

Generation of efficiency in pavement condition inspection on Panamericana Sur Km 16.3 using the remotely piloted aircraft system VES 2024

Stalin Costilla Hurtado¹; Charlotte Esther García Romero²

^{1,2}Universidad Autónoma del Perú, Perú, scostilla@autonoma.edu.pe, cgarcia31@autonoma.edu.pe

Abstract– Civil engineers are responsible for the design, management, projection, and construction in the area of geotechnics and roadways. In the CE.010 "Pavement Regulations" standard, in its section 6.4, the foundations are established to justify the need for pavement rehabilitation, indicating the application of inspections that allow determining the condition of the road and executing the required rehabilitation. Highways are vital for the development of Peru, facilitating access, communication, and the economic growth of society. Therefore, concerns arise regarding the high costs and the low quality of inspections due to the outdated methodology of the regulation, which has not been updated for fourteen years despite current scientific and technological advances. Thus, it is proposed to generate efficiency in the inspection of the pavement condition by implementing the remotely piloted aircraft system (RPAS) and thereby update the regulation by incorporating a detailed methodology that relates the roughness index. The use of RPAS allows for efficient identification of the IRI in pavements, generating advantages compared to the Merlin. This facilitates management and increases productivity in evaluation work through the established objectives: to determine how the implementation of the remotely piloted aircraft influences efficiency, as well as how the use of RPAS influences performance, data quality, and operations in generating efficiency in the inspection of the pavement condition at Panamericana Sur Km 16.3, in Villa El Salvador, year 2024.

Keywords: Efficiency 1, Management 2, Remotely Piloted Aircraft 3, IRI 4.

Generación de eficiencia en la inspección del estado del pavimento en la Panamericana Sur Km 16.3 usando el sistema de aeronave pilotada remotamente VES 2024

Stalin Costilla Hurtado¹; Charlotte Esther García Romero²

^{1,2}Universidad Autónoma del Perú, Perú, scostilla@autonoma.edu.pe, cgarcia31@autonoma.edu.pe

Resumen– Los ingenieros civiles son los encargados del diseño, gestión, proyección y construcción en el área de geotecnia y vías. En la norma CE.010 “Normativa de Pavimentos”, en su apartado 6.4 establece los fundamentos para justificar la necesidad de una rehabilitación del pavimento, indicando la aplicación de inspección que permitan determinar el estado de la carretera y ejecutar la rehabilitación requerida. Las autopistas son vitales para el desarrollo del Perú, al facilitar el acceso, la comunicación y el crecimiento económico de la sociedad. Por lo que, preocupan los costos elevados y la baja calidad de inspección debido a la metodología desactualizada de la normativa la cual lleva catorce años sin ser actualizada, a pesar de los avances científicos y tecnológicos actuales. Por ello, se propone generar la eficiencia en la inspección del estado del pavimento implementando el sistema aeronave pilotada remotamente y así poder actualizar la normativa incorporando una metodología detallada que relaciona el índice de rugosidad. El uso de RPAS permite identificar el IRI en pavimentos con eficiencia, generando ventajas en comparación del Merlín, Esto facilita la gestión y aumenta la productividad en los trabajos de evaluación a través de los objetivos planteados; determinar de qué manera influye la implementación de la aeronave pilotada remotamente en la eficiencia, así mismo como influye en el desempeño, en la data y en la operación el uso del RPAS en la generación de eficiencia en la inspección del estado del pavimento Panamericana Sur Km 16.3, en Villa el Salvador, año 2024.

Palabras clave: Eficiencia 1, Gestión 2, Aeronave pilotada remotamente 3, IRI 4.

I. INTRODUCCIÓN

La circulación por carretera es el medio de transporte más utilizado en el mundo, ya que genera comunicación entre dos puntos, y requiere estar en condiciones óptimas para garantizar la seguridad, tiempo y comodidad [1]. La inspección de irregularidades en el pavimento es un método general ejecutado por un ingeniero civil especializado en vías y transportes, que se obtiene por el tiempo respecto a la distancia que depende del esfuerzo físico y visual [2]. Así mismo, es el proceso sistemático de evaluar las condiciones superficiales de las carreteras para la identificación de irregularidades que afectan la funcionalidad y seguridad vial [3]. La Norma Técnica Peruana (NTP) CE.010 de Pavimentos Urbanos establece el proceso de inspección como la justificación fundamental para autorizar una rehabilitación, ya que está relacionado directamente con el estado de la carretera [4].

