nivel de servicio. Este indicador es uno de los principales que se emplean al momento de realizar gestión de pavimentos ya que es una medida en m/km que dependiendo de su magnitud sirve para caracterizar en qué estado se encuentra una vía, incluso dividiéndola por tramos para tener mayor precisión, a través de un procedimiento matemático el cual explicado según [6] es:

El procedimiento matemático simula un modelo de vehículo de un cuarto de carro (quarter-car) estandarizado circulando a una velocidad de 80 km/h sobre el perfil de la carretera. El IRI es una unidad de pendiente (por ejemplo, metros por kilómetro) calculada a partir del movimiento acumulado de la suspensión del modelo de cuarto de carro, dividido por la longitud del tramo evaluado.

Como se menciona anteriormente, el IRI al ser una medida de pendiente cuyo valor puede ser más alto o bajo, tiene la siguiente interpretación “ $IRI \leq 2.5$ m/km es considerado para condición muy buena de la vía, $2.5 < IRI \leq 3.5$ m/km representa una condición buena de la vía, $3.5 < IRI \leq 6$ m/km representa una condición regular de la vía, y $6 < IRI \leq 10$ m/km representa una condición mala de la vía” [6].

O como lo expresa la normativa vigente para Ecuador [11] en su tabla de:

DESCRIPCIÓN DE LA COMODIDAD PARA LA CIRCULACIÓN	IRI (m / km)
V > 120 km / h Ondulaciones apenas perceptibles a 80 km / h, en el rango de IRI de 1.3 a 1.8. No hay abultamientos ni ojos de pescado. Depresiones < 2 mm/3m. Mezcla asfáltica o tratamiento superficial de alta calidad.	< 2.5
V = 100 – 120 km / h Percepción de movimientos moderados y ondulaciones suaves a 80 km / h. Depresiones, parches y ojos de pescado ocasionales (5 – 15 mm / 3m, con frecuencia de 1 a 2 cada 50 m). Desprendimientos poco profundos (por ejemplo, desprendimientos de gravilla en un tratamiento superficial). Superficie con ondulaciones amplias y abultamientos moderados.	4.0 – 5.5
V = 70 – 90 km / h Movimientos fuertes y balanceo del vehículo. Depresiones y parches frecuentes pero de moderada magnitud (15 – 20 mm / 3m). Ojos de pescado ocasionales (1 a 3 en 50 m). Superficie con ondulaciones y abultamientos fuertes.	7.0 – 8.0
V = 50 – 60 km / h Movimientos repentinos frecuentes y balanceos, asociados con defectos graves como depresiones profundas (20 – 40 mm / 3m) y frecuentes (6 – 20 / 100m) u ojos de pescado (4 – 6 / 50m)	9.0-10.0
V < 50 km / h Depresiones y ojos de pescado frecuentes y profundos (40 – 80 mm) con frecuencia de 10 – 20 / 50 m	11.0 – 12.0
Notas: - El valor "V" se refiere a la velocidad normal de circulación sobre una carretera recta y seca, sin la interferencia de otros usuarios. - Las condiciones de circulación corresponden a la sensación que tiene el usuario al rodar por la carretera con un vehículo de tamaño medio. - Dentro de la descripción de las fallas, se omiten los agrietamientos por carecer de peso dentro de la estimación de la regularidad de la superficie.	

Figura 2. IRI por niveles de comodidad (vía pavimentada)

2.6 Equipos de Primera Clase para la Medición del IRI

Este tipo de equipos empleados para medición de IRI, son aquellos que cumplen con los estándares establecidos por el modelo desarrollado por el World Bank, la ASTM y otros organismos. El principal parámetro que deben cumplir independientemente del método en el que lo haga es que deben capturar el perfil longitudinal de la capa de rodadura superficial de la vía con alta resolución, es decir, con precisión milimétrica. En la actualidad se emplean dispositivos que incorporan láseres, sensores inerciales u otros métodos de precisión, los cuales son costosos y requieren de personal técnico capacitado.

Algunos de los equipos de primera clase más usados incluyen:

- Merlin: Es un dispositivo mecánico portátil desarrollado por el Transport Research Laboratory (TRL), este utiliza una barra oscilante para estimar la regularidad del pavimento a lo largo de su perfil longitudinal en mediciones tomadas cada dos metros. Es una herramienta confiable y económica para mediciones en campo [12].



Figura 3. Dispositivo de primera clase Merlin

- **Perfilómetros Láser:** Empleados ampliamente en auditorias de infraestructura vial, estos dispositivos de alta precisión emplean tecnología láser para capturar la regularidad del pavimento a lo largo del perfil longitudinal de la carretera [13].
- **Road Surface Profiler (RSP) o Vehículos de Inspección Móvil:** Son vehículos diseñados de forma específica para medir el IRI y otros indicadores de una vía, estos están equipados combinando sensores inerciales, cámaras de alta velocidad y escáneres láser para registrar la regularidad superficial y generar informes detallados del estado del pavimento [14].

2.7 Sensores de smartphone para medición del IRI

Según la revisión bibliográfica de investigaciones especializadas en el tema, los principales sensores integrados de fábrica en un smartphone que son cruciales para estimar el IRI de una vía a través de este método son los siguientes:

- Acelerómetro lineal
- Giroscopio
- GPS

Estos sensores, al captar información en tiempo real, dependiendo de la aplicación que se emplee pueden recolectarse un volumen suficiente de datos que a través de un correcto filtrado y procesamiento, pueden emplearse para estimar el IRI de una carretera. Puesto que, como expresan los autores de [5] “Los smartphones están equipados con sensores como acelerómetros, giroscopios y GPS integrados en un dispositivo de bajo costo y con un nivel aceptable de precisión”. Al hacerse énfasis en la precisión “aceptable” de los sensores integrados de un celular, dependiendo de la gama del dispositivo y su costo, los resultados pueden presentar variabilidad entre dispositivos, sin embargo, seguimos hablando de una única inversión por tres sensores que se usan en la estimación del IRI. De modo que, como se resalta en [15] este método “busca aprovechar las capacidades del smartphone, midiendo las aceleraciones generadas por las vibraciones provocadas por la regularidad del pavimento durante la conducción de un vehículo, y evaluando la relación entre el Índice de Regularidad Internacional (IRI) y dichos datos”.

Es así, que como se especifica en diversos estudios, el sensor con el cual se puede calcular el IRI a través de un smartphone es el acelerómetro lineal. Debido a que este permite captar la señal que genera la regularidad del pavimento a lo largo de su perfil longitudinal ya que al registrar la aceleración en los tres ejes del dispositivo (x, y, z), básicamente captura el movimiento del teléfono en el recorrido de un vehículo en la vía.

2.8 Factores que afectan la medición del IRI con sensores de smartphone

Como se ha mencionado, existen múltiples factores que pueden influir en la precisión y el ajuste de los valores de estimación de IRI obtenidos con smartphone, muchos de estos implican directamente al dispositivo móvil y muchos otros son factores relacionados con el vehículo en el que se realiza el recorrido de recolección de datos, sin embargo, es importante mencionar que tanto para uno como otro existen variables que, si son controlables y estandarizables, pero también existen otras que no. En resumen, según diversas fuentes los principales factores que afectan la medición del IRI relacionados con el smartphone son:

1. Frecuencia de muestreo: tiene incidencia directa en la estimación del IRI por lo que como indica [6], “La frecuencia de muestreo de un smartphone, cuando se utiliza para evaluar la regularidad, debería limitarse al rango de entre 80 y 120 Hz.”
2. Gama del dispositivo: dispositivos de mayor costo y por ende de gama más elevada, pueden tener sensores con menor ruido y mayor resolución al momento de captar las vibraciones necesarias para este método.
3. Ubicación del smartphone dentro del vehículo: Es sumamente importante estandarizar el procedimiento para la toma de datos mediante los sensores del smartphone, por lo que, la ubicación y qué tan fijo se encuentre el dispositivo durante el recorrido del vehículo en la vía es crucial para conseguir resultados computables, ya que si el dispositivo no se encuentra ubicado correctamente ni fijo este irá captando señales que no tienen relación con la regularidad del pavimento a lo largo de la vía, tal como expresa [6], “el sistema de montaje y posición del smartphone en el vehículo puede afectar los valores de aceleración vertical registrada en un +/- 15%”.
4. Calibración del acelerómetro lineal del smartphone: Como se mencionó, dependiendo de la gama del dispositivo, la sensibilidad y calibración de sus distintos sensores puede variar, entre estos el más crucial es el acelerómetro por lo que conocer que este es un factor que puede cambiar considerablemente el cálculo de IRI con smartphone es importante, según diversas fuentes y como expresa [6], “La alta resolución de los acelerómetros en un teléfono inteligente permite potencialmente la detección de pequeños cambios en la aceleración vertical medida. Sin embargo, en algunos modelos de teléfonos, pueden presentarse problemas con los sensores de aceleración que causan errores aleatorios debido a problemas de fabricación, tales como el desalineamiento del sensor (lo que provoca un error de sesgo en la medición de la aceleración)”.

Por otro lado, los factores relacionados con el vehículo que influyen en la medición del IRI con smartphone son los siguientes:

1. Velocidad del Vehículo: La sensibilidad y precisión de los sensores de un smartphone puede verse afectada por variaciones en la velocidad del vehículo durante el recorrido [16]. De igual modo, resultados concluyentes obtenidos a través de múltiples simulaciones del cálculo del IRI usando el método RMS en función de la aceleración vertical [6], identifican que “El Grms simulado aumenta logarítmicamente con la velocidad. Un incremento del 93 % en Grms con un aumento del 266 % en velocidad (de 30 a 80 km/h).” Es decir que conforme varía la velocidad del vehículo también varía la estimación del IRI mediante el método RMS, incluso para el mismo tramo.
2. Tipo de vehículo: también tiene un impacto directo entre los valores arrojados por la medición del IRI con smartphone, “pueden presentarse diferencias entre tipos de vehículos de hasta el 190%” [6].
3. Rigidez y amortiguación de la suspensión: “Presentan cambios del 5-15% en variaciones de ambas variables del $\pm 20\%$ de rigidez y amortiguación de la suspensión” [6].

4. Masa suspendida: Este factor se refiere tanto a la masa proporcional a cada vehículo como también a la masa que lleva el vehículo, especialmente cuando consideramos pasajeros adicionales al momento de realizar la toma de datos, puesto que como indica una investigación especializada basada en simulación “Cada 70 kg (equivalente a un pasajero adicional) añadidos a la masa suspendida generan una disminución aproximada del 5 % en la medición” [6].
5. Aceleración/Frenado del vehículo: “Cambio de 3 %–7 % en el Grms simulado debido a variaciones en el comportamiento de conducción” [6].

2.9 Physics Toolbox Sensor Suite

Esta es una aplicación para smartphones desarrollada por Vieyra Software, cuyo principal enfoque es el registro en tiempo real de múltiples parámetros, a través de los sensores integrados en celular, como acelerómetro, giroscopio, magnetómetro, sensores de luz, sensores de sonido, GPS, etc [17].

Esta aplicación móvil es ampliamente utilizada en entornos académicos y de investigación debido a su accesibilidad para su versión básica de forma gratuita, así como su facilidad de uso y principalmente la capacidad que tiene para exportar los datos registrados en formato .csv, facilitando el análisis posterior en herramientas como Excel, Python o MATLAB.

En el caso de esta investigación, se empleó la aplicación *Physics Toolbox Sensor Suite* para registrar los datos captados por el acelerómetro lineal del smartphone, obteniendo el valor de la aceleración vertical lo cual permitió estimar el Índice de Regularidad Internacional (IRI) mediante el método RMS.



Figura 4. Aplicación móvil Physics Toolbox Sensor Suite

Además, la aplicación permite ajustar la frecuencia de muestreo, seleccionar sensores específicos a través de su opción de “Multiregistro”, así como también visualizar gráficos en tiempo real si se dispone de la versión “pro”, lo que la convierte en una opción viable y de bajo costo para experimentación en campo [17].

2.10 Rugosímetro Merlin

Este es un dispositivo de primera clase como se indicó anteriormente, su origen se remonta a los años 90 al ser diseñado y desarrollado por el Transport and Road Research Laboratory (TRRL) del Reino Unido, con el fin de ofrecer una alternativa económica y de metodología y resultado robusto para países en vías de desarrollo. Su funcionamiento está basado en “medir la desviación vertical de la superficie del pavimento respecto a una cuerda ficticia

uniendo los apoyos delantero y trasero, registrando el movimiento con un puntero sobre papel” [18].

Las mediciones que toma este dispositivo están diseñadas para darse en un intervalo de cada 2 m y tras completar un número determinado de mediciones a intervalos regulares, dependiendo de la longitud del tramo para la que se requiera calcular el IRI, usualmente regulado por la normativa de nuestro país en un rango de 100 a 400 m, se traza un histograma de frecuencias de las mediciones descartando el 5% de datos a ambos lados para poder obtener la distancia “D” que se convierte a IRI mediante la fórmula:

$$IRI = 0,593 + 0,0472 * D \quad (2,4 \leq IRI \leq 15,9 \text{ m/km})$$

Los principales componentes de este dispositivo de primera clase se pueden apreciar en la siguiente ilustración [18]:

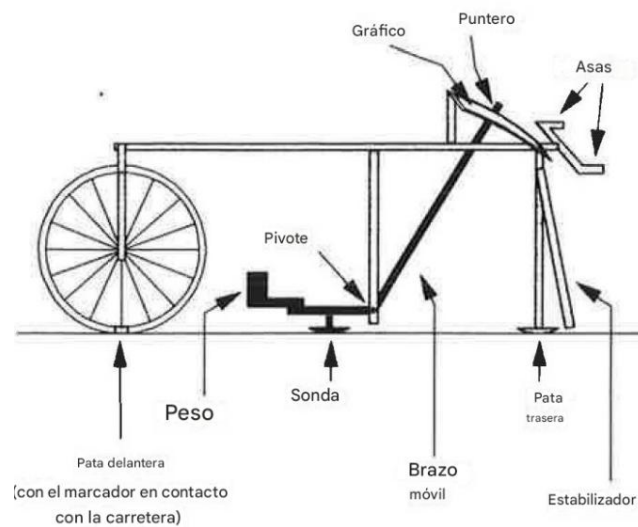


Figura 5. Componentes del dispositivo Merlin

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo cuantitativo ya que se va a trabajar de forma analítica con los datos del IRI obtenido con equipo de primera clase y con smartphone para determinar como la velocidad vehicular influye en el factor de correlación entre ambos métodos.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental transversal. Específicamente, es de tipo experimental porque se manipulan deliberadamente las variables, en este caso la variable de la velocidad vehicular al medir el IRI con smartphone para después analizar los resultados obtenidos. Una investigación experimental es “un estudio de investigación en el que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias de esa manipulación sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos), dentro de una situación de control para el investigador” [19], además es de tipo transversal porque en la presente investigación se tomará datos del IRI del pavimento en su estado natural, para luego determinar cuál es la influencia de la velocidad vehicular al tomar el IRI con smartphone en relación con el IRI con un equipo de primera clase.

El diseño experimental de esta investigación es de tipo transeccional porque se recolectarán datos en fechas determinadas [20].

3.3 Diagrama metodológico

De forma general, la presente investigación seguirá el siguiente flujo metodológico, el cual resume las etapas principales del proceso desarrollado:

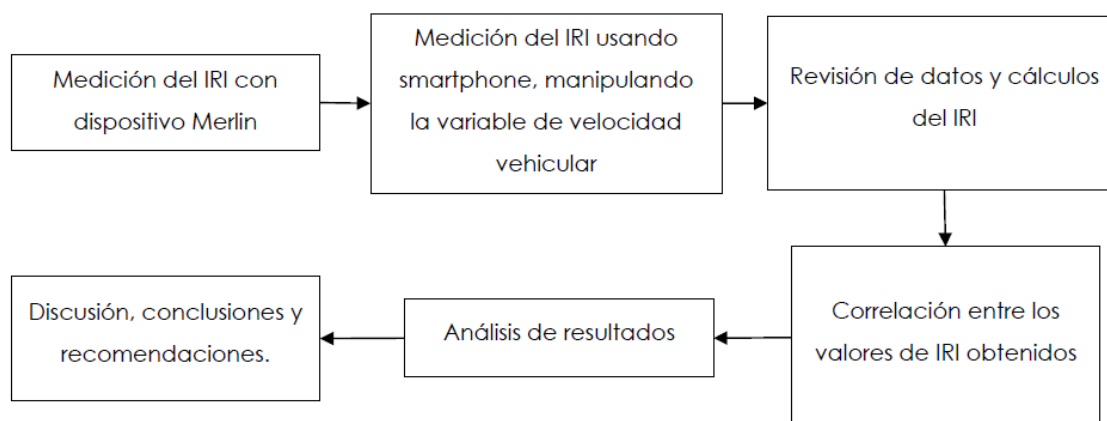


Figura 6. Diagrama metodológico

3.4 Técnicas de recolección de datos

Las técnicas empleadas para la recolección de datos en la presente investigación giran principalmente en torno a dos dispositivos, el dispositivo de medición de regularidad superficial de pavimentos de primera clase Merlin, y el uso de los sensores integrados en los smartphones para la recolección de datos de aceleración y GPS, a través de una aplicación móvil que facilita la recolección y exportación de datos para su posterior procesamiento y

cálculo. Ambos métodos de recolección de datos siguieron un procedimiento estandarizado a fin de garantizar su replicabilidad y la validez de los datos y posteriormente de los resultados obtenidos en la presente investigación.

3.4.1 Recolección de datos con dispositivo de primera clase Merlin

Según lo establecido en la normativa ecuatoriana NEVI-12, y el método estandarizado para realizar la medición de la regularidad superficial de una vía empleando este dispositivo, primero se debe realizar la calibración de este, se debe colocar el dispositivo sobre una superficie nivelada, y calibrar el pivote y el peso para que el puntero en el grafico de medición a escalas se encuentre apuntando inicialmente al valor de 25.



Figura 7. Calibración inicial del rugosímetro Merlin

Las mediciones en la vía se deben tomar en un intervalo de 2 metros y en tramos de 400 metros, es decir cada 200 registros, siguiendo la línea que ocupa una de las llantas del vehículo para así cumplir con lo normado por la NEVI-12 [11] y el método que emplea el modelo de “cuarto de carro”.



Figura 8. Ubicación del equipo en el carril de avance

3.4.2 Recolección de datos con aplicación Physics Toolbox Sensor Suite

Para realizar el registro y exportación de datos a través de la aplicación móvil Physics Toolbox Sensor Suite, en primer lugar, se debe configurar el smartphone para realizar un

correcto registro de toda la información, por lo cual es sumamente importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se debe configurar el dispositivo móvil para que la pantalla no se apague durante el registro de datos en el recorrido de la vía en vehículo.
- Siempre es importante verificar que la opción de “Ubicación” se encuentre activada en el panel de control del dispositivo, puesto que, de no ser así los datos registrados por el GPS siempre marcarán valores para la Latitud y Longitud de 0, haciendo el registro total inválido debido a que no será posible calcular la distancia.
- Es importante verificar el método de exportación de resultados en archivo .csv que suele arrojar el aplicativo ya que, en registros muy largos en cuanto a tiempo, y dependiendo del dispositivo y su frecuencia de muestreo el archivo puede pesar más de 30 mb por lo que el mejor método para almacenar estos registros de datos es a través de la nube mediante Google Drive, asegurándose de identificar correctamente el archivo y su contenido para el posterior procesamiento.

Una vez tomado en cuenta esto, el procedimiento para tomar datos se resume en lo siguiente: Instalar y abrir el aplicativo, otorgando todos los permisos necesarios para emplear los sensores del smartphone.

Dirigirse a la pestaña de menú representada por las tres líneas y en la sección de “Combinación” seleccionar la opción de “Multi Registro” y otorgar los permisos GPS.

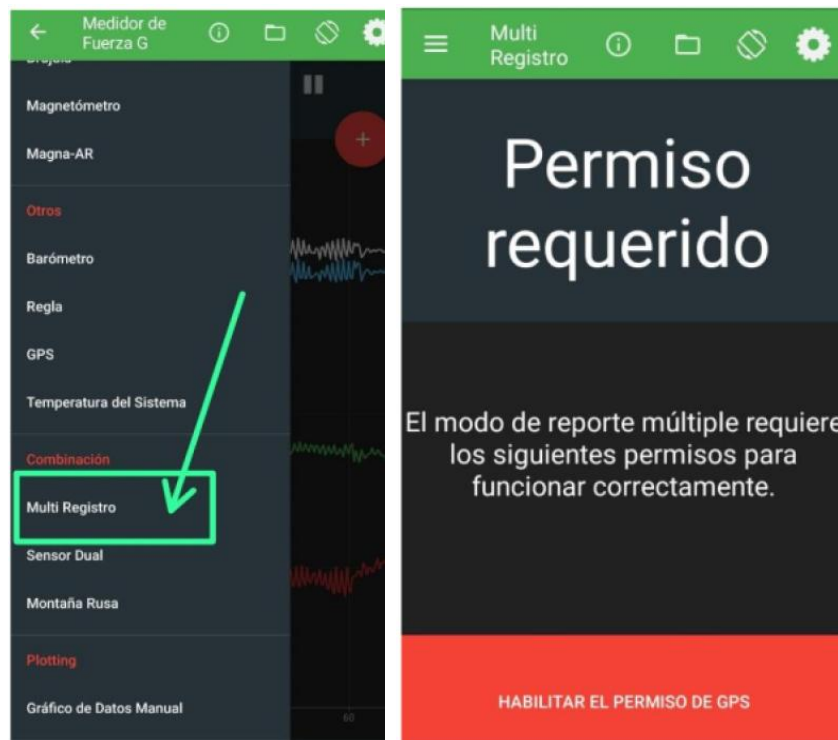


Figura 9. Opción de Multi Registro y permiso GPS

Una vez realizado esto, se debe seleccionar las opciones de sensores importantes para poder estimar el IRI con smartphone, los cuales son, “Acelerómetro Lineal”, “Giroscopio” y “GPS” tal como se indica en la figura 10:



Figura 10. Selección de los sensores adecuados

Al estar seleccionadas dichas opciones para iniciar el registro de datos simplemente se debe dar clic en el botón rojo con un “+” para que la aplicación comience a grabar los datos, y una vez se complete el recorrido de la vía se debe volver a dar clic en dicho círculo rojo y registrar adecuadamente el nombre del archivo y tomar en consideración lo establecido al momento de exportar el archivo .csv.

3.5 Condiciones del recorrido de recolección de datos

Las condiciones en las que se realiza el registro de datos de los sensores del smartphone son cruciales para obtener resultados determinantes, especialmente si se trata de un método en desarrollo como es el caso para la presente investigación. Como ya fue mencionado en el Capítulo II, existen diversos factores que tienen incidencia directa en la precisión y efectividad de la estimación del IRI con smartphone, como la velocidad del vehículo, la presión de los neumáticos, el tipo de vehículo, el montaje y posición del dispositivo, etc.

3.5.1 Velocidad del vehículo

Es la variable independiente del presente trabajo de investigación, la más importante puesto que como ya se estableció con anterioridad, esta influye directamente en la estimación de IRI por el método RMS de la aceleración vertical captada por el sensor del smartphone. Directamente se evaluará y determinará la influencia real que tiene la velocidad del vehículo, por lo que, en cuanto a lo que condiciones para el recorrido se refiere, se eligieron 8 velocidades para realizar el recorrido de una misma vía, y controlando de la manera más rigurosa posible los otros factores que puedan incidir en los resultados. Las velocidades escogidas para realizar el mismo recorrido mientras se registran y almacenan los datos de los sensores del smartphone fueron escogidas priorizando la seguridad y replicabilidad de

este método en distintas condiciones viales, ya sea urbanas o rurales. Se escogen velocidades de: 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55 km/h.

3.5.2 Tipo de vehículo

Una de las variables que influye directamente en los resultados que se podrían obtener, puesto que, junto con el tipo de vehículo vienen determinadas otras consideraciones importantes, como la suspensión del vehículo, su masa, entre otros. Sin embargo, para la presente investigación se decidió estandarizar el tipo de vehículo empleado para todos los recorridos de registro de datos a las distintas velocidades ya establecidas. Se escogió un modelo de tipo hatchback, vehículo Hyundai Grand I10 año 2019 como el que se aprecia en la figura 11:



Figura 11. Modelo de vehículo utilizado

Las características de este modelo según el folleto técnico oficial de Hyundai Motor Company [21], el Grand i10 2019 mide 3 765 mm de longitud, cuenta con un motor de 1.197 cm³ que desarrolla hasta 83 PS 83 PS (≈ 61 kW) a 6 000 rpm, tiene **tracción** delantera (FWD), neumáticos 165/65 R14, y suspensión delantera: McPherson y trasera: Barra de torsión.

3.5.3 Presión de los neumáticos

Es otra de las variables controladas para el recorrido de registro de datos, en Ecuador no existe un valor mínimo legal estricto de presión para los neumáticos de un vehículo, pero esta debe consultarse según las recomendaciones del fabricante. Por lo que, según las recomendaciones dadas por Hyundai para el modelo escogido, se estableció una presión constante en los cuatro neumáticos de 30 psi.

3.5.4 Montaje del smartphone

Una de estas variables que afectan la medición y posterior cálculo es el montaje y la posición del dispositivo dentro del carro para realizar el registro de información, se debe tener siempre presente lo siguiente:

- El sensor de acelerómetro lineal de un smartphone usualmente viene configurado de fábrica para registrar las aceleraciones en los tres ejes locales de un dispositivo tal como se aprecia en la figura 12:

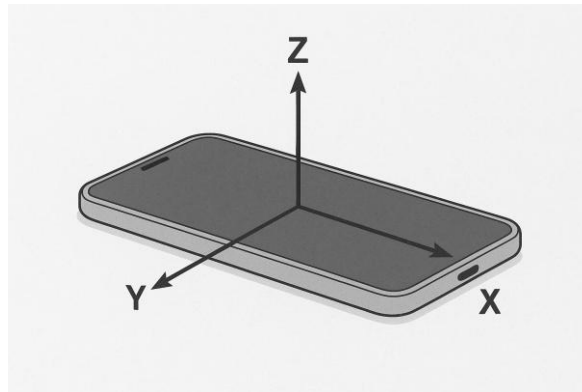


Figura 12. Ejes de un dispositivo smartphone

De modo que, al realizar una estimación del IRI a través del método RMS es decir de la raíz cuadrática media de la aceleración vertical, como es lógico es vital determinar cuál de los sensores está capturando la vibración producida por la regularidad del pavimento de una vía, representada en una de las componentes de la aceleración. Es así como, el smartphone preferentemente debe colocarse acostado al igual que en la figura 12, con la pantalla mirando hacia arriba y con su lado más largo apuntando hacia la dirección de avance del vehículo, aunque esto en última instancia no es relevante realmente.

Lo que, si cobra gran relevancia es el anclaje del dispositivo, por lo que este debe estar fijo en una posición dentro del vehículo, y permanecer fijo en dicha posición durante todo el recorrido del vehículo para la toma de datos, lo ideal sería anclar el dispositivo a la carrocería del vehículo, pero para la presente investigación se realizó como se aprecia en la figura 13:



Figura 13. Montaje del smartphone en el vehículo

Como se puede apreciar, se utilizó el espacio propio proporcionado por algunos automóviles para la colocación de smartphones, y se fijó los dispositivos con cinta, para evitar que estos se movieran de su posición establecida y ya estandarizada para los diferentes recorridos de registros de datos a realizar, para esta investigación se emplearon dos smartphones y ambos fueron colocados en el espacio ilustrado, ya que cabían a la perfección.

Se hace especial énfasis en que los dispositivos no puedan moverse libremente durante el registro de información porque de esta manera, las vibraciones captadas representarán con mayor fidelidad la regularidad presentada por la superficie del pavimento de la vía que se recorra con el vehículo durante la recolección de datos, evitando datos erróneos provocados por el choque de un dispositivo con otro, o el choque o golpeo de un dispositivo con el tablero del carro.

3.6 Población de estudio y tamaño de muestra

La población del presente estudio está conformada por una vía del cantón Guano, en la provincia de Chimborazo, se trata de la vía Guano – Ilapo cuya longitud total es de 12,3 km y conecta la ciudad de Guano con el pueblo de Ilapo. Se trata de una vía asfaltada con pendiente en ascenso y ciertos descensos puntuales en su trayecto, esta es una vía sinuosa ya que en su longitud y al ser una vía de montaña tiene considerable cantidad de curvas, algunas muy cerradas.

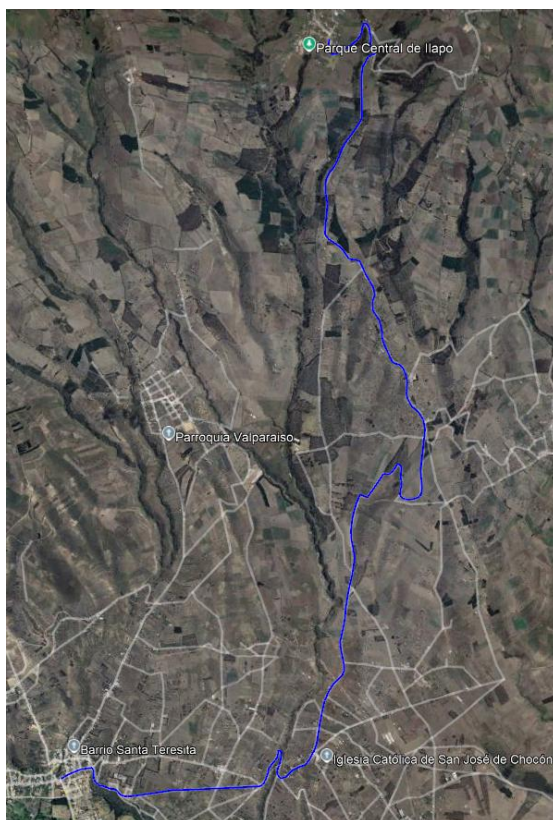


Figura 14. Tamaño de la muestra

Si bien se reconoce las limitaciones al tener una única vía como tamaño de muestra para esta investigación, la vía en cuestión ofrece condiciones técnicas relevantes para evaluar la viabilidad del método propuesto y, sobre todo, determinar la influencia real que tiene la velocidad del vehículo en este tipo de mediciones. Y si bien los resultados no podrían generalizarse estadísticamente a otras tipologías viales, sí proporcionan una base sólida e información valiosa para estudios exploratorios y futuros análisis más exhaustivos, principalmente si se trata de ajustar las diversas variables que influyen en la medición del IRI con smartphone.

3.6.1 Número de recorridos y velocidades analizadas

A fin de tener una base estadística más sólida en el procesamiento de datos, se determinó que el mínimo de recorridos de la vía es tres recorridos para cada una de las ocho velocidades establecidas anteriormente de, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55 km/h, puesto que, al registrar datos para dos smartphones distintos, no fue suficiente la validación arrojada entre ambos, ya que en la toma de datos y registro pueden existir diversos errores de medición o humanos, que influyan en el resultado final, por lo que se determinó que la validación de datos se dieran entre el mismo dispositivo pero para los distintos recorridos realizados a la misma velocidad constante. Obteniendo como resultados, un incremento significativo en la capacidad de predicción del modelo lineal planteado para cada dispositivo y su respectiva velocidad, expresado en su valor de R^2 así como en el coeficiente de correlación de Pearson de los valores de IRI RMS ajustados a los del IRI real obtenido mediante Merlin.

3.6.2 Delimitación del tamaño de muestra inicial

Debido a las limitaciones en recursos y tiempo, fue necesario delimitar el tamaño de muestra inicial de 12,3 km que representa la totalidad de la vía Guano – Ilapo, esto debido a que también es fundamental destacar que el fin de esta investigación no es determinar la viabilidad o el nivel de correlación que existe entre un IRI calculado mediante un dispositivo de primera clase como el Merlin y un IRI estimado a través de los sensores integrados en un smartphone, puesto que esto ya ha sido validado por múltiples estudios que han profundizado en el tema y estandarizado un método confiable para estimar el IRI con smartphone mediante el método RMS de la aceleración vertical captada por el sensor.

En este contexto, debido a que los recursos debían destinarse al procesamiento de datos, desarrollo de un modelo, validación y evaluación de la influencia de la velocidad del vehículo en la estimación del IRI, la recolección de datos con el dispositivo de primera clase Merlin se realizó en tres salidas de campo, en la cuales se tomaron en total 14 tramos de la vía, es decir, se cubrió una longitud de 5,6 km, 5 tramos fueron levantados en la primera salida de campo, 5 tramos en la segunda salida de campo y 4 tramos en la tercera salida de campo. El objetivo de seguir este procedimiento fue ir ajustando los valores de IRI con smartphone ya obtenidos para la totalidad de la vía, con los valores de IRI reales, hasta obtener resultados estadísticamente concluyentes según lo demostrado por la capacidad de predicción del modelo simple de regresión lineal para cada velocidad y dispositivo, expresado a través de su R^2 y el coeficiente de correlación de Pearson entre los datos reales y las estimaciones. Además, revisando en fuentes bibliográficas confiables se ha determinado que es válido realizar modelos de regresión lineal, análisis de correlación y validación de datos con 14 puntos como lo es en este caso de investigación, si se cumplen ciertas condiciones adicionales para dar robustez a la estadística detrás del estudio, así como lo explica [19] “En estudios experimentales exploratorios, un número reducido de observaciones puede ser suficiente para obtener correlaciones válidas, siempre que los datos sean confiables, no exista valores atípicos y se apliquen indicadores estadísticos robustos como el R^2 o el coeficiente de Pearson”.

En este contexto, como lo indican otras fuentes [6] el mínimo aceptable de observaciones por variable puede ser de 10 a 15 para modelos simples. Cuando se habla de regresión lineal simple, una cantidad de 12 a 15 datos pueden ser suficientes para obtener R^2 válido, si se lo respalda con otros indicadores estadísticos como en este caso se usa el coeficiente de correlación de Pearson, y el error porcentual medio absoluto.

3.7 Hipótesis Principal

- **Hipótesis Nula (H_0):** La velocidad vehicular no influye significativamente en la correlación entre los valores del IRI obtenidos mediante smartphone y los valores de referencia obtenidos con el equipo Merlin.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** La velocidad vehicular sí influye significativamente en la correlación entre el IRI estimado con smartphone y el IRI medido con Merlin.
 - Variable Dependiente: Correlación entre IRI con smartphone e IRI medido con Merlin
 - Variable independiente: Velocidad vehicular (km/h)

3.8 Hipótesis Secundarias

- **Hipótesis Secundaria 1**
 - **H_0 :** A velocidades constantes bajas (por ejemplo, 20–25 km/h), no se obtiene una mayor correspondencia entre el IRI estimado con smartphone y el IRI medido con Merlin.
 - **H_1 :** A velocidades constantes bajas, sí se obtiene una mayor correspondencia entre el IRI estimado con smartphone y el IRI medido con Merlin.
- **Hipótesis Secundaria 2**
 - **H_0 :** La velocidad vehicular no influye significativamente en la dispersión ni en el coeficiente de variación de los modelos de estimación del IRI contruidos a partir de aceleraciones RMS obtenidas con smartphone.
 - **H_1 :** La velocidad vehicular sí influye significativamente en la dispersión y en el coeficiente de variación de los modelos de estimación del IRI, reduciendo la necesidad de ajuste a medida que esta aumenta.

3.9 Método de cálculo del IRI con Merlin

El cálculo del IRI con el equipo Merlin se realizó según lo establecido por la normativa NEVI-12 [11], por lo que se sigue este procedimiento:

1. Segmentación por tramos: Se toman un total de 200 lecturas de Merlin para establecer el tramo estándar de la presente investigación, es decir, 400 m.
2. Se realiza un histograma de frecuencias para cada 200 lecturas, y en este se descarta el 5% de los datos en los extremos inferior y superior del histograma, lo que representado en número de lecturas a eliminar tanto en un extremo como en el otro son 10.
3. Se identifica las clases afectadas por el proceso de descarte y se las representa como clases fraccionadas de ser necesario.

4. Se calcula el desvío total D , expresado en milímetros con la siguiente fórmula:

$$D = (N_{clases} + f_{inf} + f_{sup}) * s$$

Donde:

N_{clases} = número de clases intermedias completas

f_{inf} = fracción restante de la clase inferior

f_{sup} = fracción restante de la clase superior

s = factor de escala del equipo MERLIN = 5 mm

5. Se realiza el cálculo del IRI en función del siguiente criterio condicional:

$$IRI = \begin{cases} 0.0485 \times D, & \text{si } 0.593 + 0.0471 \times D \leq 2.4 \\ 0.593 + 0.0471 \times D, & \text{si } 0.593 + 0.0471 \times D > 2.4 \end{cases}$$

3.10 Método de cálculo del IRI con smartphone

El método desarrollado para calcular el IRI con smartphone se constituye de diversas componentes, pero principalmente se centra en la raíz cuadrática media (RMS) de la aceleración vertical registrada por el dispositivo durante el recorrido del vehículo en la vía mediante la aplicación Physics Toolbox Sensor Suite que permitió realizar un Multi Registro junto con los datos del GPS y exportar esta información en formato .csv para su posterior análisis.

3.10.1 Acelerómetro Lineal

El sensor más importante en la estimación del IRI con smartphone es el acelerómetro lineal integrado en los celulares, puesto que, el método empleado para obtener el IRI con estos datos es el método RMS (Root Mean Square) es decir, la raíz cuadrática media de la aceleración vertical captada por el smartphone, esta se representa como una señal de la vibración de la superficie del pavimento en función de la distancia recorrida. Sin embargo, esta “señal” puede contener mucho “ruido” provocado por diversos factores externos, desde la vibración del chasis o del tablero del vehículo, o hasta el ruido del propio motor. Motivo por el cual, es importante que a esta señal que se obtiene en bruto se la procese de forma adecuada antes de aplicar el método RMS para estimar el IRI.

3.10.2 Método RMS

El método RMS consiste en calcular el valor cuadrático medio de la señal de aceleración vertical ya filtrada representada como $az, f(t)$ dentro de cada tramo de análisis establecido como lo más cercano posible a 400 m, de modo que al momento de ajustar estos valores a los del IRI real medido con Merlin, exista una correspondencia física real en los datos, y estos puedan correlacionarse. El valor obtenido mediante este método puede emplearse como una estimación indirecta de la regularidad superficial del pavimento, puesto que, mayores valores de aceleración vertical implican directamente mayor irregularidad en la superficie de rodadura. Motivo por el cual, este método requiere de un ajuste inicial empírico con valores de IRI reales, para desarrollar un modelo capaz de estimar un IRI cercano a la realidad de la vía [15].

La fórmula para el cálculo del IRI RMS es:

$$IRI\ RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{z,f,i}^2}$$

Donde:

IRI RMS = valor cuadrático medio de la aceleración vertical

$a_{z,f,i}$ = aceleración vertical en el instante i , después del filtrado,

N = número total de muestras por tramo

3.11 Procesamiento de datos

Una vez obtenidos los registros de datos necesarios para la estimación del IRI mediante RMS, lo cuales son la aceleración vertical y los registros del GPS mediante la aplicación escogida, inicialmente se decidió procesar dicha información mediante Excel, sin embargo, esto fue descartado rápidamente debido a que, el volumen de información y cantidad de datos obtenidos en algunos registros superaba las 300 000 lecturas, por lo que realizar cálculos en Excel se volvió inviable debido a que el software se tornaba lento por cada mínima operación matemática. En este contexto, se optó por realizar el procesamiento de datos mediante scripts programados en el lenguaje Python, empleando librerías especializadas como pandas, numpy, scipy.signal y geopy. Las cuales contienen las funciones y cálculos necesarios para el método establecido.

3.11.1 Corrección en los datos GPS

Antes de empezar a hacer cualquier cálculo, es importante considerar lo siguiente:

- La aplicación móvil Physics Toolbox Sensor Suite, en ciertos casos suele presentar el primer o los primeros datos con valores de 0, lo cual representa un problema especialmente cuando se va a calcular la distancia usando la fórmula de Haversine, porque esto resulta en saltos de distancia completamente irreales que afectan la posterior formación de tramos estrictos de aproximadamente 400 metros necesarios para este método.
- Dependiendo del dispositivo smartphone y su gama, el sensor de GPS puede presentar irregularidades o “saltos” que también afectan la conformación de tramos reales para estimar el IRI RMS.

Por lo que, al ser tomadas en cuenta estas consideraciones, se implementaron en la lógica del script de cálculo del IRI RMS, porque como ya se enfatizó con anterioridad, el que los tramos conformados por este método tengan correspondencia física con los tramos reales del IRI Merlin, es vital para poder realizar un estudio válido y que refleje realmente el impacto de la velocidad en estas estimaciones de IRI.

3.11.2 Cálculo de distancia mediante GPS

Se utilizó la fórmula de Haversine para determinar la distancia real, recorrida entre registros consecutivos:

$$d = 2r * \arcsen \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta Lat}{2} \right) + \cos(Lat_1) * \cos(Lat_2) * \sin^2 \left(\frac{\Delta Long}{2} \right)} \right)$$

Donde:

$r = \text{radio terrestre } (\approx 6371 \text{ km})$

$Lat \text{ y } Long = \text{Latitud y Longitud en radianes}$

3.11.3 Corrección del sesgo de aceleración

Se restó el valor de la gravedad estándar (9.81 m/s^2) a la aceleración vertical para obtener la aceleración neta:

$$a_{z,corr} = a_z - 9.81$$

3.11.4 Filtrado de señal con Butterworth – Pasa banda

Es una combinación de dos tipos de filtrado de señal, al combinar un filtro pasa bajos y pasa altos, con un filtro electrónico digital reconocida por tener una respuesta en frecuencia lo más plana posible en la banda pasante, sin ondulaciones. Se vuelve ideal para aislar la señal que se desea capturar, en este caso, la señal correspondiente a la vibración generada por la regularidad de la superficie del pavimento, esto se logra cambiando los parámetros del filtro para que se centre en un determinado rango de frecuencias que capturen adecuadamente la señal deseada [22].

3.11.5 Suavizado de señal con filtro Savitzky–Golay

Por otro lado, este tipo de filtro suaviza la señal ya previamente filtrada, realizándolo mediante un ajuste local de polinomios por mínimos cuadrados. Esto para una determinada ventana de puntos m , y ajustándose a un polinomio de grado k , dichos parámetros también deben ser establecidos en función del tipo de señal que se desea suavizar, en este caso una señal de aceleración vertical. Obteniendo de esta forma, la muestra central suavizada sin perder detalles importantes de la señal como pendientes o picos, volviendo este filtro un método ideal para preservar características relevantes de señales de aceleración [22]. Y procediendo después con el cálculo del IRI RMS.