La rugosidad del pavimento es el criterio que involucra

la frecuencia de las deformaciones altimétricas en relación directa con el nivel de confort durante la circulación por la carretera. En el Perú se aplica el IRI (Índice Internacional Rugosímetro) 1990, que es extraído del Banco Mundial para su inspección y calibración general [5]. Las investigaciones del Banco Mundial encuentran el parámetro de la rugosidad con diferentes tipos de equipos calibrados y también de inspección visual que relacionan el tipo y estado del pavimento con la aceleración sobre distancia del movimiento de los vehículos [6]. El IRI es un indicador clave en el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos [7]. El vehículo de Merlín es un perfilómetro que se usa de manera manual y visual que ha sido diseñado para los países en vías de crecimiento desde 1995 [8]. La metodología requiere la intervención de un mínimo de dos individuos, para la conducción del instrumento y lectura de los datos, el rango de inspección mínimo es de 400 metros lineales, siguiendo la ruta de cualquiera de los ejes del vehículo [9].

La rueda de Merlín es propensa a errores y presenta un bajo rendimiento (desempeño limitado e interrupción del flujo vehicular continuo), además de una restricción operativa (debido a la dependencia del estado de pavimento y las limitaciones visuales) [10]. A pesar de la alta demanda, la fijación de los datos presenta una vulnerabilidad en la veracidad de información (variación del error y fragilidad en los datos) debido a que se basa en una inspección manual y visual, este proceso necesita tiempo adicional para inspeccionar [1]. Porque, el método se relaciona a errores humanos, perturbando la confiabilidad en la inspección [1].

Por ello, integrar nuevas tecnologías para la modernización tecnológica significa usar herramientas que permitan optimizar los procesos de recolección de datos, reduciendo tiempos, costos y mejorando la calidad de proyectos [11],[16]. Ante ello, es esencial implementar procesos de inspección y monitoreo [3]. En este sentido, la eficiencia operativa se traduce en facilitar diagnósticos eficientes, cumpliendo objetivos con planificación, que permitan a los responsables tomar decisiones precisas [11],[16]. Para así, establecer los planes de mantenimiento [10], [12]. Por esa razón se busca la generación de eficiencia en la inspección del estado del pavimento Panamericana Sur Km 16.3 implementando el sistema aeronave pilotada remotamente, Villa El Salvador, Año 2024,

en la noción que los resultados obtenidos estén a servicio de la sociedad porque así detectarán la actualidad de las calles con mayor eficiencia y sin mayor dificultad, así mismo los beneficiarios serán los educandos y profesionales de ingeniería civil de la Universidad Autónoma del Perú y demás universidades por el material entregado, que demuestra una metodología con un desempeño óptimo, seguridad en la data y disponibilidad operativa continua.

Los enfoques basados en Aeronave pilotada remotamente (RPAS) destacan por su flexibilidad y costos reducidos [13], [15]. En la actualidad, se ha popularizado el uso de RPAS para la inspección de pavimentos, ofreciendo mayor seguridad para los usuarios y evaluadores sin interrumpir en el flujo vehicular [16]. Este método también proporciona rapidez en las inspecciones y permite identificar automáticamente las fallas [17]. Los investigadores destacan que la identificación manual de patologías mediante RPAS presenta menor discrepancia en comparación con estudios realizados en el campo [18]. Las tecnologías RPAS es especialmente útil para cartografiar áreas de difícil acceso, como zonas inundables y caminos forestales [19], [20]. Además, esta metodología es crucial para obtener datos precisos, aplicables a diversas áreas de la ingeniería [21].

La evaluación de pavimentos mediante RPAS resulta ventajosa en términos de tiempo, seguridad y conveniencia para operarios especialistas e interesados en el área, en comparación con métodos tradicionales [19],[22]. Los datos recopilados pueden ser analizados múltiples veces sin nuevos vuelos, facilitando así la planificación del mantenimiento vial [23]. La metodología implementada del dron que gestiona datos en 3 dimensiones e información para el mantenimiento de pavimentos genera más efectividad y una mayor eficiencia, porque está respaldada por una nube de puntos, obtenida por la fotogrametría [24]. Los enfoques basados en RPAS han demostrado ser efectivos para recopilar y procesar datos sobre el deterioro del pavimento

[25],[27]. Las ventajas del RPAS incluyen flexibilidad, costos bajos en comparación con vehículos terrestres, facilidad de maniobra, seguridad para el personal y capacidad para generar modelos 3D [13],[14]. Además, los RPAS pueden acceder a áreas difíciles sin comprometer la seguridad del operador [13],[15].