3.11.6 Cálculo del IRI RMS con ventana deslizante

Al implementar una ventana deslizante en el cálculo del IRI RMS, se asegura que los tramos obtenidos del procesamiento de datos, sean lo más ajustado posible al tramo real establecido de 400 metros, este método para acumular distancia se trata de un subconjunto de datos que se desplaza a lo largo de la señal de forma secuencial, yendo punto por punto o en saltos definidos, como es en este caso que se establece una tolerancia dimensional de distancia de ± 5 metros a partir del tramo de 400 metros.

En este contexto, la ventana deslizante acumula una cierta cantidad de muestras consecutivas, y se usa para calcular un valor de RMS por tramo de longitud deseada.

Cada vez que esta ventana avanza, se genera un nuevo cálculo de RMS, lo que permite estimar el IRI en distintos tramos consecutivos.

Nuevamente haciendo énfasis en la importancia de que los tramos que van a ser ajustados deben tener correspondencia física directa, es decir, que un tramo de IRI RMS, contenga la misma información, que su respectivo valor de referencia del IRI real para el mismo tramo.

3.11.7 Flujo lógico del script programado en Python

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que resume la lógica estructural del script desarrollado en Python para el procesamiento automatizado de los datos recolectados con smartphone. Este script integra las diferentes etapas metodológicas descritas previamente:

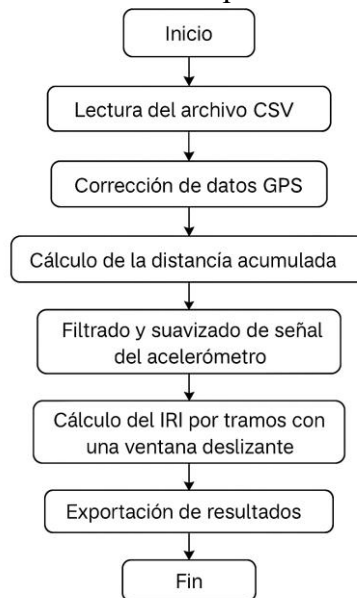


Figura 15. Flujo lógico del script programado en Python

3.12 Correlación entre el IRI RMS e IRI con Merlin

A fin de evaluar la correspondencia y correlación existente entre los valores de IRI estimados con smartphone mediante el método RMS y los valores de referencia es decir, el IRI real de la vía medido con equipo de primera clase Merlin, se aplicó un análisis de regresión lineal, debido a la simplicidad del modelo en cuanto a funciones aplicables y seguridad de no sobre ajustar los valores, además de su alta capacidad de extrapolación en la estimación del IRI, además de análisis adicionales para sustentar los resultados y evaluar la correlación entre ambas variables cuantitativas.

3.12.1 Modelo de regresión lineal

Se implementó un modelo de regresión lineal simple entre el valor obtenido de la aceleración vertical mediante el método RMS por tramo, en este caso denominada como a_{RMS} y el IRI resultante del equipo Merlin. La forma general de la regresión aplicada para cada dispositivo y velocidad es:

$$IRI_{RMS} = a \cdot a_{RMS} + b$$

Donde:

IRI_{RMS} = IRI estimado con smartphone

a = pendiente del modelo

b = ordenada al origen,

a_{RMS} = valor RMS de la aceleración vertical por tramo

Esta regresión se calculó para cada velocidad vehicular de recorrido y ambos smartphones (Redmi 9s y Redmi 11s) permitiendo identificar la sensibilidad del modelo frente a los cambios de velocidad.

3.12.2 Coeficiente de determinación R^2

Siguiendo con lo anterior, a partir del modelo de regresión lineal simple generado para cada dispositivo y velocidad, se emplea como indicador principal de correlación y precisión del modelo el coeficiente de determinación R^2 , que mide qué proporción de la variabilidad del IRI de referencia (Merlin) es explicada por el modelo basado en el método RMS:

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \right]$$

Donde:

y_i = IRI medido con Merlin

$\hat{y}_i$ = IRI estimado por el modelo de regresión

$\bar{y}$ = valor promedio del IRI con Merlin

Un valor de R^2 cercano a 1 indica una correlación fuerte entre ambas mediciones. Y según lo han establecido diversas investigaciones en el tema [23] la interpretación clásica que se le dan a los valores del coeficiente de determinación R^2 son las siguientes, expresada en la Figura 16

R^2	Interpretación Clásica
0.00 – 0,25	Muy débil
0,25 – 0,50	Débil a moderada
0,50 – 0,75	Moderado a fuerte
0,75 – 1,00	Fuerte a excelente

Figura 16. Interpretación clásica del valor de R^2

3.12.3 Coeficiente de correlación de Pearson

Además, se calculó también el coeficiente de correlación de Pearson (r), como medida de correlación lineal entre los valores de IRI obtenidos por ambos métodos. Expresando a través de la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2} \right]}$$

Donde:

x_i y y_i = valores emparejados de a_{RMS} e IRI Merlin,

$\bar{x}$ y $\bar{y}$ = promedios de cada variable.

Según este método, el coeficiente de correlación de Pearson (r) varía entre -1 y 1. Valores cercanos a ± 1 indican una fuerte relación lineal. Y adicional a esto, si los valores de R^2 y r son cercanos ($r \approx R^2$), se confirma una relación lineal positiva [24].

En la Figura 17 se puede apreciar los rangos de valores en los que el coeficiente de correlación de Pearson explica, que tan fuerte es la relación lineal entre dos variables cuantitativas:

$r = 1$	correlación perfecta.
$0.8 < r < 1$	correlación muy alta
$0.6 < r < 0.8$	correlación alta
$0.4 < r < 0.6$	correlación moderada
$0.2 < r < 0.4$	correlación baja
$0 < r < 0.2$	correlación muy baja
$r = 0$	correlación nula

Figura 17. Rangos de correlación según el coeficiente de Pearson

3.12.4 Error porcentual absoluto medio (MAPE)

Adicionalmente, se calculó el error porcentual absoluto medio (MAPE) entre los valores estimados de IRI (modelo RMS) y los valores medidos con Merlin, como una métrica complementaria de precisión:

$$MAPE = \left(\frac{100}{n} \right) \sum |IRI_{RMS1} - IRI_i|$$

Esta métrica representa el promedio de las diferencias absolutas por tramo entre ambos métodos. Su interpretación es directa: cuanto menor sea el MAPE, mayor será la concordancia entre el modelo estimado y el equipo de referencia.

Según investigaciones que han profundizado en la interpretación del error porcentual absoluto medio en modelos de predicción o estimación, los umbrales generales establecen que un valor menor al 5% indica una precisión muy alta del modelo, y un MAPE cercano al 10% indica una alta precisión en la capacidad de estimación del modelo generado [25].

3.12.5 Interpretación de resultados de correlación

Tanto el valor de R^2 como el MAPE y el coeficiente de Pearson fueron utilizados como indicadores complementarios de la correlación y precisión entre los métodos. Un R^2 alto, un MAPE bajo y un coeficiente de Pearson cercano a ± 1 reflejan una alta capacidad del modelo basado en smartphone para replicar los resultados del equipo MERLIN bajo determinadas condiciones de velocidad.

3.13 Desviación estándar (σ)

En estadística, la desviación estándar (σ) es una medida indicativa que muestra que tan dispersos se encuentran los datos respecto a la media del conjunto [26], esta se expresa en las mismas unidades originales de los datos y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

$\bar{x}$ = *promedio muestral*

n = *tamaño de la muestra*

Una desviación estándar alta indica que los valores están más dispersos, mientras que una σ baja muestra que se encuentran más cerca del promedio. Este indicador estadístico permitirá mostrar la variabilidad de los modelos de regresión generados y estabilidad interna del ajuste del modelo.

3.14 Coeficiente de variación (CV)

El coeficiente de variación (CV) es una medida estadística de dispersión relativa, que permite identificar la variabilidad entre distintos conjuntos de datos [27]. Esta se expresa en unidades de porcentaje, y es especialmente útil cuando se desea comparar modelos de diferentes magnitudes. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$CV\% = \left(\frac{s}{\bar{x}} \right) * 100$$

Donde:

s = *desviación estándar*

$\bar{x}$ = *promedio muestral*

El CV% se emplea para evaluar la estabilidad relativa de los modelos de regresión de cada dispositivo a distintas velocidades constantes de recorrido. Un menor CV indica un modelo más estable, con menor dispersión relativa en sus estimaciones de IRI.

3.15 Valor p en pruebas de hipótesis

Esta es una medida de carácter comprobatorio, para la o las hipótesis planteadas en un trabajo de investigación como el presente. Se emplea con el propósito de determinar la credibilidad de la hipótesis nula planteada en función de los datos o resultados obtenidos [28]. El valor “p” indica cuál es la probabilidad de la certeza de la hipótesis nula evaluada, según el siguiente rango:

- $p < 0.05$, La hipótesis nula se rechaza.
- $p > 0.05$, La hipótesis nula no se rechaza.

Esta prueba de hipótesis se empleará sobre los resultados del análisis de la correlación entre el IRI estimado con smartphone y el IRI de referencia con equipo Merlin, aplicando la prueba en los resultados del coeficiente de determinación R^2 , el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el error porcentual absoluto medio (MAPE).

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos, del registro y procesamiento de datos, realizado según lo estipulado en el capítulo III del presente trabajo de investigación, aplicando los métodos y procedimientos necesarios para procesar la señal obtenida de la vibración de la regularidad del pavimento, puesto que, conforme se fue realizando el procesamiento de datos y cálculo, se evidenció la necesidad de filtrar y suavizar la señal original de la aceleración vertical, a modo que esta representara estrictamente la regularidad de la vía, para así poder estimar el IRI de forma precisa, posteriormente se realizó el cálculo del IRI con equipo de primera clase Rugosímetro Merlin y cálculo del IRI con smartphone a través del método RMS. Una vez se obtuvieron los resultados primordiales para poder llevar a cabo el objetivo planteado, se procedió con la validación de datos, para poder respaldar de forma estadística los resultados que se obtendrán a partir de dicho punto, ya que para realizar el cálculo de la correlación entre el IRI con Merlin y el IRI con smartphone, fue necesario determinar de forma concluyente que el método RMS para estimar el IRI mediante los sensores integrados en un smartphone es válido. Finalmente, llegando así al análisis de la influencia de la velocidad en el IRI obtenido con smartphone y los análisis de las hipótesis planteadas.

Es así que, el presente capítulo se divide en los siguientes subcapítulos:

- 4.1. Cálculo del IRI con Merlin
- 4.2. Cálculo del IRI con smartphone
- 4.3. Cálculo de la correlación entre IRI con Merlin e IRI con smartphone
- 4.4. Validación de datos
- 4.5. Análisis de la influencia de la velocidad en el IRI obtenido con smartphone
- 4.6. Análisis de hipótesis.

4.1 Cálculo del IRI con Merlin

Una vez realizado el levantamiento de información con el equipo de primera clase Merlin, los datos obtenidos fueron utilizados para calcular el IRI en tramos de 400 metros, resultando en un total de 14 tramos que representan una longitud vial de 5,6 km. Según lo explicado en el capítulo de metodología. Se tomaron 200 registros para armar los respectivos histogramas de frecuencias de cada tramo y se descartó el 5% de datos a cada extremo del histograma, obteniendo el valor de D con el cual se calculó el IRI de cada tramo según lo establecido por la normativa ecuatoriana.

En la Figura 18 se puede apreciar los resultados del cálculo del IRI con el dispositivo de primera clase Merlin según la distancia que representa en la vía, expresado por la abscisa en la que termina el tramo al que representa:

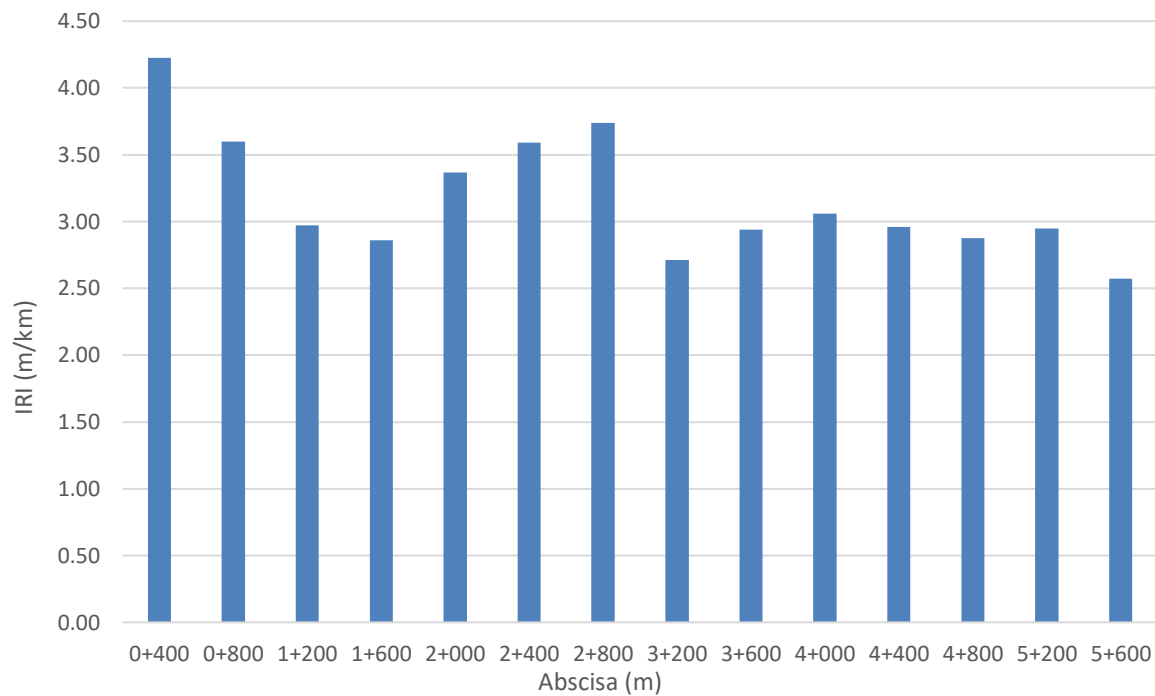


Figura 18. Resultados del IRI medido Merlin

En la Tabla 1 se puede apreciar los resultados del cálculo del IRI con el dispositivo de primera clase Merlin, expresando el número de tramo y la distancia que representa, así como el IRI de cada tramo:

Tabla 1. Resultados de IRI con Merlin

Tramo N°	Abscisa (m)	IRI (m/km)
1	0 - 400	4.226
2	400 - 800	3.599
3	800 - 1200	2.972
4	1200 - 1600	2.860
5	1600 - 2000	3.366
6	2000 - 2400	3.591
7	2400 - 2800	3.737
8	2800 - 3200	2.713
9	3200 - 3600	2.940
10	3600 - 4000	3.058
11	4000 - 4400	2.959
12	4400 - 4800	2.877
13	4800 - 5200	2.948
14	5200 - 5600	2.573

4.2 Cálculo del IRI con smartphone

Posteriormente, se realizó el levantamiento de información de la vía Guano – Ilapo con dos dispositivos smartphone, de modelos Redmi 9s y Redmi 11s, de cuales se obtuvieron datos en tres recorridos a una velocidad constante hasta completar las 8 velocidades de recorrido

explicadas en el capítulo III, los datos obtenidos fueron procesados según lo explicado en dicho capítulo mediante scripts programados en Python, para corregir errores, en el GPS, filtrar y limpiar la señal de la aceleración vertical, calcular el IRI con el método RMS en tramos cercanos a 400 metros con una tolerancia de ± 5 m.

En este contexto, los tres recorridos realizados para cada velocidad tienen como fin generar certeza en los datos a utilizarse, evitando así posibles errores en el registro de los dispositivos que serían indetectables de contar únicamente con los datos de un recorrido por velocidad, de modo que, para calcular los resultados finales del IRI RMS para cada dispositivo y velocidad, se realizó un promedio entre los tres recorridos de cada smartphone y para cada velocidad, obteniendo como resultado 8 tablas de IRI RMS por dispositivo.

A continuación, se presenta un ejemplo de las tablas obtenidas, correspondiente al IRI RMS promedio del dispositivo Redmi 9s para la velocidad de 20 km/h, el resto de las tablas de resultados se encontrarán completas en el apartado de anexos en el Anexo 1.

En la Tabla 2 se puede apreciar los resultados del cálculo del IRI con smartphone, a través del método RMS el cual será el indicativo que utilizaremos para referirnos al IRI estimado con smartphone, por lo que el contenido de las tablas es: identificativo del tramo al que corresponde respecto al IRI real es decir con Merlin, IRI RMS para los recorridos 1, 2 y 3, el promedio de los tres IRI RMS obtenidos.

Tabla 2. IRI RMS Redmi 9s a 20 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.036	0.041	0.043	0.040
2	0.026	0.027	0.040	0.031
3	0.016	0.025	0.033	0.025
4	0.020	0.027	0.028	0.025
5	0.018	0.028	0.017	0.021
6	0.025	0.034	0.034	0.031
7	0.033	0.037	0.035	0.035
8	0.018	0.033	0.024	0.025
9	0.028	0.027	0.020	0.025
10	0.018	0.034	0.030	0.027
11	0.019	0.018	0.018	0.019
12	0.021	0.020	0.020	0.020
13	0.017	0.021	0.049	0.029
14	0.018	0.023	0.016	0.019
15	0.021	0.017	0.027	0.022
16	0.024	0.019	0.026	0.023
17	0.024	0.023	0.041	0.029
18	0.014	0.033	0.018	0.022
19	0.017	0.016	0.018	0.017
20	0.021	0.017	0.023	0.020
21	0.017	0.018	0.021	0.019
22	0.019	0.022	0.024	0.022
23	0.018	0.031	0.023	0.024
24	0.027	0.019	0.018	0.022
25	0.016	0.023	0.026	0.021
26	0.022	0.023	0.021	0.022
27	0.016	0.022	0.018	0.018
28	0.016	0.022	0.018	0.019
29	0.027	0.020	0.024	0.023
30	0.019	0.022	0.039	0.027
31	0.093	0.032	0.053	0.059

4.3 Cálculo de la correlación entre IRI con Merlin e IRI con smartphone

De los resultados obtenidos en los subcapítulos anteriores, se obtuvo la información necesaria para poder analizar y calcular la correlación existente entre el IRI de referencia, es decir, un valor de IRI real calculado a partir de los datos arrojados por un equipo de primera clase como lo es el rugosímetro Merlin y los resultados de estimación del IRI mediante el método RMS aplicado a la aceleración vertical registrada por cada dispositivo smartphone durante el recorrido de la vía manteniendo velocidad constante para 8 velocidades distintas.

De tal modo, el cálculo de la correlación entre ambos se realiza mediante varios métodos, empezando con establecer un modelo de regresión lineal para cada una de las velocidades de recorrido y para ambos dispositivos, con el objetivo de evaluar la capacidad de estimación del IRI RMS respecto al valor de referencia proporcionado por el IRI Merlin. Asimismo, se emplea el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson entre ambos valores de IRI a fin de determinar si existe una relación lineal entre ambos, y de ser así que tan correlacionados se encuentran estos valores, y finalmente, se emplea el cálculo del error absoluto medio (MAPE) como medida complementara para evaluar la precisión de estimación y predicción de los modelos de regresión lineales generados.

4.3.1 Modelo de regresión lineal para cada dispositivo y velocidad.

Como se mencionó, se realiza un ajuste de regresión lineal para cada una de las velocidades y para cada dispositivo por separado, por lo que, en total se ajustaron 16 modelos de regresión lineal cada uno sus respectivas gráficas dispersión, la línea de tendencia del modelo, la función de ajuste, el coeficiente de determinación R^2 y sus respectivas tablas de resultados.

A continuación, se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos, para los modelos de regresión lineal, correspondientes al dispositivo smartphone Redmi 9s y a las velocidades de 20 km/h y 55 km/h:

La figura 19 muestra los resultados del ajuste por regresión lineal para el recorrido a 20 km/h en el smartphone Redmi 9s:

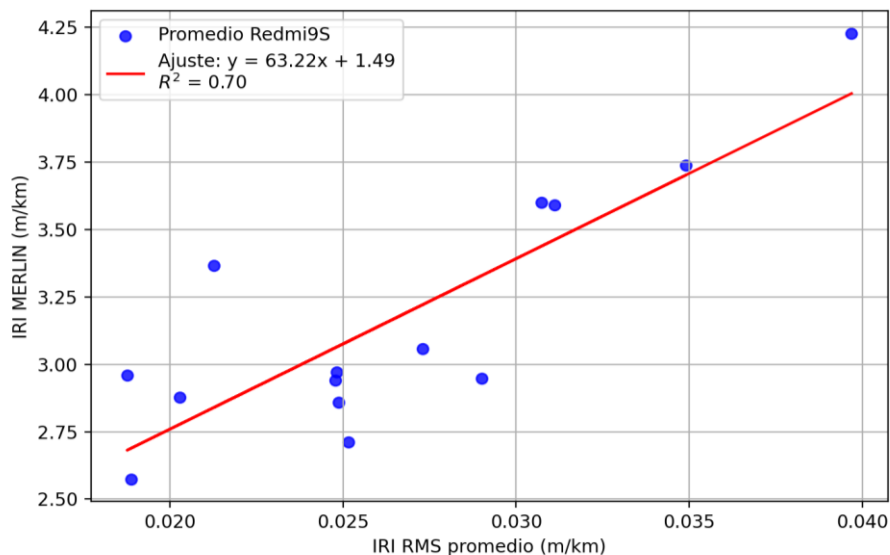


Figura 19. Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 20 km/h

La figura 20 muestra los resultados del ajuste por regresión lineal para el recorrido a 55 km/h en el smartphone Redmi 9s:

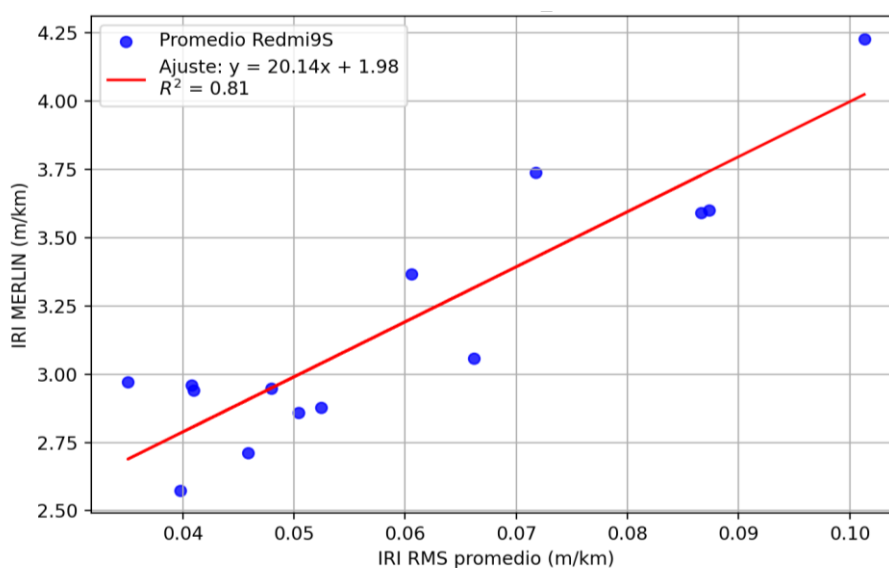


Figura 20. Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 55 km/h

Como se puede apreciar, en ambos modelos de regresión, la capacidad de predicción que tienen es elevada puesto que ambos superan un R^2 de 0.70, por lo que considerando la simplicidad del tipo de modelo de ajuste que se está empleando, estos resultados iniciales dejan entrever lo que anteriormente se había revisado en investigaciones relacionadas, donde se establecía que sí es viable estimar el IRI empleando smartphones. Sin embargo, estos resultados no son concluyentes puesto que, no todos los modelos tienen tan alta capacidad de predicción porque entre dispositivos varía este ajuste y entre distintas velocidades también llegando a bajar el valor de R^2 hasta 0.57 pero no más allá de ello, lo cual, aunque en menor medida, sigue siendo una capacidad de predicción moderada. De igual modo, los resultados completos de los 14 modelos de ajuste lineal restantes se presentarán en el apartado de anexos en el Anexo 2, donde se incluirá de igual modo la gráfica de dispersión, la línea de tendencia del modelo, la función de ajuste y el coeficiente de determinación R^2 , tanto para el dispositivo Redmi 9s como para el dispositivo Redmi 11s.

A continuación, se presenta en la Tabla 3 un resumen de los 16 modelos de regresión lineal obtenidos al ajustar los valores de IRI RMS con respecto a los del IRI Merlin, en dicha tabla se separa por dispositivo y se especifica la velocidad del recorrido, y se incluye información de la pendiente, el intercepto, el coeficiente de determinación R^2 , y la ecuación generada.

Tabla 3. Resumen de resultados de ajuste lineal IRI smartphone vs IRI Merlin

Dispositivo	Velocidad (km/h)	R2	Ecuación
Redmi9S	20	0.695	$y = 63.2194 * x + 1.4948$
	25	0.763	$y = 39.6634 * x + 1.9037$
	30	0.611	$y = 33.9553 * x + 1.8755$
	35	0.782	$y = 32.8589 * x + 1.9644$
	40	0.651	$y = 29.9246 * x + 1.8942$
	45	0.776	$y = 24.6970 * x + 2.0544$
	50	0.607	$y = 22.3548 * x + 1.9257$
	55	0.814	$y = 20.1439 * x + 1.9826$
Redmi11S	20	0.707	$y = 50.4209 * x + 1.7237$
	25	0.569	$y = 25.9011 * x + 2.2651$
	30	0.721	$y = 24.5774 * x + 2.1694$
	35	0.600	$y = 7.7161 * x + 2.7462$
	40	0.771	$y = 16.8483 * x + 1.8479$
	45	0.799	$y = 20.1345 * x + 1.9938$
	50	0.770	$y = 20.4047 * x + 1.7660$
	55	0.777	$y = 12.4756 * x + 2.1895$

De igual modo, como se puede apreciar en la Figura 21, variabilidad en los valores de R^2 entre dispositivos para una misma velocidad constante de recorrido, además de que no se puede apreciar ninguna tendencia visual que indique una relación lineal entre el grado de ajuste de los modelos de regresión lineal y la velocidad de recorrido vehicular:

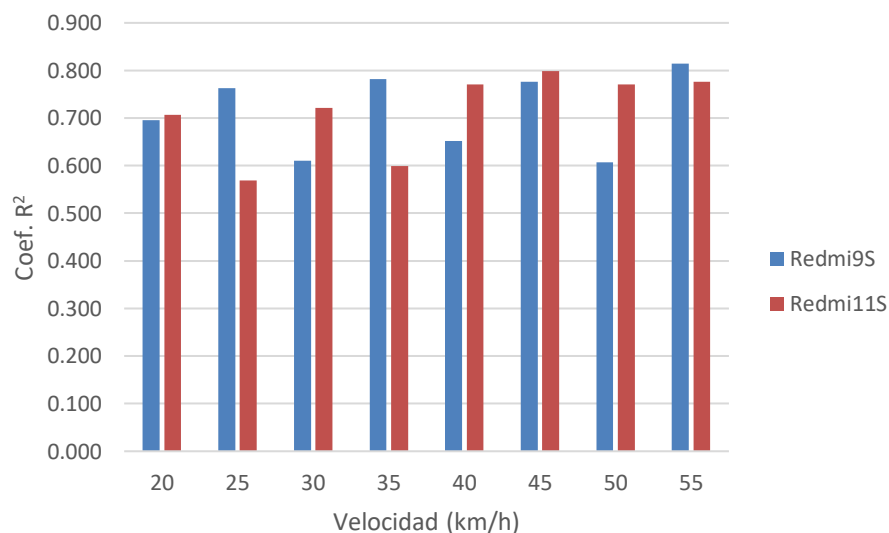


Figura 21. Coeficiente de determinación R^2 para cada dispositivo y velocidad

4.3.2 Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson

Otra herramienta estadística ampliamente utilizada para determinar el grado de asociación lineal entre dos variables cuantitativas continuas es el coeficiente de correlación de Pearson, que aplicado para evaluar la correlación entre el IRI obtenido por smartphone y el IRI real calculado con Merlin, se obtuvieron los siguientes resultados, resumidos en la Tabla 4, la

cual muestra los resultados para ambos smartphones y las 8 velocidades a las que se realizaron recorridos en la vía:

Tabla 4. Resultados de correlación de Pearson: IRI smartphone vs IRI Merlin

Dispositivo	Velocidad (km/h)	Coef. de Pearson
Redmi9S	20	0.834
	25	0.874
	30	0.781
	35	0.884
	40	0.807
	45	0.881
	50	0.779
	55	0.902
Redmi11S	20	0.841
	25	0.754
	30	0.849
	35	0.774
	40	0.878
	45	0.894
	50	0.878
	55	0.881

Los resultados presentados en la Tabla 4, muestran que los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos entre los valores de IRI calculado con smartphone (Redmi 9s y Redmi 11s) y los valores reales de IRI (Merlin) para las distintas velocidades constantes de recorrido de la vía muestran que, en todos los casos el coeficiente de correlación entre variables es superior a 0.75, llegando incluso a 0.902, lo cual según lo expresado en el capítulo III, corresponde a valores que expresan una correlación muy alta entre las dos variables cuantitativas. De estos resultados sí podemos obtener resultados concluyentes, ya que, expresan que el IRI estimado con smartphone corresponde y es viable para predecir el IRI real que represente el estado actual de la vía en estudio, y en consecuencia se valida el potencial de esta metodología como una alternativa económica, accesible y confiable para la evaluación de la regularidad superficial en vías pavimentadas.

Asimismo, como se puede apreciar en la Figura 22, la comparativa entre los valores del coeficiente de correlación de Pearson entre dispositivos para una misma velocidad constante de recorrido, mostrando variabilidad entre dispositivos lo cual puede deberse a múltiples factores, relacionados con el propio dispositivo y sus sensores integrados de fábrica, o con el procesamiento y filtrado de datos realizado previo a la estimación del IRI con smartphone.

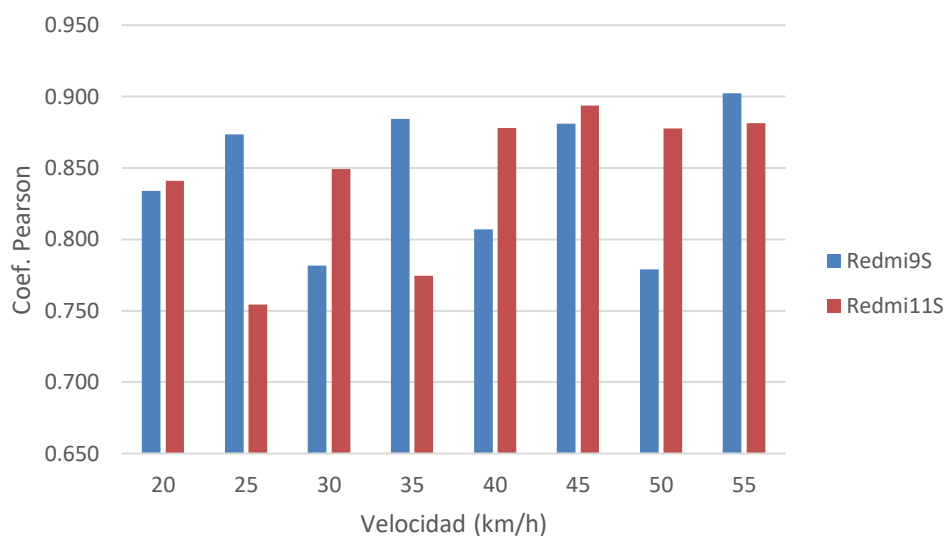


Figura 22. Coeficiente de correlación de Pearson para cada dispositivo y velocidad

4.3.3 Cálculo del MAPE en la estimación del IRI

Como método de sustentación adicional de la robustez de los modelos de regresión obtenidos para cada dispositivo y velocidad, se realizará el cálculo del error porcentual absoluto medio (MAPE) entre el IRI medido con Merlin y las predicciones de IRI resultantes de cada ecuación de ajuste de los 16 modelos generados, para lo cual, a continuación se presenta una tabla de resultados de ejemplo correspondiente al dispositivo Redmi 9s y a la velocidad de 55 km/h, en la Tabla 5 se muestra el IRI RMS, el IRI real con Merlin, la predicción de IRI, el error de predicción y el resultado del error medio absoluto para este modelo de regresión lineal:

Tabla 5. MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 55 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.101	4.023	4.226	5.05%
0.087	3.742	3.599	3.82%
0.035	2.689	2.972	10.52%
0.050	2.998	2.860	4.63%
0.061	3.203	3.366	5.10%
0.087	3.728	3.591	3.67%
0.072	3.428	3.737	9.00%
0.046	2.906	2.713	6.66%
0.041	2.808	2.940	4.68%
0.066	3.316	3.058	7.79%
0.041	2.805	2.959	5.50%
0.052	3.039	2.877	5.32%
0.048	2.949	2.948	0.04%
0.040	2.784	2.573	7.55%
MAPE (%)			5.67%

De igual modo, los resultados completos de los cálculos del MAPE para cada dispositivo y velocidad se encuentran disponibles en el apartado de anexos en el Anexo 3.

Como resultado del cálculo del MAPE para el dispositivo Redmi 9s a la velocidad constante de 55 km/h se obtuvo un error medio absoluto del 5.67% lo cual, según muchas diversas fuentes y acorde a lo establecido en la metodología, es inferior al 10% de error indicando así que la capacidad de estimación del modelo es muy alta y concuerda con los resultados anteriores.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 6 con un resumen de todos los MAPE para los dos smartphones y las 8 velocidades constantes de recorrido, resultados obtenidos de lo explicado anteriormente.

Tabla 6. Resultados de MAPE para cada dispositivo y velocidad

Dispositivo	Velocidad (km/h)	MAPE (%)
Redmi9S	20	6.72%
	25	5.73%
	30	6.83%
	35	4.73%
	40	7.25%
	45	4.81%
	50	6.87%
	55	5.67%
Redmi11S	20	5.96%
	25	6.69%
	30	5.59%
	35	7.50%
	40	5.24%
	45	5.30%
	50	5.59%
	55	5.64%

Como se puede apreciar, para los dos smartphones y las distintas velocidades constantes el error absoluto medio siempre fue menor al valor usualmente aceptado del 10%, por lo que, se certifica que los modelos de regresión lineal tienen una alta capacidad de estimar el IRI real obtenido con un equipo de primera clase, mediante los sensores integrados en un smartphone.

Y complementando lo anterior, se presenta en la Figura 23, la comparativa entre los valores del error medio absoluto en la predicción del IRI estimado con smartphone versus el IRI calculado con Merlin, entre los dos dispositivos smartphone y para una misma velocidad constante de recorrido:

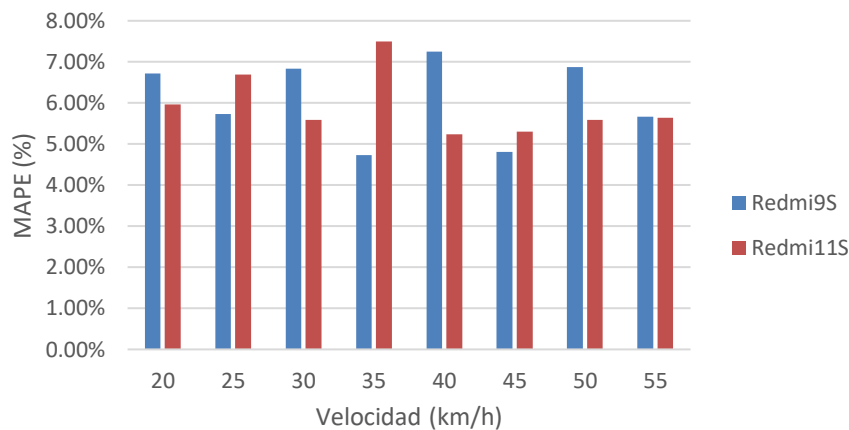


Figura 23. Porcentaje de error medio absoluto para cada dispositivo y velocidad

4.4 Correlación de datos

En capítulo III de metodología específicamente el punto 3.6.2, se estableció el método por el cual se realizó la delimitación del tamaño de la muestra original de la vía Guano – Ilapo, la cual tiene una longitud total de 12.3 km, pero para el presente estudio se levantó una longitud de 5.6 km (aproximadamente el 45.5% de vía), debido a que el principal enfoque de investigación no es determinar la viabilidad del método para estimar el IRI empleando smartphone, sino analizar cuál es la influencia real que tiene la velocidad del vehículo al momento de realizar el registro de datos en el recorrido de la vía. De modo que, este subcapítulo presente en resultados resume, los resultados que llevaron a delimitar la muestra a 14 tramos de análisis y destinar los recursos disponibles al análisis de la influencia de la velocidad vehicular.

Como ya se presentó anteriormente, en la Tabla 3 de Resumen de resultados de ajuste lineal IRI smartphone vs IRI Merlin, los coeficientes de determinación R^2 de los 16 modelos de ajuste lineal obtenidos, demuestran una solidez estadística ya que, casi en su totalidad estos se encuentran por encima de un ajuste $R^2 > 0.60$.

En este contexto, la siguiente gráfica presente en la Figura 24, resumen los 8 modelos de regresión lineal y correlaciones para el dispositivo smartphone Redmi 9s:

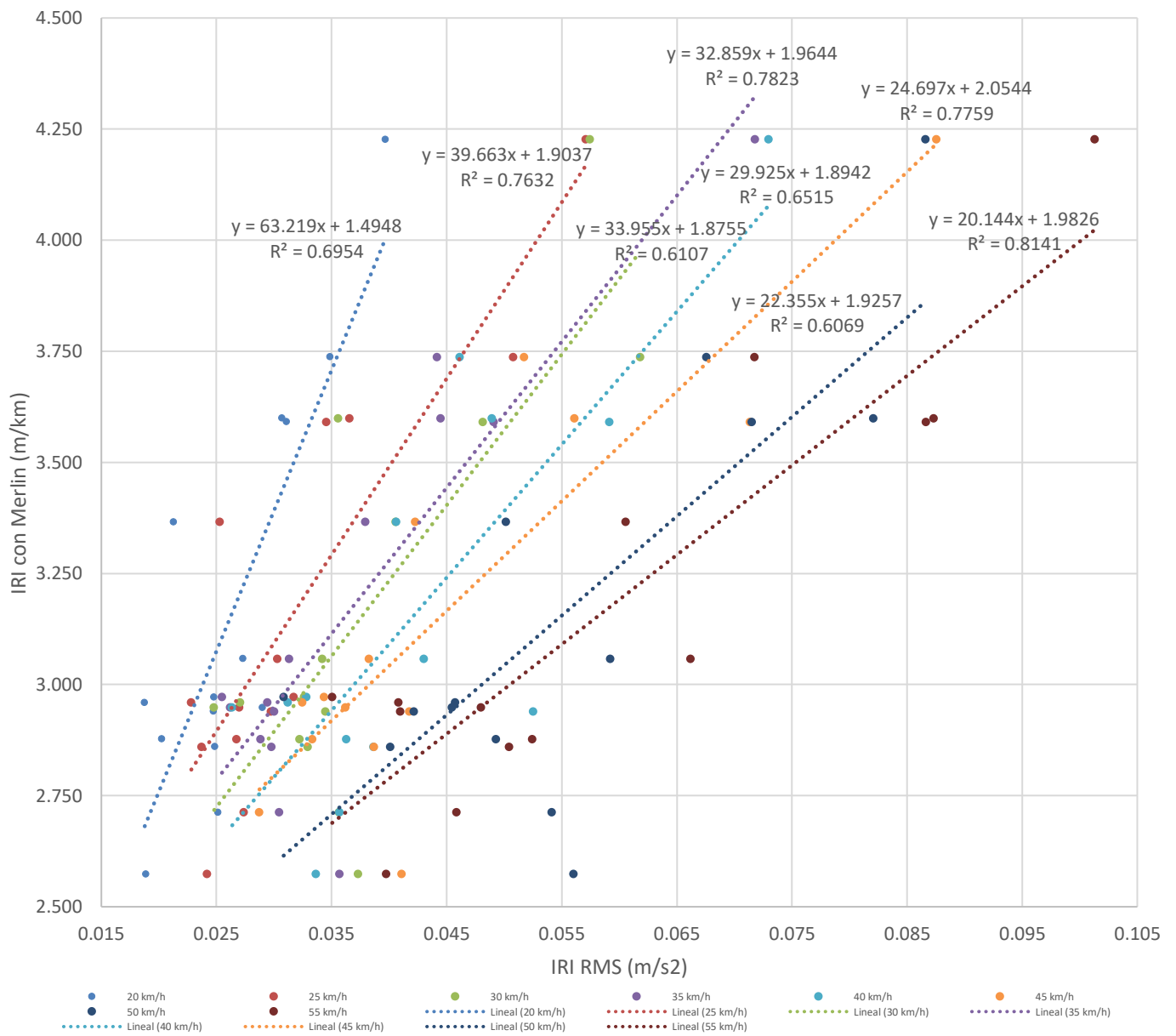


Figura 24. Correlaciones y modelos lineales smartphone Redmi 9s

De igual modo se lo realizó para el dispositivo Redmi 11s obteniendo la siguiente gráfica presentada en la Figura 25:

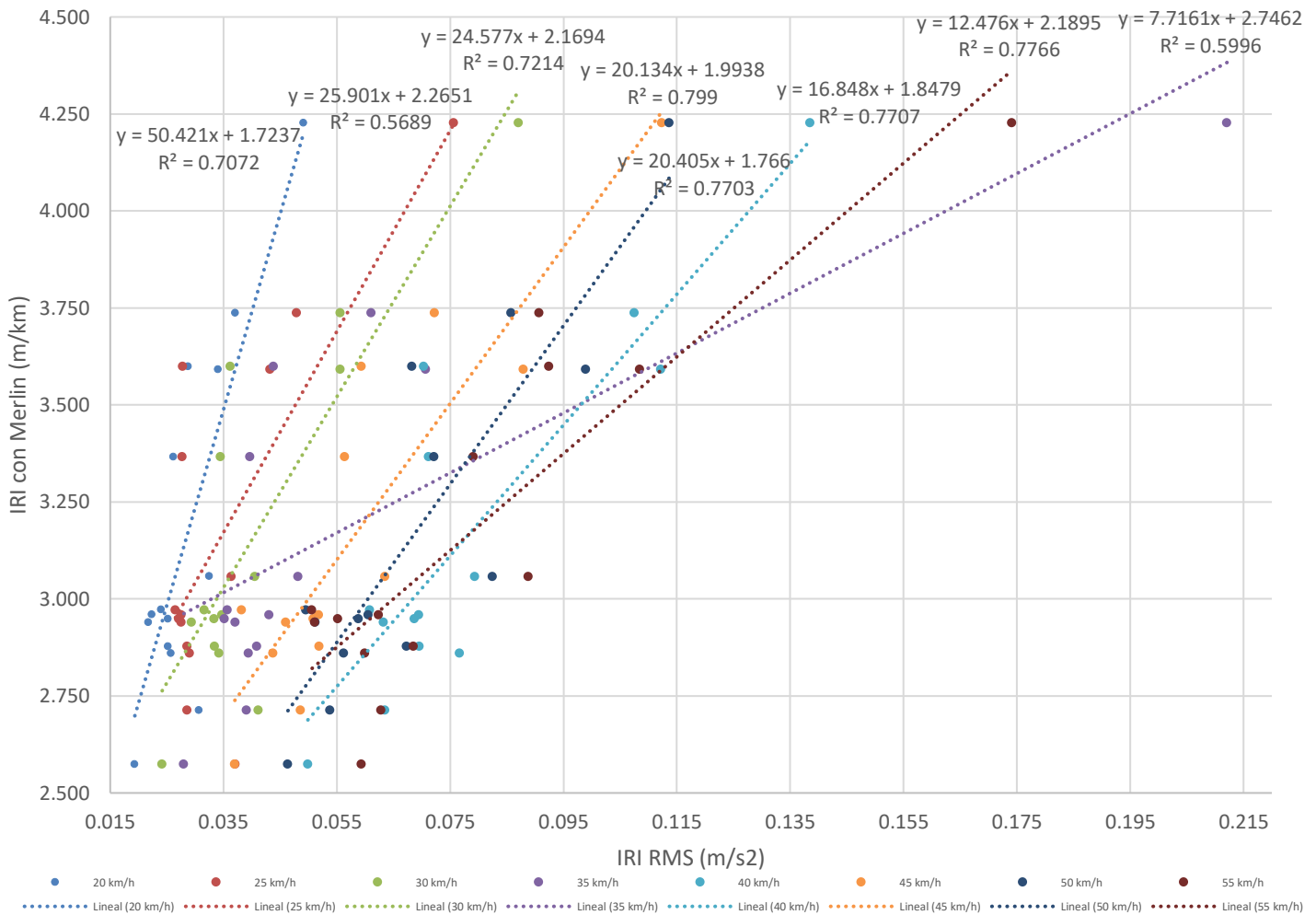


Figura 25. Correlaciones y modelos lineales smartphone Redmi 11s

Como se puede apreciar en ambas gráficas, se observa los 8 modelos de regresión lineal generados para cada uno de los dispositivos y para la velocidad indicada según el identificador de color. De esto podemos obtener los coeficientes de determinación R^2 y cuál es la ecuación de ajuste para cada smartphone y velocidad.