Según el MTC [28], la red vial nacional abarca 180.385,74 kilómetros, siendo así que el 17,2% son carreteras asfaltadas, el 26,1% carreteras compactadas, el 20,8% carreteras sin compactar, el 32,2% senderos y el 3,7% son carreteras planificadas. El área de carreteras y transportes cuenta con el respaldo del jefe del Gabinete Ministerial, 2023 [29], quien anunció una inversión de S/2,675 millones 500 mil soles para la conservación de carreteras en la Red Vial Nacional, Departamental y Vecinal, lo que representa un incremento del 21% respecto al presupuesto de 2022. Esto refleja la preocupación del gobierno por satisfacer las necesidades en ingeniería de transportes, reconociendo que esta inversión impulsa el desarrollo social e infraestructura del país.

De acuerdo con el Ministerio de Transporte y Comunicación, el estado invierte en obras de infraestructura vial, porque va relacionado directamente a un área que impacta en la calidad de vida de las personas y ayuda al crecimiento del país [30], quiere decir que cualquier deficiencia en las carreteras o temas relacionados a comunicar dos ciudades, ellos invertirán y los ingenieros civiles al ser responsables de diseñar y proyectar la infraestructura vial, en conjunto, subsanarán el problema vial correspondiente. Sin embargo, al ver el rango de importancia es inevitable que la Norma Técnica Peruana (NTP) CE.010 "Pavimentos Urbanos" 2016 tenga una antigüedad de ocho años, por ende, la información que proporcione a los profesionales e interesados en el área son desactualizados en comparación de la tecnología actual.

En el estudio "Uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) y Fotogrametría para Obtener el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) en Carreteras." [31], se evidencia que el uso de UAVS para evaluar pavimentos mediante el IRI es eficiente, con un error medio cuadrático de 1,08 mm y un error del 5% respecto a valores de referencia.

Asimismo, en el estudio "Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI" [32], se concluyó que los VANT lograron obtener el IRI con una comparación del 56% respecto a métodos tradicionales, demostrando una efectividad del 80% en la evaluación del periodo de diseño de las vías.

Finalmente, la investigación "Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en Pavimentos Flexibles mediante el Uso de Dron a Diferentes Alturas de Vuelo y el Rugosímetro de Merlín en la Vía MO-590-Moquegua" [33], analizó el cómo influye relativamente la altura de vuelo en cuanto a la medición del IRI, registrando que a 20 metros el IRI promedio estuvo entre 8.39 metros sobre kilómetros y 10.71 metros sobre kilómetros en la vía derecha, y para el vía izquierda está entre 6.50 m/km y 7.93 metros sobre kilómetros. En el caso de la altura de 10 metros, los valores fueron menores, encontrarse entre los valores 3.93 metros sobre kilómetros y 4.33 metros sobre kilómetros para la vía derecha y entre 3.09 metros sobre kilómetros y 3.33 metros sobre kilómetros para la vía izquierda, lo que evidencia una variación en el índice de rugosidad que está sujeta directamente a la altura de vuelo.

En el ámbito local y urbano, hay una falta de gestión adecuada en mantenimiento y reconstrucción, lo que resulta en el uso de técnicas inadecuadas para evaluar daños en las vías, generando resultados ineficientes. Es esencial contar con herramientas de evaluación rápida y confiable para una rehabilitación oportuna en los pavimentos [34]. Flores Mesa Martín [35] destaca que los avances tecnológicos permiten a los ingenieros utilizar procedimientos más efectivos en la ingeniería de carreteras. Prosser et al. [31] enfatizan que, aunque los métodos tradicionales han sido útiles, la automatización y las nuevas tecnologías son imprescindibles para la actualidad.

La justificación de esta investigación, teóricamente, contribuye en aumentar el conocimiento respecto a metodologías de inspección eficientes y tecnológicas de rugosidad en el ámbito de control para la rehabilitación de carreteras. Las conclusiones aportarán en la revisión y apoyos teóricos existentes, para la continuación en futuras investigaciones en donde se solventarán problemáticas o vacíos en la información.

En términos prácticos, la investigación aporta la metodología en la inspección del estado del pavimento con la implementación del sistema de aeronave pilotada remotamente para generar eficiencia en los trabajos de ubicar la rugosidad del pavimento en el Perú, y así determinar la solución óptima de rehabilitación a través del desempeño, data y operación.

A nivel metodológico, contribuye en definiciones de concepción sobre generación de eficiencia y relación directa entre las variables dependientes con las independientes, la que suma en la identificación de las mejoras en las dimensiones, aprovechando los efectos favorables de la implementación del sistema de aeronave pilotada remotamente. Así mismo aportó en la actualización de la NTP CE.010 Pavimentos Urbanos en el apartado 6.4 de actividades de mantenimiento para la generación de eficiencia, palabras claves y términos contextualizados a la investigación.