En este contexto, como se mencionó anteriormente también en el capítulo III apartado 3.6.2, se debe sustentar la delimitación de la cantidad de observaciones necesarias para generar modelos de regresión lineal simple confiables, mediante otros indicadores estadísticos de peso como lo es el coeficiente de determinación R^2 , y según esto, las gráficas muestran que para prácticamente todos los modelos existe un coeficiente de determinación R^2 superior a 0.60, lo cual indica una fuerte correlación y capacidad de predicción del modelo. Por lo que, como se mencionó en el capítulo de metodología, se valida que se haya realizado este estudio para los 14 tramos de la longitud total de la vía Guano – Ilapo, que representan una longitud de 5.6 km, aproximadamente 45% de la totalidad de la vía que es de 12.3 km.

4.5 Análisis de la influencia de la velocidad en el IRI obtenido con smartphone

A fin de realizar el análisis de la influencia que tiene la velocidad vehicular en el IRI obtenido con smartphone, se realizó, como se puede apreciar en subcapítulos anteriores, la evaluación de la correlación entre el IRI estimado mediante smartphone y el IRI obtenido con equipo de primera clase Merlin, de los cuales se obtuvo la siguiente tabla que resume los resultados para el dispositivo Redmi 9S y el dispositivo Redmi 11S, según la velocidad constante de recorrido de la vía. En la tabla 7 se presentan los indicadores estadísticos, coeficiente de determinación R^2 , coeficiente de correlación de Pearson (r) y error porcentual absoluto medio (MAPE).

Tabla 7. Indicadores estadísticos de correlación: IRI smartphone vs IRI Merlin

Dispositivo	Velocidad (km/h)	R^2	Coef. de Pearson	MAPE (%)
Redmi9S	20	0.695	0.834	6.72%
	25	0.763	0.874	5.73%
	30	0.611	0.781	6.83%
	35	0.782	0.884	4.73%
	40	0.651	0.807	7.25%
	45	0.776	0.881	4.81%
	50	0.607	0.779	6.87%
Redmi11S	55	0.814	0.902	5.67%
	20	0.707	0.841	5.96%
	25	0.569	0.754	6.69%
	30	0.721	0.849	5.59%
	35	0.600	0.774	7.50%
	40	0.771	0.878	5.24%
	45	0.799	0.894	5.30%
	50	0.770	0.878	5.59%
	55	0.777	0.881	5.64%

A partir de los resultados obtenidos en la tabla, se realizó una prueba de hipótesis p para cada uno de estos tres indicadores estadísticos, a fin de validar o descartar la hipótesis nula planteada.

4.5.1 Prueba de hipótesis nula

Como ya se mencionó, se realizó la prueba de hipótesis p para estos tres indicadores estadísticos y la velocidad constante de recorrido para ambos dispositivos, cuyos resultados se muestran a continuación. La tabla número 8 muestra los resultados obtenidos a través de una herramienta de regresión, mediante la cual se obtuvo el valor de la probabilidad o el valor P de cada regresión ingresando como variables en Y los valores del indicador estadístico correspondiente a un dispositivo y como variable en X la velocidad constante de recorrido vehicular:

Tabla 8. Resultados de la prueba de hipótesis para los tres indicadores

Dispositivo	Indicador estadístico	Valor p
Redmi 9s	R2	0.726
	r	0.754
	MAPE	0.714
Redmi 11s	R2	0.084
	r	0.091
	MAPE	0.316

Según los resultados obtenidos en la tabla 8, podemos determinar que, según se estableció en el capítulo III de Metodología, los valores p son mayores a 0.05, por lo tanto, no se puede descartar la hipótesis nula y afirmar la hipótesis alternativa, lo cual nos indica que, al menos estadísticamente, en función de estos tres indicadores, la velocidad vehicular no tiene una influencia significativa en la correlación del IRI calculado con smartphone y el IRI real o de referencia, es decir el IRI calculado con el equipo de primera clase Merlin. Esto valida también la hipótesis secundaria 1, que establece que, a velocidades constantes bajas, no se obtiene una mayor correspondencia entre las estimaciones de IRI y el IRI real.

4.5.2 Simulación de estimación de IRI

Por otro lado, con el objetivo de determinar de que otro modo la velocidad constante de recorrido puede influir en la estimación o en los modelos de ajuste generados para predecir el IRI real a través de la señal de aceleración vertical calculada mediante el método RMS, se realizó una simulación escogiendo rangos usuales de aceleración RMS, que ajustados a las ecuaciones obtenidas den como resultados valores realistas de IRI en m/km, que usualmente van de 1.5 m/km hasta los 7.5 m/km. De modo que, se aplicó la función de ajuste de cada velocidad en ambos dispositivos, se obtuvieron las siguientes gráficas que muestran claramente cómo la velocidad de recorrido vehicular sí tiene una influencia en la estimación del IRI con smartphone. Sin embargo, esta no impacta en la precisión de la estimación de IRI ni en su correlación con el IRI real medido con Merlin, sino que afecta en la dispersión que tiene cada uno de los modelos de regresión lineal generados, en la pendiente de ajuste del modelo, en sus coeficientes, y en el coeficiente de variación de cada modelo de regresión lineal simple. En este contexto, se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la Figura 26 y 27 representando a los smartphones Redmi 9s y Redmi 11s respectivamente:

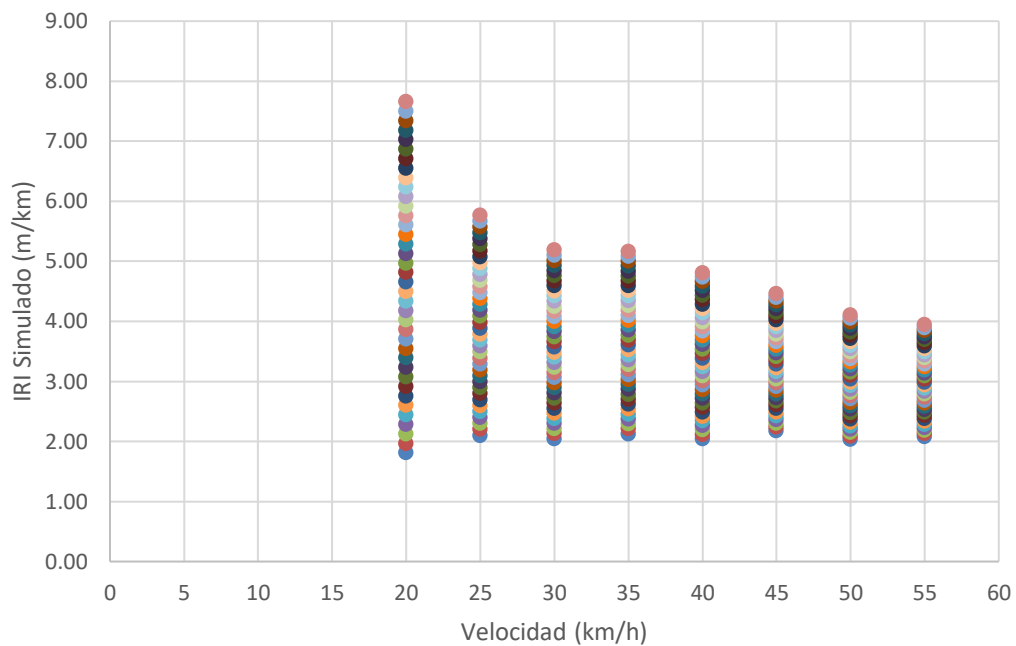


Figura 26. Simulación de estimación de IRI para el dispositivo Redmi 9s

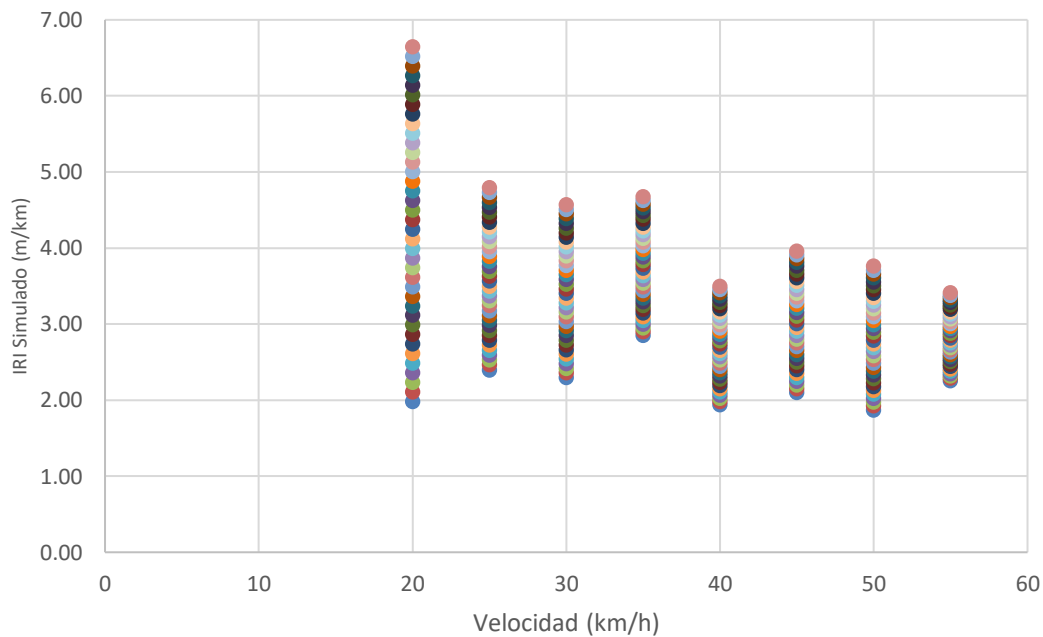


Figura 27. Simulación de estimación de IRI para el dispositivo Redmi 11s

Como se mencionó anteriormente, la velocidad vehicular no tiene influencia directa en qué tan preciso pueda ser la estimación a distintas velocidades de IRI con smartphone. Sin embargo, sí tiene una influencia directa en los modelos de regresión generados para cada velocidad y dispositivo, puesto que, como se puede apreciar las pendientes y los coeficientes de las ecuaciones de ajuste lineal de modelos a velocidades más bajas son más grandes que los generados conforme la velocidad incrementa. Esto se puede apreciar de mejor manera en la simulación realizada para el dispositivo Redmi 9s, ya que es constante y no se presentan

valores atípicos en la gráfica. Sin embargo, para la simulación de estimación del dispositivo Redmi 11s, se puede apreciar algún tipo de variabilidad en la gráfica resultante y en sus ecuaciones de ajuste de los modelos generados para este dispositivo, lo cual puede deberse a varios factores, desde errores en la medición o aspectos relacionados estrictamente al dispositivo, a la calidad de sus sensores o a los ajustes predeterminados de fábrica de éste.

4.5.3 Desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (CV)

Como se apreció en las gráficas anteriores, sí existe influencia de la velocidad en la estimación de IRI con smartphone, por lo que, a fin de determinar y cuantificar esta influencia se realizó un análisis de desviación estándar y coeficiente de variación entre los datos obtenidos de la simulación, a fin de expresar analíticamente la variación entre los modelos de predicción y como esto puede expresar que la velocidad si influye en la medición de IRI con smartphone. Los resultados se presentan a continuación en la tabla 9 y tabla 10 correspondientes al cálculo de desviación estándar y coeficiente de variación para dispositivos Redmi 9s y Redmi 11s respectivamente:

Tabla 9. Desviación estándar y coeficiente de variación para smartphone Redmi 9s

Velocidad (km/h)	Promedio IRI	Valor Máx	Valor Min	Rango	Desv. Estándar	CV (%)
20	4.73	7.66	1.81	5.85	1.733	36.60%
25	3.94	5.77	2.10	3.67	1.087	27.62%
30	3.62	5.19	2.05	3.14	0.931	25.75%
35	3.65	5.17	2.13	3.04	0.901	24.69%
40	3.43	4.81	2.04	2.77	0.820	23.93%
45	3.32	4.46	2.18	2.28	0.677	20.39%
50	3.07	4.11	2.04	2.07	0.613	19.95%
55	3.01	3.95	2.08	1.86	0.552	18.32%

Tabla 10. Desviación estándar y coeficiente de variación para smartphone Redmi 11s

Velocidad (km/h)	Promedio IRI	Valor Máx	Valor Min	Rango	Desv. Estándar	CV (%)
20	4.31	6.64	1.98	4.66	1.382	32.09%
25	3.59	4.79	2.39	2.40	0.710	19.77%
30	3.43	4.57	2.29	2.27	0.674	19.65%
35	3.76	4.67	2.84	1.82	0.541	14.39%
40	2.71	3.49	1.93	1.56	0.462	17.04%
45	3.03	3.96	2.09	1.86	0.552	18.24%
50	2.81	3.76	1.87	1.89	0.559	19.89%
55	2.83	3.41	2.25	1.15	0.342	12.09%

Como se puede apreciar en los resultados expresados, para el análisis de la desviación estándar se observa una tendencia decreciente en la dispersión conforme la velocidad del recorrido aumenta, ya que, al menos para el dispositivo Redmi 9s, conforme la velocidad de recorrido aumenta, la dispersión expresada en la desviación estándar disminuye, como se

puede apreciar entre los valores de 20 km/h y 55 km/h. Lo mismo sucede para el dispositivo Redmi 11s. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, existe algún tipo de alteración o error en los datos específicamente para las velocidades intermedias, puesto que no se aprecia la misma relación decreciente que con el dispositivo Redmi 9s, y como se expresó con anterioridad, esto puede deberse más a factores relacionados con el dispositivo o el proceso de medición que al análisis estadístico que se está realizando en este momento.

De igual modo, respecto al coeficiente de variación, se puede apreciar la misma relación, ya que la variación disminuye conforme la velocidad del recorrido incrementa. Este comportamiento evidencia que la variabilidad relativa de cada modelo disminuye y se estabiliza a velocidades más altas. Incluso considerando que los promedios de IRI también descienden.

Sin embargo, es importante destacar que esta menor dispersión y menor coeficiente de variación no significa que los modelos tengan menor capacidad predictiva a velocidades bajas, sino que a velocidades más altas los valores calculados de IRI mediante RMS en bruto requieren de un menor ajuste para obtener resultados coherentes que reflejen la realidad. Mientras que a velocidades más bajas requieren que un mayor grado de ajuste.

4.5.4 Pearson entre velocidad y el ajuste del modelo

Finalmente, para determinar de forma analítica que tipo de correlación existe entre la velocidad constante de recorrido del vehículo al momento de estimar el IRI con smartphone, y el grado de ajuste de los modelos generados para realizar dicha estimación, se realiza un análisis y cálculo del coeficiente de correlación de Pearson entre la velocidad del vehículo y la desviación estándar de cada modelo y también con su coeficiente de variación.

A continuación, en la Tabla 11 y 12, se presentan los resultados del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson entre los valores mencionados para los dispositivos smartphone Redmi 9s y Redmi 11s respectivamente.

Tabla 11. Pearson: velocidad para desviación y CV dispositivo Redmi 9s

Velocidad (km/h)	Des. Estándar	CV (%)
20	1.733	36.60%
25	1.087	27.62%
30	0.931	25.75%
35	0.901	24.69%
40	0.820	23.93%
45	0.677	20.39%
50	0.613	19.95%
55	0.552	18.32%
Coef. de Pearson	-0.891	-0.924

Tabla 12. Pearson: velocidad para desviación y CV dispositivo Redmi 11s

Velocidad (km/h)	Des. Estándar	CV (%)
20	1.382	32.09%
25	0.710	19.77%
30	0.674	19.65%
35	0.541	14.39%
40	0.462	17.04%
45	0.552	18.24%
50	0.559	19.89%
55	0.342	12.09%
Coef. de Pearson	-0.782	-0.693

Como se puede apreciar en las tablas presentadas, para el dispositivo Redmi 9s ambos valores de r expresan un nivel de correlación negativa muy alta según lo descrito en el capítulo III, puesto que son mayores a 0.80, el signo negativo expresa una relación lineal inversa, lo que significa que conforme la velocidad del recorrido aumenta, tanto la desviación estándar de los datos y el coeficiente de variación disminuyen, demostrando así que conforme aumenta la velocidad, la dispersión y variación en los resultados arrojados por los modelos de este dispositivo son menores, lo que indica que se requiere un menor grado de ajuste para acercar o estimar los valores de la señal de la aceleración vertical RMS a valores realistas y representativos del IRI.

De igual modo, para el dispositivo Redmi 11s, se evidencia una correlación negativa fuerte ya que los valores de r se encuentran en el rango comprendido entre 0.60 y 0.8, demostrando que, pese a que existe algún tipo de alteración en los datos registrados por estos dispositivos, aun así se llega a la misma conclusión que con el anterior dispositivo.

4.6 Análisis de hipótesis

- **Hipótesis Nula (H_0):** La velocidad vehicular no influye significativamente en la correlación entre los valores del IRI obtenidos mediante smartphone y los valores de referencia obtenidos con el equipo Merlin.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** La velocidad vehicular sí influye significativamente en la correlación entre el IRI estimado con smartphone y el IRI medido con Merlin.
 - Variable Dependiente: Correlación entre IRI con smartphone y IRI medido con Merlin
 - Variable independiente: Velocidad vehicular (km/h)
- **Respuesta:** “El análisis de prueba de hipótesis realizado por regresión entre la velocidad constante de recorrido del vehículo y la correlación que existe entre el IRI con Merlin, es decir, el IRI real, y el IRI estimado con smartphone, expresada a través de los tres indicadores estadísticos R^2 , r y MAPE, arrojó en todos los casos evaluados y para ambos dispositivos valores de prueba de hipótesis p mayores a 0.05, por lo cual no se puede descartar la hipótesis nula, por lo que se puede concluir que

efectivamente la velocidad vehicular no influye significativamente en la correlación entre los valores de IRI obtenidos mediante smartphone y los valores de referencia obtenidos con el equipo Merlin. Al menos, en lo que a la calidad de ajuste o a la precisión de las predicciones que se pueden realizar a distintas velocidades se refiere.”

- **Hipótesis Secundaria 1**

- **H₀:** A velocidades constantes bajas (por ejemplo, 20–25 km/h), no se obtiene una mayor correspondencia entre el IRI estimado con smartphone y el IRI medido con Merlin.
- **H₁:** A velocidades constantes bajas, sí se obtiene una mayor correspondencia entre el IRI estimado con smartphone y el IRI medido con Merlin.

- **Respuesta:** “De igual modo, de las pruebas de hipótesis realizadas también se puede concluir que no es posible descartar la hipótesis nula secundaria número 1, ya que se comprobó que a velocidades constantes bajas efectivamente no se obtiene una mayor correspondencia entre el IRI calculado con Smartphone y el IRI medido con Merlin, porque al igual que se expresó anteriormente, la velocidad vehicular no influye en la capacidad de predecir el IRI real a través del IRI con smartphone ni en la correlación real que existe entre ambos valores.”

- **Hipótesis Secundaria 2**

- **H₀:** La velocidad vehicular no influye significativamente en la dispersión ni en el coeficiente de variación de los modelos de estimación del IRI contruidos a partir de aceleraciones RMS obtenidas con smartphone.
- **H₁:** La velocidad vehicular sí influye significativamente en la dispersión y en el coeficiente de variación de los modelos de estimación del IRI, reduciendo la necesidad de ajuste a medida que esta aumenta.

- **Respuesta:** “Por otro lado, respecto a la hipótesis secundaria número 2, de ésta se concluye que se debe descartar la hipótesis nula, puesto que a través del método expresado anteriormente, de realizar una simulación con las ecuaciones de ajuste de cada modelo generado por dispositivo, evaluar la dispersión y el coeficiente de variación que existe entre los diversos modelos de ajuste generados, se debe determinar que la hipótesis nula queda descartada y se acepta la hipótesis alternativa, puesto que, efectivamente la velocidad vehicular sí influye significativamente en la dispersión, en la pendiente, y en la variación de los modelos de estimación de IRI, reduciendo la necesidad de ajuste de los valores de aceleración vertical RMS, a medida que la velocidad de recorrido del vehículo aumenta.”

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Mediante el análisis estadístico realizado empleando modelos de regresión lineal y pruebas de hipótesis p aplicadas a los resultados obtenidos de la correlación entre el IRI estimado con smartphone y el IRI medido con Merlin, se concluye que no se encontró evidencia estadísticamente significativa de que la velocidad influya significativamente en la correlación del método de estimación de IRI con smartphone y el IRI de referencia, al menos dentro del rango de velocidades evaluadas en el presente estudio de investigación (20 a 55 km/h). La realización de esta conclusión se fundamenta en los valores p de la prueba de hipótesis aplicada a los tres indicadores estadísticos empleados para evaluar la correlación entre IRIs, el coeficiente de determinación R^2 , el coeficiente de correlación de Pearson y el error porcentual absoluto medio MAPE, para los cuales las pruebas siempre resultaron en un valor de $p > 0.05$, manteniendo así la hipótesis nula planteada que indica directamente que la velocidad no influye significativamente en el cálculo de IRI con smartphone, al menos en cuanto a la correspondencia de estos valores y en la relación lineal existente.
- No obstante, a fin de determinar de qué modo la velocidad constante de recorrido, sí influye en la estimación de IRI como se ha concluido en diversas investigaciones relacionadas al tema planteado, se realizó una simulación estructural de señales de aceleración vertical RMS, seleccionadas en un rango en el cual las distintas funciones de ajuste de cada velocidad y dispositivo arrojen valores de IRI estimado coherentes con la realidad. Simulación de la cual se identificó que, si existe influencia de la velocidad en los modelos de regresión lineal generados para cada dispositivo y velocidad constante de recorrido, demostrando que la velocidad influye en una reducción sistemática en la dispersión de los modelos de regresión, así como en el coeficiente de variabilidad de cada uno de ellos. Mostrando mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson una relación lineal inversa entre la velocidad del vehículo y la desviación estándar de los modelos generados, así como también para su coeficiente de variación. Demostrando así que conforme aumenta la velocidad vehicular, el grado de ajuste de los modelos disminuye para estimar la señal de aceleración vertical RMS a un IRI representativo cercano al IRI que arrojaría la medición con un equipo de primera clase como lo es el rugosímetro Merlin.
- Por tanto, aunque se demostró que no hay una influencia significativa desde un punto de vista estadístico, sí se puede evidenciar una influencia de la velocidad en el comportamiento estructural de los modelos de regresión lineal generados para cada dispositivo y velocidad constante de recorrido de la vía. Punto que debe ser considerado en futuras investigaciones y metodologías de recolección de datos empleando los sensores de un smartphone.
- Se midió satisfactoriamente el IRI real de la vía de estudio utilizando un equipo de primera clase rugosímetro Merlin, certificado y normado para nuestro país. Estos

resultados se emplearon como los valores de IRI de referencia para generar los modelos de regresión lineal, y fueron la base fundamental para realizar el análisis de la correlación entre el IRI estimado con smartphone y el valor real.

- Se realizó el registro y recolección de datos en campo para dos dispositivos smartphone (Redmi 9s y Redmi 11s), haciendo uso de los sensores integrados en los smartphones para registrar la señal generada por la aceleración vertical (agz) mientras se recorría la vía a distintas velocidades constantes (20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55 km/h), para posteriormente realizar el procesamiento, filtrado, suavizado y corrección de la información recolectada y estimar el IRI mediante el método RMS en tramos cercanos a 400 metros para posteriormente poder realizar el cálculo de la correlación entre estos valores y los valores de IRI con Merlin. Demostrando que este método es viable y genera estimaciones coherentes con la realidad de la vía estudiada.
- Se encontró que existe una correlación positiva significativa entre los valores de IRI estimado con smartphones y los valores obtenidos con el equipo Merlin, expresada a través de los coeficientes de correlación de Pearson (r) calculados que en todos los casos arrojaron valores superiores a 0.7 demostrando una correlación positiva caracterizada como fuerte, coeficientes de determinación R^2 superiores en prácticamente todos casos a 0.6 siendo aceptables y mostrando una alta capacidad de predicción de los modelos, respaldada por el análisis del error porcentual absoluto medio (MAPE) que en todos los casos resultaron en valores menores al 10% usualmente establecido para determinar que un modelo de predicción es de alta precisión. Valores con los cuales se calculó mediante un análisis de hipótesis p , valores $p > 0.05$, respaldando la hipótesis nula planteada que expresa que la velocidad de recorrido no influye significativamente en la correspondencia entre ambos métodos.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda que en cualquier estudio que requiera estimaciones del IRI con smartphones, se sugiere implementar un protocolo estricto para el procesamiento de señales. Este debe abarcar la rectificación de aceleraciones, la supresión de registros inválidos o extremos, la utilización de filtros pasa banda apropiados y la comprobación de la frecuencia de muestreo. Todo esto con el objetivo de garantizar que la señal procesada represente con exactitud las condiciones reales del pavimento. Dado que, sin un procesamiento apropiado de la señal, no se halló conexión entre los valores de IRI y este análisis no hubiese sido factible.
- Es crucial seguir utilizando métodos validados como el cálculo RMS de la aceleración vertical corregida para calcular el IRI, puesto que han probado proporcionar resultados coherentes y comparables con los logrados a través de equipos de referencia como Merlin. Además, es aconsejable implementar este método por segmentos de análisis establecidos, lo que proporciona un control más exacto sobre la duración de la evaluación y simplifica la creación de indicadores fiables por segmento.

- Para una adecuada interpretación de los resultados logrados, se recomienda no restringirse solo a los indicadores de ajuste tradicionales como R^2 o el coeficiente de correlación de Pearson, sino también añadirlos a otros indicadores estructurales como la desviación estándar, el coeficiente de variación (CV) y el estudio del comportamiento de las pendientes de los modelos, dado que estos últimos evidencian con mayor nitidez la estabilidad y consistencia de las estimaciones bajo diferentes circunstancias.
- Aunque en esta investigación se determinó que la velocidad del vehículo no tiene un impacto significativo desde una perspectiva estadística tradicional, se aconseja examinar también su impacto estructural en los modelos producidos. Esto se debe a que se demostró que algunos patrones de comportamiento, como la reducción de la dispersión y variabilidad a mayor velocidad, pueden potenciar la calidad funcional de las predicciones sin necesariamente llegar a la significancia estadística.
- Se recomienda incorporar otras variables que podrían afectar la medición del IRI con smartphones en futuros estudios, como el tipo de vehículo, el sistema de suspensión, la presión de los neumáticos, la disposición y montaje del smartphone en el interior del vehículo y la cantidad de ocupantes que influye en la masa suspendida. Estos elementos pueden producir efectos más evidentes en la señal registrada que la propia velocidad, y deben tomarse en cuenta si se busca alcanzar una calibración sólida y transferible.
- De igual modo, se sugiere elaborar el método para la estimación de IRI utilizando un teléfono móvil, tal como se llevó a cabo en este estudio. Aplicando scripts creados en Python, lo que facilitó la integración de todos los procesos de procesamiento, estimación y análisis del IRI. Su aplicación en proyectos futuros simplificará la comparación de dispositivos, la modificación de funciones y la exportación de resultados, disminuyendo fallos y potenciando la eficiencia en investigaciones de evaluación vial asequibles.
- Finalmente, se sugiere para futuras investigaciones evaluar que otro tipo de influencia pueda tener la velocidad en la estimación de IRI con smartphone mediante otras herramientas o métodos estadísticos, así como en otras condiciones del vehículo, montaje del dispositivo, simulaciones de estimación de IRI, o aplicado este tipo de análisis directamente sobre ajustes reales de IRI con smartphone e IRI con Merlin pero para varias vías, de diversas longitudes y distintas condiciones viales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EcuRed, "Infraestructura vial," 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Infraestructura_vial
- [2] H. Solminihaç, N. Eechhaveguren, y A. Chamorro, Gestión de infraestructura vial, 3ra ed., Ediciones UC, 2018.
- [3] B. E. Oblitas Gastelo, I. I. Medina Cardozo, y C. R. Paredes Asalde, "International Evenness Index and Pavement Condition Index for Defining Pavement Serviceability Levels," ITECKNE, vol. 18, no. 2, pp. 170–175, 2021.
- [4] Llerena, M. H. H. y Llerena, M. J. A., "Evaluación del índice de regularidad internacional (IRI) en las vías del cantón Riobamba utilizando sensores de aceleración y GPS integrados en un smartphone," Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, 2024.
- [5] S. F. Yeganeh, A. Mahmoudzadeh, M. A. Azizpour, y A. Golroo, "Validation of Smartphone-Based Pavement Roughness Measures," *arXiv preprint arXiv:1902.10699*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1902.10699>
- [6] G. Wang, M. Burrow y G. Ghataora, "Study of the factors affecting road roughness measurement using smartphones," Journal of Infrastructure Systems, vol. 26, no. 3, art. 04020020, sep. 2020. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000558](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000558)
- [7] C. M. Chang, "Sistemas de gestión de pavimentos: pasado, presente y futuro," Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, vol. 19–20, no. 1, pp. 231–239, 2020.
- [8] B. Allen, M. Grogg, K. Smith y S. Pai, Improving the Link Between Pavement Design and Asset Management: Pavement Management Functions, Processes, Inputs, and Outputs, FHWA-HIF-22-068, Federal Highway Administration, Washington, D. C., Estados Unidos, diciembre de 2022.
- [9] A. M. Al-Sabaei, M. I. Souliman y A. Jagadeesh, "Smartphone applications for pavement condition monitoring: A review," Construction and Building Materials, vol. 410, art. 134207, 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134207>
- [10] M. W. Sayers, T. D. Gillespie, and C. A. Queiroz, The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements, World Bank Technical Paper No. 45, Washington, DC: World Bank, 1986. [En línea]. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16974>
- [11] NEVI-12, "Norma Ecuatoriana Vial," 2013. [En línea]. Disponible en: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12_2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_6.pdf
- [12] C. Caliendo y M. L. De Guglielmo, "Evaluation of the Merlin Device for Road Roughness Measurement: Comparison with Laser Profilometers," International Journal of Pavement Engineering, vol. 21, no. 4, pp. 567–582, 2020.
- [13] J. Smith, R. Brown, y P. Wilson, "Advances in Road Profiling Technologies: A Review of Recent Developments in Laser-Based Roughness Measurement Systems," Transportation Research Record, vol. 2673, no. 5, pp. 89–102, 2019.

- [14] A. Alhasan y Y. Hassan, "Automated Road Roughness Measurement Using Multi-Sensor Mobile Platforms," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 48, no. 3, pp. 210–225, 2022.
- [15] P. Thiandee, B. Witchayangkoon, S. Sirimontree y P. Lertworawanich, "An experiment on measurement of pavement roughness via Android-based smartphones," *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, vol. 10, no. 9, art. 10A09G, jul. 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2019.114>
- [16] L. Janani, R. Doley, V. Sunitha y S. Mathew, "Precision enhancement of smartphone sensor-based pavement roughness estimation by standardizing host vehicle speed," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 49, no. 5, pp. 716–730, may. 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0182>
- [17] Vieyra Software, "Physics Toolbox Sensor Suite," 2023. Disponible en: <https://www.vieyrasoftware.net/>
- [18] M. A. Cundill, "MERLIN—A Low-Cost Machine for Measuring Road Roughness in Developing Countries," *Transportation Research Record*, no. 1291, pp. 106–112, ene. 1991. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0361198191129100115>
- [19] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, y M. del P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, McGraw-Hill Interamericana, 2010.
- [20] Saltos Zabala, E. L., "Determinación del índice de regularidad internacional de la vía los Ángeles-Andil," *Jipijapa-Unesum*, Facultad de Ciencias Técnicas, 2023.
- [21] Hyundai Motor Company, *Grand i10 Brochure*, 2019.
- [22] S. Eshkabilov y A. Yunusov, *Measuring and Assessing Road Profile by Employing Accelerometers and IRI Assessment Tools*, *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 3, núm. 2, pp. 24–40, mayo 2018. Disponible en: <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajtte>. doi: 10.11648/j.ajtte.20180302.12
- [23] D. Chicco, M. J. Warrens y G. Jurman, "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 7, art. no. e623, pp. 1–20, dic. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://peerj.com/articles/cs-623/>
- [24] D. Chicco, M. J. Warrens y G. Jurman, "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 7, art. no. e623, pp. 1–20, dic. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://peerj.com/articles/cs-623/>
- [25] S. Phongpradist, K. Sangsuwan y C. Wongwai, "Multiple Regression Model for Forecasting Quantity of Supply of Off-season Longan," *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, vol. 13, n° 3, pp. 391–402, diciembre 2014. Disponible en: <https://doi.org/10.12982/cmujns.2014.0044>
- [26] H. S. Darling, "Do you have a standard way of interpreting the standard deviation? A narrative review," *Cancer Research, Statistics, and Treatment*, vol. 5, pp. 728–733, octubre-diciembre 2022. Disponible en: https://doi.org/10.4103/crst.crst_284_22
- [27] M. Kumar, V. Singh y P. K. Pandey, "Application of coefficient of variation and standard deviation for the selection of stable genotypes under diverse environments," *The*

Chhattisgarh Journal of Agricultural Sciences, vol. 9, no. 2, pp. 289–294, 2018. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/342843748>

[28] C. Andrade, “The P value and statistical significance: Misunderstandings, explanations, challenges, and alternatives,” *Indian Journal of Psychological Medicine*, vol. 41, no. 3, pp.210 - 215, mayo junio 2019. Disponible en: https://doi.org/10.4103/IJPSYM.IJPSYM_193_19

ANEXOS

Anexo 1. Resultados del cálculo del IRI con smartphone

- Redmi 9s 20 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.036	0.041	0.043	0.040
2	0.026	0.027	0.040	0.031
3	0.016	0.025	0.033	0.025
4	0.020	0.027	0.028	0.025
5	0.018	0.028	0.017	0.021
6	0.025	0.034	0.034	0.031
7	0.033	0.037	0.035	0.035
8	0.018	0.033	0.024	0.025
9	0.028	0.027	0.020	0.025
10	0.018	0.034	0.030	0.027
11	0.019	0.018	0.018	0.019
12	0.021	0.020	0.020	0.020
13	0.017	0.021	0.049	0.029
14	0.018	0.023	0.016	0.019
15	0.021	0.017	0.027	0.022
16	0.024	0.019	0.026	0.023
17	0.024	0.023	0.041	0.029
18	0.014	0.033	0.018	0.022
19	0.017	0.016	0.018	0.017
20	0.021	0.017	0.023	0.020
21	0.017	0.018	0.021	0.019
22	0.019	0.022	0.024	0.022
23	0.018	0.031	0.023	0.024
24	0.027	0.019	0.018	0.022
25	0.016	0.023	0.026	0.021
26	0.022	0.023	0.021	0.022
27	0.016	0.022	0.018	0.018
28	0.016	0.022	0.018	0.019
29	0.027	0.020	0.024	0.023
30	0.019	0.022	0.039	0.027
31	0.093	0.032	0.053	0.059

- Redmi 11s 20 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.049	0.049	0.049	0.049
2	0.029	0.029	0.029	0.029
3	0.024	0.024	0.024	0.024
4	0.026	0.026	0.026	0.026
5	0.026	0.026	0.026	0.026
6	0.034	0.034	0.034	0.034
7	0.037	0.037	0.037	0.037
8	0.031	0.031	0.031	0.031
9	0.022	0.022	0.022	0.022
10	0.032	0.032	0.032	0.032
11	0.022	0.022	0.022	0.022
12	0.025	0.025	0.025	0.025
13	0.025	0.025	0.025	0.025
14	0.019	0.019	0.019	0.019
15	0.021	0.021	0.021	0.021
16	0.029	0.029	0.029	0.029
17	0.030	0.030	0.030	0.030
18	0.028	0.028	0.028	0.028
19	0.023	0.023	0.023	0.023
20	0.021	0.021	0.021	0.021
21	0.036	0.036	0.036	0.036
22	0.038	0.038	0.038	0.038
23	0.031	0.031	0.031	0.031
24	0.027	0.027	0.027	0.027
25	0.038	0.038	0.038	0.038
26	0.033	0.033	0.033	0.033
27	0.033	0.033	0.033	0.033
28	0.025	0.025	0.025	0.025
29	0.023	0.023	0.023	0.023
30	0.030	0.030	0.030	0.030
31	0.033	0.033	0.033	0.033
32	0.080	0.080	0.080	0.080

- Redmi 9s 25 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.046	0.056	0.070	0.057
2	0.030	0.032	0.047	0.037
3	0.028	0.028	0.039	0.032
4	0.026	0.024	0.022	0.024
5	0.025	0.021	0.030	0.025
6	0.034	0.039	0.030	0.035
7	0.053	0.049	0.051	0.051
8	0.021	0.027	0.034	0.027
9	0.031	0.030	0.028	0.030
10	0.026	0.037	0.027	0.030
11	0.022	0.023	0.023	0.023
12	0.030	0.027	0.023	0.027
13	0.025	0.028	0.028	0.027
14	0.024	0.023	0.025	0.024
15	0.024	0.028	0.021	0.024
16	0.048	0.047	0.019	0.038
17	0.021	0.042	0.046	0.037
18	0.080	0.024	0.033	0.046
19	0.027	0.019	0.033	0.026
20	0.040	0.022	0.019	0.027
21	0.026	0.033	0.018	0.026
22	0.034	0.028	0.043	0.035
23	0.024	0.029	0.037	0.030
24	0.036	0.024	0.028	0.029
25	0.026	0.037	0.034	0.032
26	0.041	0.035	0.032	0.036
27	0.027	0.023	0.025	0.025
28	0.025	0.029	0.024	0.026
29	0.036	0.029	0.025	0.030
30	0.025	0.036	0.030	0.030
31	0.081	0.068	0.023	0.057

- Redmi 11s 25 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.070	0.070	0.087	0.076
2	0.027	0.029	0.027	0.028
3	0.023	0.033	0.024	0.027
4	0.026	0.031	0.030	0.029
5	0.025	0.029	0.029	0.028
6	0.034	0.047	0.049	0.043
7	0.044	0.053	0.047	0.048
8	0.026	0.030	0.030	0.029
9	0.024	0.032	0.027	0.028
10	0.031	0.045	0.034	0.036
11	0.026	0.030	0.027	0.028
12	0.027	0.030	0.029	0.029
13	0.024	0.032	0.025	0.027
14	0.061	0.028	0.022	0.037
15	0.027	0.026	0.022	0.025
16	0.034	0.037	0.042	0.038
17	0.035	0.043	0.040	0.039
18	0.028	0.027	0.027	0.027
19	0.030	0.023	0.025	0.026
20	0.035	0.029	0.027	0.031
21	0.043	0.044	0.045	0.044
22	0.032	0.047	0.043	0.041
23	0.034	0.038	0.035	0.036
24	0.032	0.034	0.036	0.034
25	0.034	0.046	0.046	0.042
26	0.032	0.045	0.041	0.039
27	0.031	0.037	0.037	0.035
28	0.037	0.035	0.031	0.034
29	0.031	0.033	0.031	0.032
30	0.037	0.041	0.042	0.040

- Redmi 9s 30 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.042	0.063	0.067	0.057
2	0.032	0.046	0.029	0.036
3	0.029	0.042	0.027	0.033
4	0.026	0.048	0.024	0.033
5	0.050	0.046	0.026	0.041
6	0.052	0.045	0.047	0.048
7	0.059	0.053	0.074	0.062
8	0.033	0.026	0.048	0.036
9	0.039	0.044	0.020	0.034
10	0.035	0.033	0.034	0.034
11	0.032	0.025	0.024	0.027
12	0.036	0.035	0.026	0.032
13	0.023	0.030	0.022	0.025
14	0.044	0.053	0.015	0.037
15	0.065	0.051	0.032	0.049
16	0.034	0.052	0.045	0.044
17	0.031	0.039	0.036	0.035
18	0.027	0.025	0.026	0.026
19	0.027	0.030	0.022	0.026
20	0.041	0.052	0.015	0.036
21	0.039	0.047	0.031	0.039
22	0.035	0.055	0.036	0.042
23	0.030	0.036	0.025	0.030
24	0.056	0.062	0.028	0.048
25	0.039	0.037	0.045	0.041
26	0.041	0.047	0.035	0.041
27	0.034	0.037	0.031	0.034
28	0.029	0.031	0.038	0.033
29	0.037	0.047	0.042	0.042
30	0.039	0.036	0.030	0.035
31	0.041	0.061	0.040	0.047