El manejo de infraestructuras viales es crucial en la seguridad y el desarrollo socioeconómico del país, y los ingenieros civiles juegan un papel importante en esta labor. Sin embargo, la Norma Técnica Peruana CE.010, vigente desde 2016, se ha vuelto obsoleta, lo que limita la eficacia de las metodologías actuales, como la rueda de Merlín, que presenta deficiencias en desempeño y calidad de información. Es importante adoptar nuevas tecnologías, como aeronaves pilotadas remotamente (drones con gps), que mejoran la recolección de datos y la eficiencia en la inspección del pavimento. Esta investigación propone su aplicación en la Panamericana Sur kilómetro 16.3 en Villa el Salvador en 2024, buscando generar eficiencia en la evaluación de la rugosidad y facilitar el tipo de rehabilitación.

II. MÉTODO

El enfoque del estudio es cuantitativo, ya que se trabaja con tres variables medibles. El alcance es explicativo porque describe la problemática e implementa el uso del RPA comparándolo con el método del rugosímetro Merlín. El diseño es experimental al controlar la variable independiente y evaluar su impacto en la dependiente. Es un diseño pre-experimental, ya que se realizará un ensayo con ambas metodologías para comparar sus ventajas y desventajas, destacando la eficiencia como resultado principal. Se consultaron fuentes de información como artículos científicos, tesis y libros con una antigüedad no mayor a 5 años, y algunos se encuentran en un idioma diferente al español entre ellos "Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Photogrammetry to Obtain the International Roughness Index

(IRI) on Roads" y "Classificação supervisionada de patologias na superfície de pavimentos asfálticos a partir de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA)".

El estudio se realizó en el Km 16.3 de la Panamericana Sur, en Villa El Salvador, Lima, Perú, en un tramo de 400 metros. El presente artículo de investigación determinó cómo el uso del RPAS influyó en la generación de eficiencia de la inspección del estado del pavimento en la Panamericana Sur en el año 2024.

Para lograr ello, se tuvieron como objetivos, determinar cómo influye en el desempeño la aplicación del sistema de aeronave pilotada remotamente en la generación de eficiencia en la inspección del estado del pavimento Panamericana Sur kilómetro 16.3, en Villa el Salvador, año 2024, asimismo determinar cómo influye en la data la aplicación del sistema de aeronave pilotada remotamente en la generación de eficiencia en la inspección del estado del pavimento Panamericana Sur kilómetro 16.3 en Villa el Salvador, año 2024 y finalmente determinar cómo influye en la operación la aplicación del sistema de aeronave pilotada remotamente en la generación de eficiencia en la inspección del estado del pavimento Panamericana Sur kilómetro 16.3, en Villa el Salvador, año 2024. La técnica de recolección es la observación y el instrumento una lista de cotejo. El proceso empezó con el ensayo de Merlín, después la data obtenida será procesada mediante hojas de cálculo para encontrar el IRI. Mientras que con el RPAS se empezó con la instalación de la base RTK y la planificación del vuelo del dron a 40 metros de altura para obtener las imágenes que se procesaron en Agisoft Metashape y se creó un modelo digital, que luego se analizó en Civil 3D y ProVal para evaluar la rugosidad.

III. ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN

A. Puntos de Amarre

Por un lado, Prosser et al., lograron una alta densidad de 253,520 puntos de amarre, con un promedio de 1,519 puntos por imagen, lo que resultó en una reconstrucción de alta precisión, reflejada en un error cuadrático medio de 0.56 píxeles. Esto sugiere que una mayor cantidad de puntos contribuye significativamente a la fidelidad del modelo 3D.

Por otro lado, Martínez et al. Utilizaron 198.000 puntos de amarre, una cifra menor, pero aún suficiente para generar un modelo detallado. Aunque la resolución fue inferior en comparación con Prosser, esta menor densidad de puntos demuestra que no siempre es necesario alcanzar cifras tan altas para resultados precisos, especialmente en contextos con limitaciones tecnológicas.

B. Correlación del IRI y la Altura

Según Quispe, a 20 metros de altura se obtienen valores más altos de IRI, como (8.39 y 10.71) m/km para el carril derecho, mientras que a 10 metros los valores disminuyen a

(3.93 y 4.33) m/km para el carril derecho, con una mejora del 35.6% respecto a los resultados de Merlín.

Por otro lado, Martínez et al. encontraron que a 13 metros se obtuvieron valores precisos de IRI, con 2.39 m/km para el Phantom 4 Pro y 2.334 m/km para el EVO II, demostrando que esta altura es adecuada para mediciones consistentes del IRI.

C. Correlación del IRI y GSD

En el caso de Martínez, a una altura de vuelo de 13 m, el GSD era de 0,35 cm/píxel para el vuelo convencional y 0,29 cm/píxel para el vuelo RTK. Esto demuestra que un menor GSD, asociado a una mayor precisión, impacta directamente en la calidad de los resultados del IRI.

Por otro lado, Quispe et al. Observaron que, al aumentar la altura de vuelo, también aumentaba el GSD, lo que resultaba en valores más altos de IRI. Por ejemplo, a 20 m con un GSD de 0,55 cm/píxel, los valores de IRI fueron mucho mayores (8,39 a 10,71 m/km) en comparación con los valores más bajos obtenidos a 10 m y un GSD de 0,27 cm/píxel (3,93 a 4,33 m/km), destacando la relación directa entre un mayor GSD y un aumento en los valores de IRI.

D. Rendimientos

El cálculo respecto a precios unitarios y campo reportaron a favor para el RPAS en comparación con Merlín respecto al rendimiento con una diferencia de 36400 metros lineales por día (8hrs), así mismo con él método tecnológico se reducen 5 colaboradores directamente relacionado con su equipo de protección personal según se indica en la figura 1. El aparato tecnológico ofrece una ventaja de costos por unidad de metro lineal obteniendo una utilidad de S/0.66 nuevos soles. En el presupuesto para un metro de 400 metros lineales el dinero utilizado por Merlín es de S/7376.37 nuevos soles, mientras que el RPAS es de S/2636.03 nuevos soles. Así demostrando que el dron tiene mejor rendimiento que el equipo del banco mundial.

Fig. 1 Rendimientos, cuadrillas y costos.

| Análisis de precios unitarios | | 010101010509 (1301001 01) | | Jornada = 8 | Mano de Obra | 0.68 |
|-------------------------------|------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|------|
| RUGOSIMETRO DE MERLIN | | | | | | |
| Productividad por m: | 0.0304 hh | 0.0000 hm.hp | Equipos | 0.02 | | |
| Rendimiento DIA: | 2,100.0000 | 0.00 | Subcontratos | 0.00 | | |
| Precio Unitario: | m | S/0.70 | Subpartidas | 0.00 | | |
| Descripción Recurso | Und. | Cuadrilla | Cantidad | Precio (S/.) | Parcial | |
| OFICIAL | hh | 1.0000 | 0.0038 | 22.32 | 0.08 | |
| PEON | hh | 5.0000 | 0.0190 | 20.21 | 0.38 | |
| OPERADOR DE EQUIPO | hh | 1.0000 | 0.0038 | 29.59 | 0.11 | |
| TECNICO PROCESADOR DE DATA | hh | 1.0000 | 0.0038 | 29.59 | 0.11 | |
| HERRAMIENTAS MANUALES | %mo | | 3.0000 | 0.68 | 0.02 | |

| Análisis de precios unitarios | | 010101010510 (1301002 01) | | Jornada = 8 | Mano de Obra | 0.02 |
|--|-------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|------|
| SISTEMA DE AERONAVE PILOTADA REMOTAMENTE | | | | | | |
| Productividad por m: | 0.0006 hh | 0.0000 hm.hp | Equipos | 0.00 | | |
| Rendimiento DIA: | 38,500.0000 | 0.00 | Subcontratos | 0.00 | | |
| Precio Unitario: | m | S/0.02 | Subpartidas | 0.00 | | |
| Descripción Recurso | Und. | Cuadrilla | Cantidad | Precio (S/.) | Parcial | |
| PEON | hh | 1.0000 | 0.0002 | 20.21 | | |
| OPERADOR DE EQUIPO | hh | 1.0000 | 0.0002 | 29.59 | | |
| TECNICO PROCESADOR DE DATA | hh | 1.0000 | 0.0002 | 29.59 | | |
| HERRAMIENTAS MANUALES | %mo | | 3.0000 | 0.02 | | |

Análisis unitarios del rugosímetro de merlín y RPAS

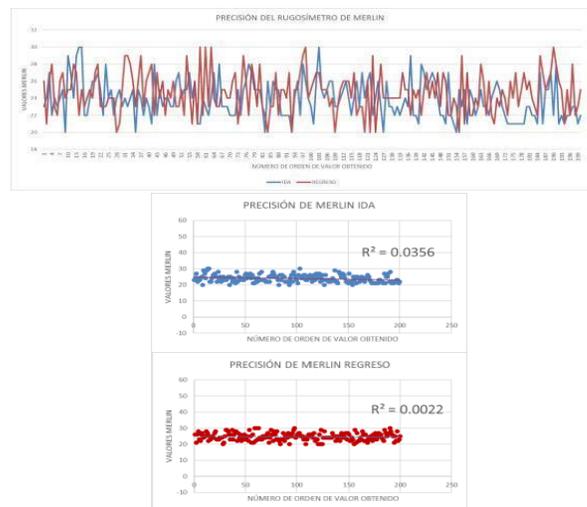
Fig. 1 Rendimientos, cuadrillas y costos.