- Redmi 11s 30 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.085	0.066	0.110	0.087
2	0.030	0.043	0.035	0.036
3	0.030	0.035	0.030	0.032
4	0.031	0.036	0.036	0.034
5	0.033	0.037	0.033	0.034
6	0.057	0.051	0.059	0.056
7	0.051	0.052	0.064	0.056
8	0.031	0.058	0.034	0.041
9	0.026	0.032	0.030	0.029
10	0.041	0.041	0.040	0.041
11	0.032	0.037	0.036	0.035
12	0.034	0.033	0.033	0.033
13	0.033	0.035	0.032	0.033
14	0.023	0.024	0.025	0.024
15	0.044	0.031	0.028	0.035
16	0.075	0.049	0.046	0.057
17	0.042	0.050	0.052	0.048
18	0.025	0.035	0.033	0.031
19	0.035	0.030	0.032	0.032
20	0.029	0.036	0.033	0.033
21	0.047	0.052	0.046	0.049
22	0.044	0.049	0.051	0.048
23	0.037	0.047	0.042	0.042
24	0.039	0.043	0.040	0.041
25	0.050	0.060	0.054	0.055
26	0.051	0.049	0.053	0.051
27	0.042	0.054	0.045	0.047
28	0.046	0.045	0.047	0.046
29	0.045	0.039	0.052	0.045
30	0.048	0.052	0.053	0.051
31	0.057	0.044	0.040	0.047

- Redmi 9s 35 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.066	0.086	0.064	0.072
2	0.049	0.032	0.053	0.044
3	0.031	0.023	0.023	0.025
4	0.026	0.033	0.031	0.030
5	0.037	0.049	0.027	0.038
6	0.044	0.054	0.049	0.049
7	0.048	0.044	0.041	0.044
8	0.044	0.028	0.020	0.030
9	0.025	0.022	0.043	0.030
10	0.038	0.032	0.024	0.031
11	0.027	0.031	0.030	0.029
12	0.032	0.026	0.028	0.029
13	0.032	0.019	0.027	0.026
14	0.025	0.040	0.043	0.036
15	0.035	0.076	0.074	0.062
16	0.053	0.044	0.042	0.046
17	0.041	0.031	0.022	0.032
18	0.029	0.025	0.021	0.025
19	0.022	0.023	0.028	0.024
20	0.025	0.033	0.037	0.032
21	0.038	0.033	0.037	0.036
22	0.036	0.029	0.036	0.034
23	0.035	0.027	0.035	0.032
24	0.036	0.043	0.038	0.039
25	0.047	0.041	0.052	0.047
26	0.046	0.030	0.036	0.037
27	0.045	0.038	0.032	0.038
28	0.048	0.043	0.056	0.049
29	0.038	0.037	0.036	0.037
30	0.043	0.037	0.060	0.047

- Redmi 11s 35 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.168	0.169	0.299	0.212
2	0.042	0.044	0.045	0.044
3	0.041	0.032	0.034	0.036
4	0.040	0.039	0.039	0.039
5	0.041	0.040	0.039	0.040
6	0.072	0.071	0.069	0.071
7	0.064	0.062	0.057	0.061
8	0.038	0.041	0.038	0.039
9	0.040	0.036	0.035	0.037
10	0.048	0.050	0.046	0.048
11	0.043	0.045	0.041	0.043
12	0.044	0.043	0.036	0.041
13	0.034	0.037	0.035	0.035
14	0.028	0.030	0.026	0.028
15	0.037	0.038	0.045	0.040
16	0.065	0.070	0.088	0.074
17	0.053	0.052	0.052	0.052
18	0.036	0.038	0.038	0.038
19	0.038	0.037	0.042	0.039
20	0.042	0.041	0.044	0.042
21	0.055	0.057	0.052	0.055
22	0.056	0.056	0.052	0.055
23	0.051	0.051	0.047	0.050
24	0.047	0.048	0.048	0.048
25	0.051	0.059	0.061	0.057
26	0.067	0.067	0.065	0.067
27	0.057	0.061	0.054	0.057
28	0.062	0.066	0.058	0.062
29	0.053	0.056	0.075	0.061
30	0.061	0.062	0.065	0.063
31	0.042	0.046	0.042	0.043

- Redmi 9s 40 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.094	0.065	0.060	0.073
2	0.057	0.050	0.039	0.049
3	0.040	0.031	0.028	0.033
4	0.032	0.055	0.029	0.039
5	0.060	0.031	0.031	0.041
6	0.047	0.071	0.059	0.059
7	0.037	0.041	0.060	0.046
8	0.023	0.047	0.037	0.036
9	0.061	0.029	0.068	0.053
10	0.031	0.058	0.040	0.043
11	0.027	0.030	0.037	0.031
12	0.029	0.041	0.039	0.036
13	0.020	0.030	0.030	0.026
14	0.059	0.018	0.024	0.034
15	0.073	0.067	0.044	0.062
16	0.044	0.121	0.101	0.088
17	0.025	0.044	0.032	0.034
18	0.023	0.029	0.025	0.026
19	0.028	0.020	0.022	0.023
20	0.038	0.035	0.023	0.032
21	0.038	0.048	0.046	0.044
22	0.031	0.039	0.042	0.038
23	0.039	0.035	0.029	0.035
24	0.038	0.049	0.037	0.041
25	0.055	0.049	0.048	0.051
26	0.039	0.058	0.066	0.054
27	0.042	0.040	0.037	0.040
28	0.063	0.069	0.046	0.060
29	0.052	0.054	0.057	0.054
30	0.060	0.080	0.043	0.061

- Redmi 11s 40 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.104	0.106	0.205	0.139
2	0.051	0.052	0.107	0.070
3	0.036	0.039	0.107	0.061
4	0.040	0.043	0.147	0.077
5	0.048	0.048	0.118	0.071
6	0.071	0.088	0.179	0.112
7	0.065	0.058	0.200	0.107
8	0.043	0.044	0.103	0.063
9	0.039	0.041	0.110	0.063
10	0.053	0.055	0.130	0.079
11	0.045	0.046	0.118	0.069
12	0.043	0.045	0.121	0.070
13	0.039	0.041	0.126	0.069
14	0.030	0.030	0.089	0.050
15	0.052	0.058	0.096	0.069
16	0.095	0.103	0.138	0.112
17	0.058	0.062	0.151	0.090
18	0.045	0.046	0.106	0.066
19	0.039	0.046	0.102	0.062
20	0.042	0.047	0.108	0.066
21	0.056	0.061	0.204	0.107
22	0.060	0.061	0.228	0.116
23	0.053	0.055	0.185	0.098
24	0.060	0.059	0.161	0.093
25	0.064	0.068	0.201	0.111
26	0.084	0.083	0.209	0.125
27	0.066	0.072	0.188	0.109
28	0.080	0.082	0.145	0.102
29	0.102	0.093	0.119	0.105
30	0.073	0.073	0.153	0.100
31	0.047	0.044	0.139	0.077

- Redmi 9s 45 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.083	0.091	0.088	0.088
2	0.061	0.051	0.057	0.056
3	0.048	0.029	0.026	0.034
4	0.037	0.044	0.035	0.039
5	0.040	0.058	0.029	0.042
6	0.063	0.062	0.089	0.071
7	0.042	0.060	0.054	0.052
8	0.034	0.022	0.030	0.029
9	0.031	0.053	0.042	0.042
10	0.052	0.025	0.038	0.038
11	0.027	0.042	0.028	0.032
12	0.035	0.035	0.029	0.033
13	0.034	0.040	0.035	0.036
14	0.027	0.065	0.032	0.041
15	0.046	0.080	0.082	0.069
16	0.093	0.050	0.067	0.070
17	0.044	0.030	0.039	0.038
18	0.033	0.031	0.025	0.030
19	0.030	0.051	0.030	0.037
20	0.037	0.054	0.040	0.044
21	0.040	0.066	0.043	0.050
22	0.043	0.062	0.077	0.061
23	0.042	0.060	0.041	0.048
24	0.048	0.060	0.051	0.053
25	0.045	0.075	0.045	0.055
26	0.068	0.045	0.082	0.065
27	0.043	0.055	0.049	0.049
28	0.047	0.073	0.063	0.061
29	0.067	0.051	0.066	0.061
30	0.057	0.050	0.063	0.057

- Redmi 11s 45 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.107	0.130	0.100	0.112
2	0.064	0.060	0.055	0.059
3	0.039	0.040	0.036	0.038
4	0.044	0.045	0.042	0.044
5	0.056	0.057	0.055	0.056
6	0.093	0.090	0.080	0.088
7	0.079	0.068	0.069	0.072
8	0.047	0.052	0.047	0.049
9	0.049	0.044	0.045	0.046
10	0.062	0.069	0.059	0.063
11	0.048	0.055	0.053	0.052
12	0.051	0.055	0.050	0.052
13	0.051	0.052	0.050	0.051
14	0.038	0.037	0.036	0.037
15	0.074	0.066	0.064	0.068
16	0.114	0.089	0.126	0.110
17	0.055	0.071	0.059	0.062
18	0.055	0.047	0.045	0.049
19	0.046	0.039	0.042	0.043
20	0.049	0.052	0.056	0.052
21	0.062	0.064	0.060	0.062
22	0.064	0.077	0.066	0.069
23	0.061	0.071	0.068	0.067
24	0.068	0.109	0.083	0.087
25	0.076	0.064	0.057	0.066
26	0.095	0.094	0.105	0.098
27	0.074	0.077	0.074	0.075
28	0.093	0.096	0.095	0.095
29	0.120	0.112	0.109	0.114
30	0.079	0.068	0.081	0.076
31	0.050	0.050	0.054	0.051

- Redmi 9s 50 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.099	0.071	0.090	0.087
2	0.064	0.124	0.058	0.082
3	0.030	0.028	0.035	0.031
4	0.035	0.036	0.049	0.040
5	0.049	0.057	0.045	0.050
6	0.072	0.060	0.083	0.072
7	0.057	0.069	0.077	0.068
8	0.036	0.078	0.048	0.054
9	0.050	0.039	0.038	0.042
10	0.056	0.065	0.057	0.059
11	0.039	0.057	0.042	0.046
12	0.050	0.047	0.052	0.049
13	0.054	0.041	0.041	0.045
14	0.090	0.033	0.046	0.056
15	0.040	0.056	0.073	0.057
16	0.034	0.087	0.084	0.068
17	0.059	0.087	0.061	0.069
18	0.049	0.048	0.041	0.046
19	0.046	0.042	0.033	0.040
20	0.055	0.044	0.057	0.052
21	0.046	0.063	0.062	0.057
22	0.090	0.060	0.069	0.073
23	0.043	0.056	0.071	0.056
24	0.086	0.068	0.070	0.075
25	0.055	0.062	0.091	0.070
26	0.064	0.099	0.071	0.078
27	0.082	0.062	0.075	0.073
28	0.087	0.090	0.078	0.085
29	0.078	0.068	0.077	0.074
30	0.086	0.071	0.077	0.078
31	0.070	0.067	0.082	0.073

- Redmi 11s 50 km/h

Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.111	0.097	0.133	0.114
2	0.069	0.073	0.064	0.068
3	0.048	0.048	0.053	0.050
4	0.051	0.055	0.063	0.056
5	0.065	0.067	0.085	0.072
6	0.091	0.102	0.103	0.099
7	0.069	0.093	0.096	0.086
8	0.045	0.056	0.060	0.054
9	0.050	0.055	0.049	0.051
10	0.078	0.085	0.084	0.082
11	0.066	0.065	0.051	0.061
12	0.064	0.065	0.073	0.067
13	0.062	0.063	0.051	0.059
14	0.043	0.048	0.048	0.046
15	0.052	0.083	0.092	0.076
16	0.089	0.131	0.103	0.108
17	0.065	0.088	0.070	0.074
18	0.056	0.060	0.063	0.060
19	0.055	0.059	0.061	0.058
20	0.064	0.064	0.074	0.067
21	0.079	0.081	0.066	0.076
22	0.083	0.082	0.090	0.085
23	0.057	0.082	0.096	0.078
24	0.121	0.093	0.093	0.102
25	0.071	0.074	0.090	0.078
26	0.108	0.127	0.127	0.121
27	0.093	0.099	0.102	0.098
28	0.108	0.123	0.108	0.113
29	0.107	0.109	0.118	0.111
30	0.100	0.100	0.095	0.099
31	0.064	0.060	0.064	0.063

- Redmi 9s 55 km/h

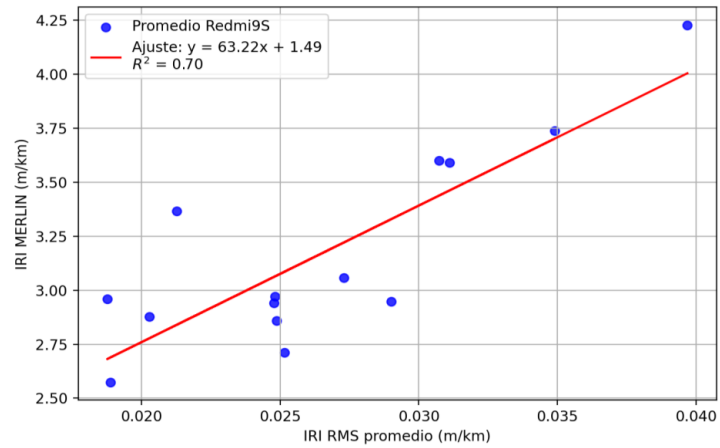
Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.116	0.090	0.098	0.101
2	0.082	0.086	0.094	0.087
3	0.034	0.036	0.035	0.035
4	0.049	0.054	0.048	0.050
5	0.070	0.053	0.059	0.061
6	0.073	0.099	0.089	0.087
7	0.063	0.075	0.077	0.072
8	0.053	0.041	0.044	0.046
9	0.039	0.036	0.047	0.041
10	0.067	0.062	0.069	0.066
11	0.038	0.047	0.038	0.041
12	0.047	0.064	0.046	0.052
13	0.048	0.043	0.052	0.048
14	0.054	0.032	0.033	0.040
15	0.079	0.067	0.078	0.075
16	0.075	0.096	0.102	0.091
17	0.039	0.057	0.076	0.057
18	0.037	0.040	0.047	0.041
19	0.052	0.042	0.052	0.049
20	0.073	0.050	0.050	0.058
21	0.067	0.067	0.066	0.067
22	0.082	0.077	0.061	0.073
23	0.051	0.078	0.061	0.063
24	0.136	0.102	0.075	0.104
25	0.054	0.048	0.062	0.055
26	0.071	0.079	0.105	0.085
27	0.095	0.062	0.051	0.069
28	0.061	0.076	0.076	0.071
29	0.090	0.089	0.091	0.090
30	0.078	0.065	0.094	0.079
31	0.060	0.116	0.083	0.087

- Redmi 11s 55 km/h

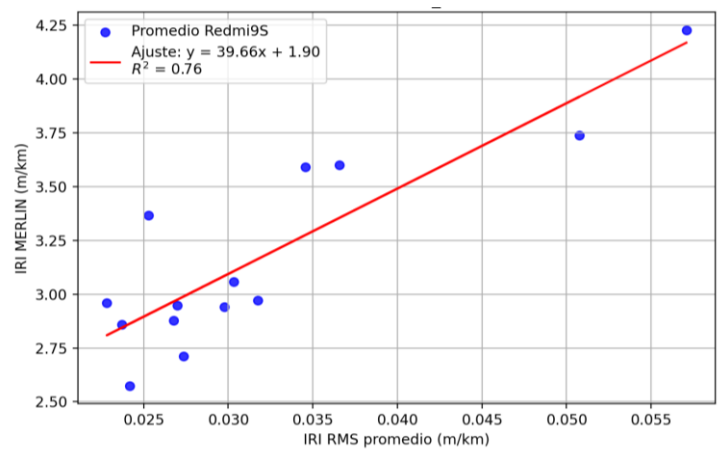
Tramo N°	IRI RMS 1	IRI RMS 2	IRI RMS 3	IRI RMS Promedio
1	0.188	0.127	0.208	0.174
2	0.102	0.080	0.095	0.092
3	0.050	0.049	0.053	0.051
4	0.059	0.060	0.061	0.060
5	0.085	0.078	0.075	0.079
6	0.101	0.108	0.117	0.108
7	0.104	0.081	0.087	0.091
8	0.065	0.055	0.068	0.063
9	0.055	0.049	0.049	0.051
10	0.087	0.084	0.095	0.089
11	0.072	0.060	0.056	0.062
12	0.074	0.068	0.064	0.069
13	0.056	0.064	0.045	0.055
14	0.056	0.047	0.074	0.059
15	0.110	0.087	0.115	0.104
16	0.146	0.143	0.114	0.134
17	0.066	0.060	0.062	0.062
18	0.065	0.063	0.064	0.064
19	0.061	0.051	0.053	0.055
20	0.090	0.078	0.101	0.090
21	0.065	0.079	0.067	0.070
22	0.109	0.083	0.076	0.090
23	0.088	0.100	0.107	0.098
24	0.115	0.110	0.093	0.106
25	0.136	0.062	0.104	0.101
26	0.114	0.124	0.098	0.112
27	0.133	0.105	0.115	0.118
28	0.120	0.105	0.096	0.107
29	0.084	0.143	0.121	0.116
30	0.082	0.089	0.090	0.087
31	0.064	0.103	0.066	0.078

Anexo 2. Modelos de ajuste lineal

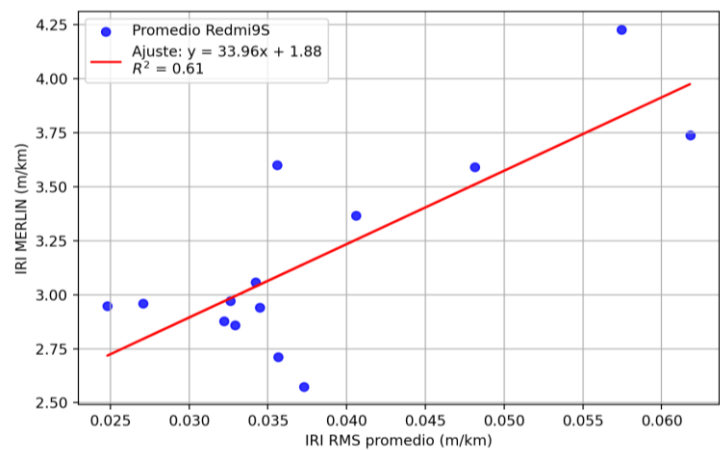
- Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 20 km/h



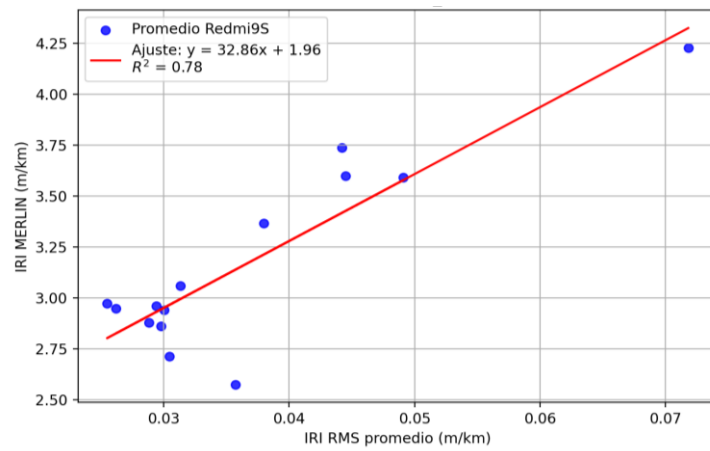
- Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 25 km/h



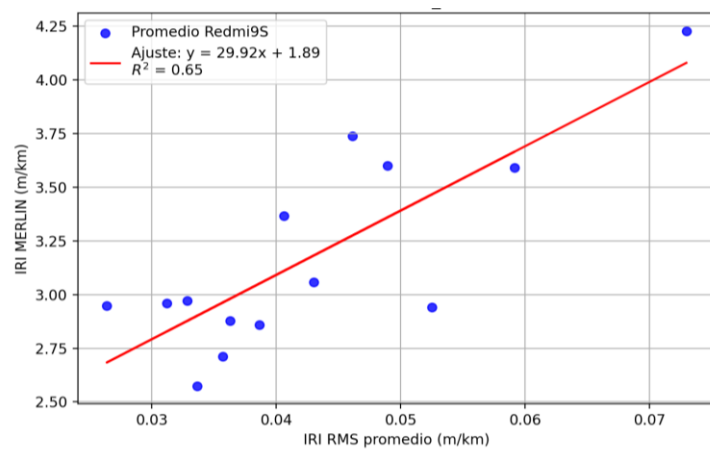
- Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 30 km/h



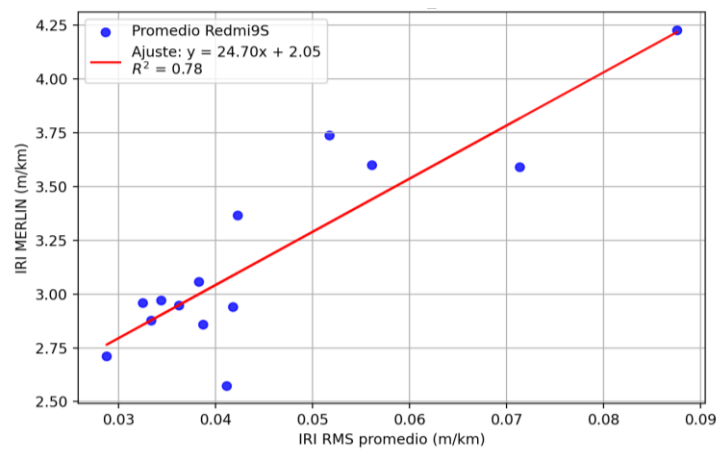
- Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 35 km/h