E. Flujo vehicular, condición del pavimento y visual.

El rugosímetro de Merlín ocupa uno de los cuatro carriles disponibles, por lo que el IMDA se ve afectado reduciéndose del 100% al 75% [36], lo que genera flujo vehicular discontinuo. En cambio, el dron, al realizar un vuelo aéreo, permite que el IMDA se mantenga operando al 100% y su tecnología de procesamiento, puede eliminar a la interferencia de los vehículos sin interrumpir la recolección de la data [24]. Además, el Merlín está condicionado al estado del pavimento: ante, barro y desastres naturales superficiales de baja intensidad el ensayo debe detenerse, mientras que el dron continúa levantando el ensayo, Así mismo, el Merlín al ser método manual, solo puede operar de día y en caso se quiera realizar de noche los costos incrementan. En cambio, el dron por su tecnología, puede hacer vuelos de día y noche.

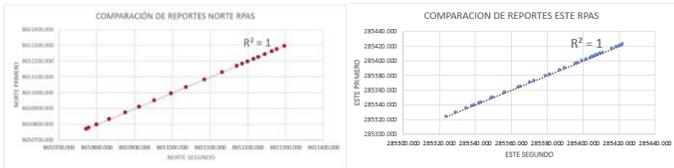
F. Precisión

El rugosímetro está sujeto a errores humanos los resultados muestran una diferencia de exactitud de 0.033 / 92.70 %, de acuerdo al ensayo en ida con un 0.0356 y de regreso con 0.0022 como se observa en la figura 2, la precisión es de 75.45%. Esto conlleva a relacionar la causante del error siendo la manipulación y la vista, los cuales son factores que cambian repentinamente los resultados por el ángulo de visión y distancia de posición, lo que conlleva a realizar más ensayos con números impares para rectificar y realizar el procesamiento con un promedio general y encontrar el valor del IRI más preciso. En comparación con RPAS, nuevamente demuestra la exactitud que esta maneja reportando un porcentaje de 99 % de exactitud con fallas entre 0.001 - 0.04 metros aplicados en las coordenadas UTM para Norte y Este como se aprecia en la figura 3. Así mismo la base RTK influye en la precisión del dron en horizontal 1cm + 1ppm en vertical 1.5cm + 1ppm. En síntesis, el dron tiene mayor precisión y exactitud que la rueda de Merlín.



Exactitud de métodos

Fig. 2 Grado de confiabilidad de Merlín



Exactitud de métodos
Fig. 3 Grado de confiabilidad de RPAS

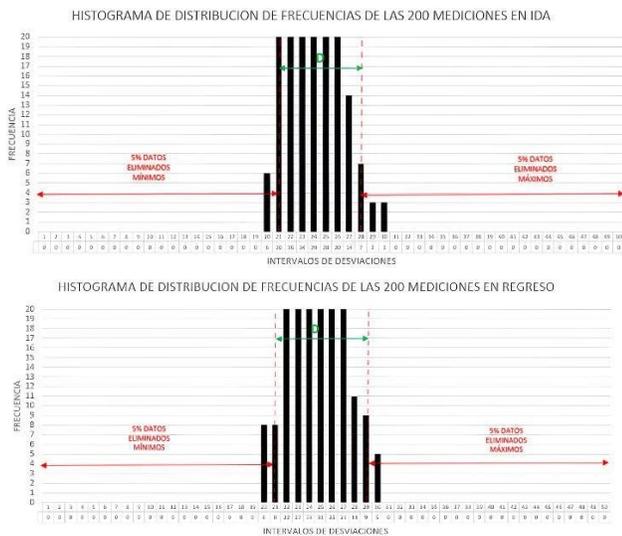


Fotogrametría y superficies en Agisoft
Fig. 5 Data y procesamiento automático de Agisoft RPAS.