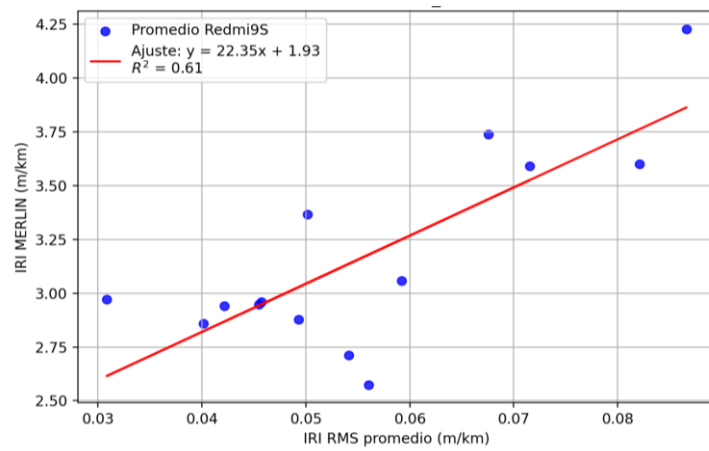
- Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 40 km/h



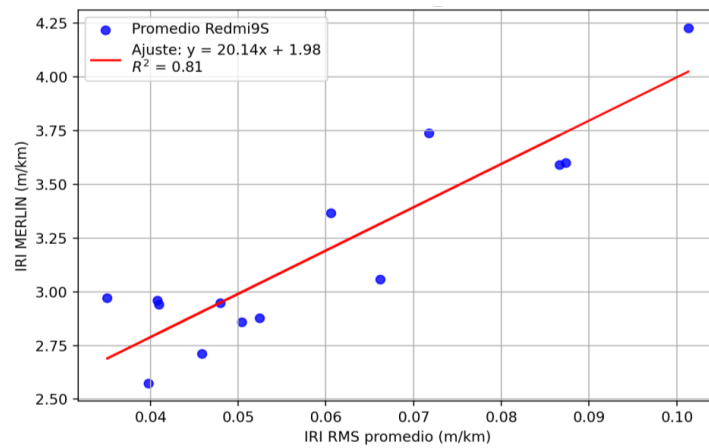
- Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 45 km/h



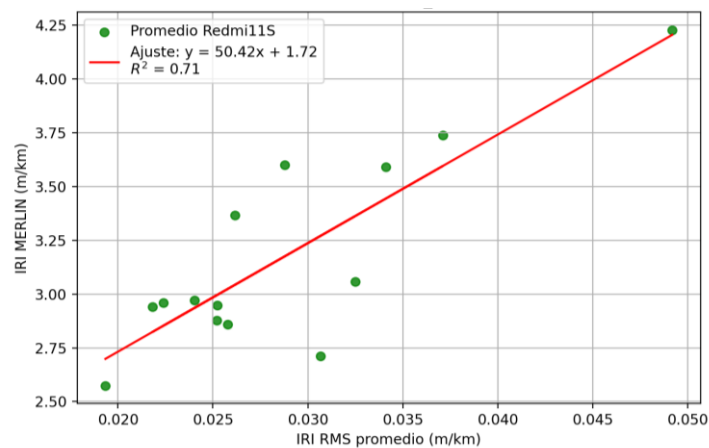
- Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 50 km/h



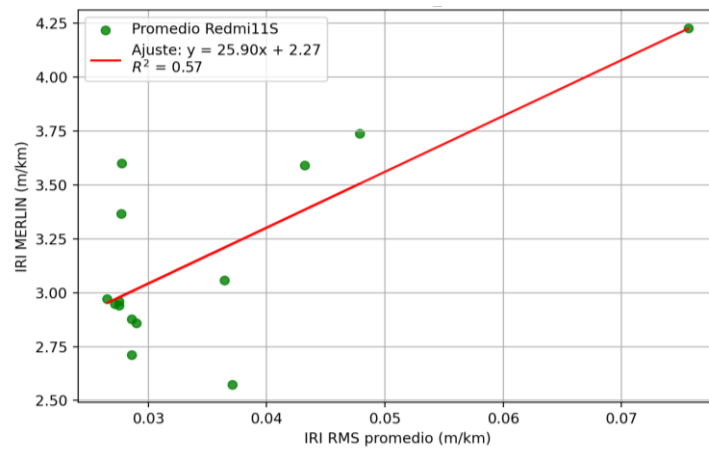
- Regresión Lineal smartphone Redmi 9s a 55 km/h



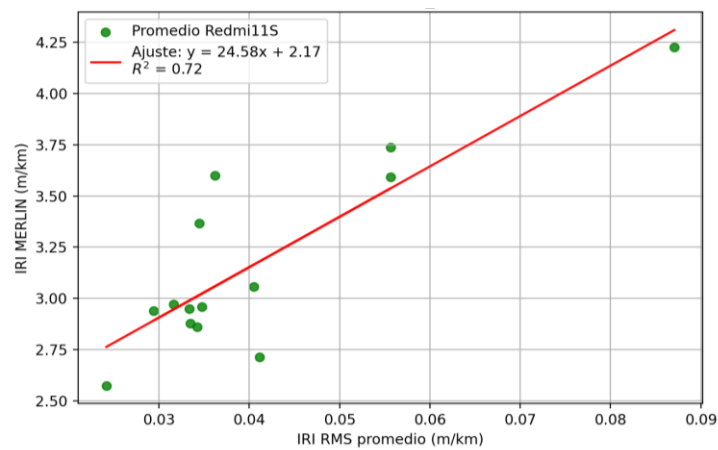
- Regresión Lineal smartphone Redmi 11s a 20 km/h



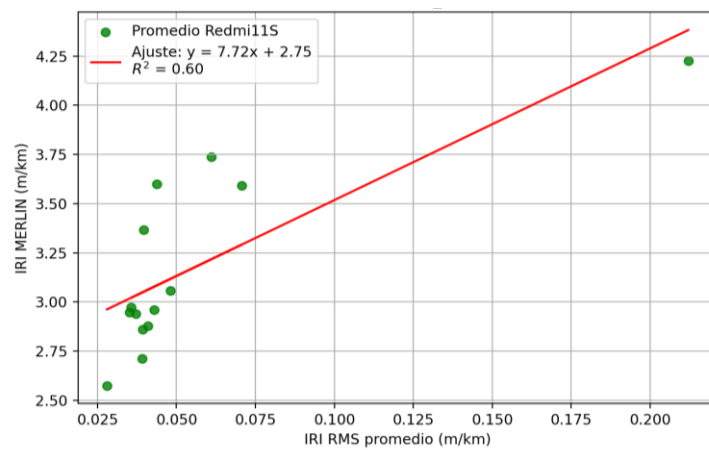
- Regresión Lineal smartphone Redmi 11s a 25 km/h



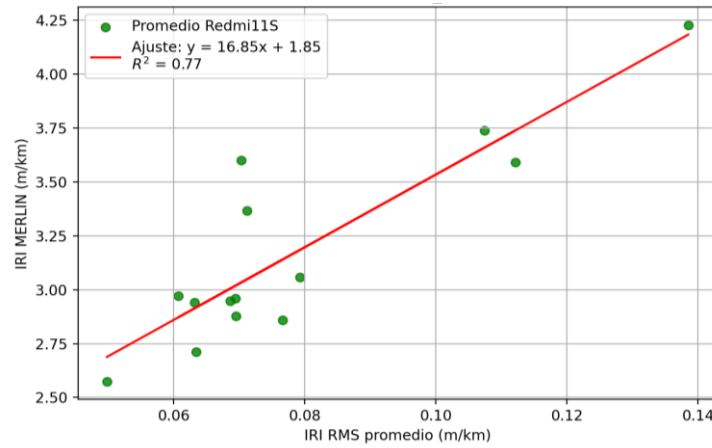
- Regresión Lineal smartphone Redmi 11s a 30 km/h



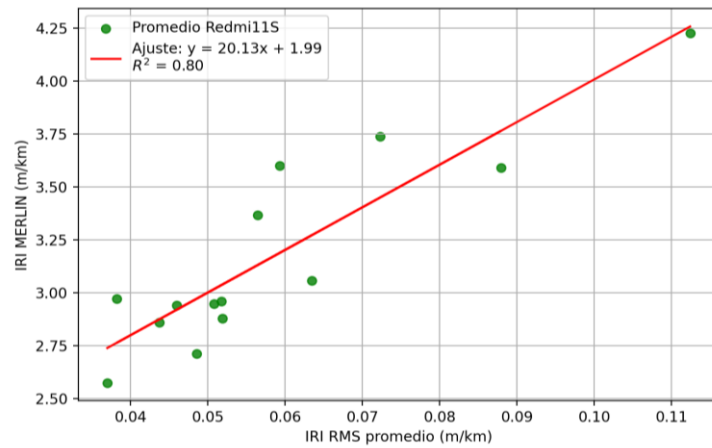
- Regresión Lineal smartphone Redmi 11s a 35 km/h



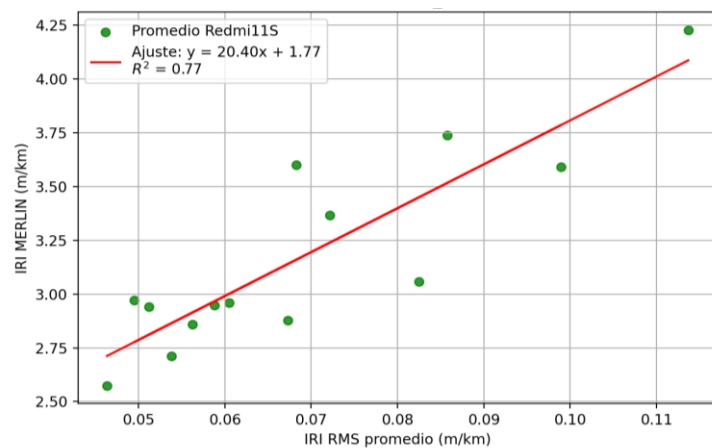
- Regresión Lineal smartphone Redmi 11s a 40 km/h



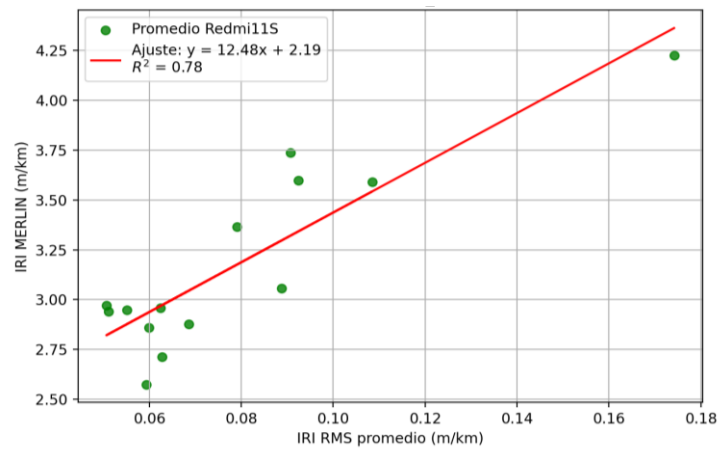
- Regresión Lineal smartphone Redmi 11s a 45 km/h



- Regresión Lineal smartphone Redmi 11s a 50 km/h



- Regresión Lineal smartphone Redmi 11s a 55 km/h



Anexo 3. Cálculos del MAPE para cada dispositivo y velocidad

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 20 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.040	4.004	4.226	5.57%
0.031	3.438	3.599	4.69%
0.025	3.064	2.972	3.00%
0.025	3.067	2.860	6.75%
0.021	2.840	3.366	18.52%
0.031	3.462	3.591	3.74%
0.035	3.701	3.737	0.97%
0.025	3.085	2.713	12.08%
0.025	3.061	2.940	3.98%
0.027	3.221	3.058	5.07%
0.019	2.681	2.959	10.37%
0.020	2.777	2.877	3.61%
0.029	3.329	2.948	11.44%
0.019	2.689	2.573	4.31%
MAPE (%)			6.72%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 25 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.057	4.168	4.226	1.40%
0.037	3.354	3.599	7.29%
0.032	3.163	2.972	6.04%
0.024	2.845	2.860	0.52%
0.025	2.906	3.366	15.82%
0.035	3.274	3.591	9.68%
0.051	3.918	3.737	4.61%
0.027	2.989	2.713	9.26%
0.030	3.084	2.940	4.69%
0.030	3.106	3.058	1.55%
0.023	2.809	2.959	5.36%
0.027	2.966	2.877	2.98%
0.027	2.974	2.948	0.89%
0.024	2.863	2.573	10.11%
		MAPE (%)	5.73%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 30 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.057	3.826	4.226	10.47%
0.036	3.084	3.599	16.70%
0.033	2.983	2.972	0.38%
0.033	2.994	2.860	4.47%
0.041	3.254	3.366	3.45%
0.048	3.510	3.591	2.29%
0.062	3.974	3.737	5.97%
0.036	3.087	2.713	12.12%
0.034	3.047	2.940	3.51%
0.034	3.037	3.058	0.69%
0.027	2.794	2.959	5.90%
0.032	2.970	2.877	3.11%
0.025	2.718	2.948	8.48%
0.037	3.142	2.573	18.10%
		MAPE (%)	6.83%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 35 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.072	4.324	4.226	2.25%
0.044	3.427	3.599	5.03%
0.025	2.802	2.972	6.07%
0.030	2.943	2.860	2.84%
0.038	3.212	3.366	4.81%
0.049	3.578	3.591	0.37%
0.044	3.416	3.737	9.38%
0.030	2.965	2.713	8.52%
0.030	2.951	2.940	0.40%
0.031	2.994	3.058	2.14%
0.029	2.931	2.959	0.96%
0.029	2.912	2.877	1.19%
0.026	2.826	2.948	4.33%
0.036	3.138	2.573	18.00%
		MAPE (%)	4.73%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 40 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.073	4.078	4.226	3.63%
0.049	3.359	3.599	7.14%
0.033	2.877	2.972	3.29%
0.039	3.051	2.860	6.27%
0.041	3.110	3.366	8.22%
0.059	3.665	3.591	2.01%
0.046	3.275	3.737	14.12%
0.036	2.962	2.713	8.43%
0.053	3.466	2.940	15.20%
0.043	3.182	3.058	3.90%
0.031	2.828	2.959	4.62%
0.036	2.980	2.877	3.46%
0.026	2.683	2.948	9.87%
0.034	2.901	2.573	11.29%
		MAPE (%)	7.25%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 45 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.088	4.217	4.226	0.23%
0.056	3.440	3.599	4.62%
0.034	2.903	2.972	2.36%
0.039	3.010	2.860	4.99%
0.042	3.098	3.366	8.64%
0.071	3.817	3.591	5.91%
0.052	3.332	3.737	12.15%
0.029	2.764	2.713	1.87%
0.042	3.086	2.940	4.75%
0.038	2.999	3.058	1.97%
0.032	2.856	2.959	3.61%
0.033	2.877	2.877	0.00%
0.036	2.949	2.948	0.04%
0.041	3.070	2.573	16.17%
		MAPE (%)	4.81%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 50 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.087	3.862	4.226	9.43%
0.082	3.761	3.599	4.31%
0.031	2.615	2.972	13.64%
0.040	2.823	2.860	1.31%
0.050	3.047	3.366	10.48%
0.072	3.525	3.591	1.87%
0.068	3.436	3.737	8.76%
0.054	3.136	2.713	13.50%
0.042	2.869	2.940	2.48%
0.059	3.249	3.058	5.89%
0.046	2.948	2.959	0.37%
0.049	3.028	2.877	4.96%
0.045	2.942	2.948	0.21%
0.056	3.178	2.573	19.04%
		MAPE (%)	6.87%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 9s a 55 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.101	4.023	4.226	5.05%
0.087	3.742	3.599	3.82%
0.035	2.689	2.972	10.52%
0.050	2.998	2.860	4.63%
0.061	3.203	3.366	5.10%
0.087	3.728	3.591	3.67%
0.072	3.428	3.737	9.00%
0.046	2.906	2.713	6.66%
0.041	2.808	2.940	4.68%
0.066	3.316	3.058	7.79%
0.041	2.805	2.959	5.50%
0.052	3.039	2.877	5.32%
0.048	2.949	2.948	0.04%
0.040	2.784	2.573	7.55%
		MAPE (%)	5.67%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 11s a 20 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.049	4.204	4.226	0.53%
0.029	3.175	3.599	13.37%
0.024	2.935	2.972	1.24%
0.026	3.023	2.860	5.41%
0.026	3.043	3.366	10.60%
0.034	3.443	3.591	4.28%
0.037	3.595	3.737	3.94%
0.031	3.271	2.713	17.06%
0.022	2.823	2.940	4.11%
0.032	3.362	3.058	9.05%
0.022	2.853	2.959	3.71%
0.025	2.995	2.877	3.93%
0.025	2.996	2.948	1.61%
0.019	2.699	2.573	4.65%
		MAPE (%)	5.96%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 11s a 25 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.076	4.224	4.226	0.05%
0.028	2.984	3.599	20.59%
0.027	2.952	2.972	0.67%
0.029	3.016	2.860	5.20%
0.028	2.982	3.366	12.87%
0.043	3.384	3.591	6.11%
0.048	3.505	3.737	6.61%
0.029	3.006	2.713	9.77%
0.028	2.978	2.940	1.28%
0.036	3.208	3.058	4.69%
0.028	2.978	2.959	0.63%
0.029	3.006	2.877	4.27%
0.027	2.968	2.948	0.69%
0.037	3.226	2.573	20.23%
		MAPE (%)	6.69%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 11s a 30 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.087	4.309	4.226	1.92%
0.036	3.059	3.599	17.66%
0.032	2.946	2.972	0.87%
0.034	3.010	2.860	5.01%
0.034	3.016	3.366	11.59%
0.056	3.537	3.591	1.54%
0.056	3.537	3.737	5.66%
0.041	3.181	2.713	14.73%
0.029	2.892	2.940	1.66%
0.041	3.165	3.058	3.39%
0.035	3.023	2.959	2.10%
0.033	2.992	2.877	3.83%
0.033	2.989	2.948	1.36%
0.024	2.763	2.573	6.88%
		MAPE (%)	5.59%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 11s a 35 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.212	4.383	4.226	3.57%
0.044	3.085	3.599	16.68%
0.036	3.021	2.972	1.65%
0.039	3.050	2.860	6.24%
0.040	3.053	3.366	10.27%
0.071	3.292	3.591	9.09%
0.061	3.217	3.737	16.15%
0.039	3.048	2.713	11.00%
0.037	3.032	2.940	3.06%
0.048	3.118	3.058	1.92%
0.043	3.078	2.959	3.86%
0.041	3.062	2.877	6.03%
0.035	3.017	2.948	2.30%
0.028	2.962	2.573	13.13%
		MAPE (%)	7.50%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 11s a 40 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.139	4.182	4.226	1.05%
0.070	3.033	3.599	18.66%
0.061	2.872	2.972	3.47%
0.077	3.139	2.860	8.90%
0.071	3.048	3.366	10.43%
0.112	3.738	3.591	3.94%
0.107	3.659	3.737	2.13%
0.063	2.917	2.713	7.02%
0.063	2.914	2.940	0.89%
0.079	3.185	3.058	3.98%
0.069	3.018	2.959	1.95%
0.070	3.020	2.877	4.71%
0.069	3.005	2.948	1.89%
0.050	2.688	2.573	4.27%
		MAPE (%)	5.24%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 11s a 45 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.112	4.257	4.226	0.71%
0.059	3.188	3.599	12.90%
0.038	2.764	2.972	7.52%
0.044	2.874	2.860	0.49%
0.056	3.130	3.366	7.55%
0.088	3.764	3.591	4.60%
0.072	3.449	3.737	8.35%
0.049	2.972	2.713	8.72%
0.046	2.919	2.940	0.70%
0.063	3.272	3.058	6.53%
0.052	3.036	2.959	2.54%
0.052	3.039	2.877	5.30%
0.051	3.017	2.948	2.30%
0.037	2.739	2.573	6.04%
		MAPE (%)	5.30%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 11s a 50 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.114	4.085	4.226	3.45%
0.068	3.160	3.599	13.91%
0.050	2.776	2.972	7.03%
0.056	2.914	2.860	1.85%
0.072	3.239	3.366	3.92%
0.099	3.785	3.591	5.13%
0.086	3.517	3.737	6.26%
0.054	2.864	2.713	5.30%
0.051	2.811	2.940	4.59%
0.082	3.449	3.058	11.35%
0.061	3.001	2.959	1.40%
0.067	3.140	2.877	8.35%
0.059	2.966	2.948	0.60%
0.046	2.712	2.573	5.11%
		MAPE (%)	5.59%

- MAPE de la predicción de IRI para smartphone Redmi 11s a 55 km/h

IRI RMS	Predicción de IRI (m/km)	IRI Merlin (m/km)	Porcentaje de error (%)
0.174	4.362	4.226	3.11%
0.092	3.342	3.599	7.68%
0.051	2.821	2.972	5.33%
0.060	2.937	2.860	2.63%
0.079	3.176	3.366	5.97%
0.108	3.543	3.591	1.37%
0.091	3.321	3.737	12.52%
0.063	2.973	2.713	8.75%
0.051	2.827	2.940	3.99%
0.089	3.297	3.058	7.24%
0.062	2.968	2.959	0.29%
0.069	3.044	2.877	5.49%
0.055	2.878	2.948	2.45%
0.059	2.930	2.573	12.17%
		MAPE (%)	5.64%