G. Data

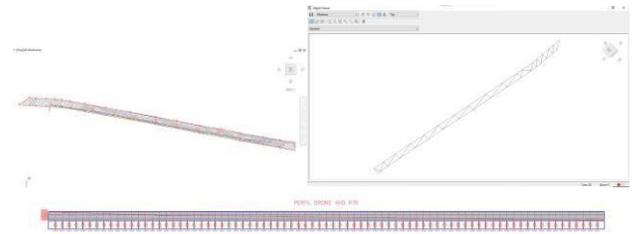
La información obtenida es apuntada manualmente y el procesamiento del Banco Mundial es realizado en una hoja de cálculo como lo muestra la figura 4, por lo que la data puede perderse en cualquier instancia, mientras que el RPAS mantiene un enfoque automático insertado en su propia nube, que puede ser compartida en muchos formatos, la cual se puede exportar al software AGISOFT para continuar con el procesamiento automáticamente, después en el CIVIL 3D se trabaja con los puntos densos para generar los perfiles y así poder realizar los reportes a cada 2m de distancia para obtener las elevaciones. Demostrando así la seguridad y veracidad de la data que maneja el RPAS.

Durante el desarrollo de la data, se encontró una deficiencia en el software de ingenieros, Civil 3D, la cual no permitía levantar los reportes para encontrar las elevaciones, lo cual en investigaciones no se encontraban la solución, por ende, un reconocido BIM manager Simón Noyola cooperó con el trabajo de investigación, ayudando a cerrar la brecha y continuar con la obtención de los resultados, así mismo el video realizado por el patrocinado de Autodesk, que es un video de nuestra autoridad, será compartido para el conocimiento de toda la sociedad científica y social, la solución ejecutada se aprecia en la figura 6.



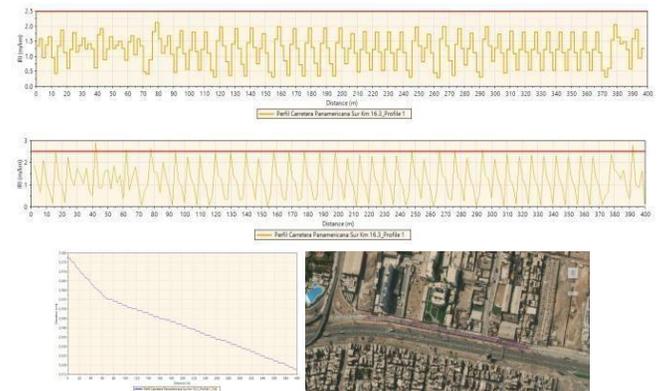
Cálculos según levantamiento de Merlín
Fig. 4 data y procesamiento manual con Merlín.

El IRI obtenido con el rugosímetro de merlín en una muestra de 400 metros de la Panamericana Sur km 16+300 hasta km 16+700 tiene un valor de ida de 1.75 m/km y regreso 2.41 m/km, en general el promedio realizado es de 2.08 m/km. Con el IRI general reportado, se ubicó el valor en la tabla de las rehabilitaciones del manual de carreteras de suelos y pavimentos, lo cual resulta que, aún no necesita rehabilitación y que la velocidad de flujo vehicular puede ser mayor de 90 km/h y el vehículo no sufriría ningún tipo de daño. Se resalta que se encuentra a 0.5 m/km de IRI para ingresar a las imperfecciones superficiales.



Superficies, lineamiento y sección transversal por Civil 3D
Fig. 6 Objeto de estudio pavimentación modelado y perfil a cada 2m del RPAS.

Los perfiles reportados a cada 2 metros se insertaron al Proval, un software para medir la rugosidad, el cual también reportó el mismo perfil que el civil 3D. Por ello, los resultados del IRI se dan de 3 tipos, los cuales fueron; global 1.19 m/km. La metodología máxima en intervalo fijo 2.11 m/km, mínimo 0.29 m/km, promedio 1.2 m/km, promedio conjunto 1.19 m/km y promedio general 1.28 m/km y por último la metodología continua de 2.62 m/km y así se obtiene el IRI de diseño siendo 1.67 m/km.



Reportes Proval en situación actual y topográfica para el IRI
Fig. 7 Análisis rugosímetro de 3 tipos con RPAS IRI.

IV. CONCLUSIONES

Con el dato reportado se ubica en la normativa de carreteras de suelos y pavimentos, para ver el tipo de rehabilitación que requiere el pavimento de la Panamericana Sur km 16+300 hasta km 16+700, entonces con el valor de IRI de RPAS de 1.67m/km indica que tampoco ingresa a ningún tipo de rehabilitación, por lo que los vehículos pueden ir a mayor de 90 km/h y no sufriría ningún daño, aunque también está 0.83 m/km de IRI para ingresar a las imperfecciones superficiales.

Se fundamenta que el rugosímetro de merlín es un equipo funcional para los ensayos y que los resultados que reportan son útiles. Pero es una herramienta ineficiente al lado del RPAS, por la carencia de rendimiento, por interrumpir el flujo vehicular continuo, por la inexactitud e imprecisión, por la inseguridad del reporte de data y por las limitaciones operacionales a las condiciones del pavimento y visuales.

H. Limitaciones

Se tiene un rango de radio de estudio delimitado y definido para asegurar la calidad de investigación, si bien el uso del sistema de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) generó eficiencia, aún hay limitaciones que necesitan de investigación y así buscar soluciones. Una de ellas es el equipo en contacto con fenómenos meteorológicos, ya que, en lluvias, tormentas y fuertes vientos, el dron presenta problemas en el GPS disminuyendo la precisión y exactitud, además de restringir el vuelo continuo del dron [16],[37]. Otro aspecto son las inversiones iniciales tanto en compras del equipo RPAS, capacitaciones de vuelos de drones y procesamientos de data en distintos softwares, lo que aún representa una brecha, cómo toda innovación tecnológica en desarrollo.

I. Recomendaciones

Para implementar la metodología con innovación tecnológica en la norma CE010, se deben seguir las siguientes recomendaciones proporcionadas por el gerente del Ministerio de Transportes y Comunicaciones;

- 1) Justificar la nueva metodología, en este caso, el artículo correspondiente.
- 2) Presentar la propuesta al Ministerio de Transportes y Comunicaciones mediante una carta oficial en mesa de partes.
- 3) Realizar reuniones con las áreas normativas para obtener la autorización, acompañada de una prueba piloto que demuestre la eficiencia de la metodología propuesta.
- 4) Ensayar la metodología en tres proyectos del Estado dentro del área correspondiente, asegurando su aplicabilidad.
- 5) Recoger las observaciones resultantes del ensayo y aplicar las mejoras necesarias, corrigiendo cualquier aspecto que lo requiera.
- 6) Incorporar la metodología en la redacción normativa correspondiente y obtener los permisos necesarios de las áreas involucradas.

Adicionalmente, realizar un seguimiento continuo del impacto de la implementación, con el fin de asegurar su efectividad y realizar ajustes según sea necesario.

El Sistema de aeronave pilotada remotamente con IRI de 1.67 m/km generó eficiencia en la inspección del estado del pavimento en la Panamericana Sur km 16.3 en el año 2024, demostrado y justificado a través de los ensayos y análisis de las variables de desempeño, data y operación. Ya que el rugosímetro de Merlín con IRI de 2.04 m/km no superó en ninguna variable al RPAS. Así aportando en la teoría y práctica con nuevas definiciones para la norma CE010 y nueva metodología de trabajo eficiente.

Se determinó que la aplicación del sistema de aeronave pilotada remotamente sí influye en el desempeño a través de las variables medibles rendimiento y IMDA, ya que el RPAS tiene mayor rendimiento que el rugosímetro de Merlín con una diferencia de 36400 metros lineales por día (8hrs) y con utilidad unitaria de S/0.66 nuevos soles, porque en 400 metros lineales de ensayo el RPAS gastó un total del presupuesto de S/2636.03 nuevos soles, mientras que el rugosímetro de Merlín S/7376.37 nuevos soles. Por otro lado, respecto al IMDA, el RPAS no tiene relación ninguna con el flujo vehicular del 100%, mientras que el Merlín Afecta reduce un 25% así teniendo un flujo del 75 %

Se determinó que la aplicación del sistema de aeronave pilotada remotamente sí influye en la data a través de las variables medibles de la precisión y almacenamiento, ya que el RPAS tiene exactitud con un 99% solo con variaciones del 0.001 hasta 0.04 metros y precisión en horizontal de 1cm + 1ppm - en vertical 1.5cm + 1ppm. Mientras que Merlín tiene una inexactitud de 0.033 o un 92.70%, generando realizar más ensayos para compensar el resultado, por parte de la precisión es de 75.45% e imprecisión de 24.55% dado por el ángulo de visión y distancia de posición. El almacenamiento del RPAS es segura y confiable porque trabaja con una base de datos automática que agiliza la exportación de datos, mientras que el rugosímetro tiene reporte manual que genera inseguridad y desconfiabilidad.

Se determinó que la aplicación del sistema de aeronave pilotada remotamente sí influye en la operación a través de las variables medibles condición del pavimento y visual, porque el RPAS no tiene contacto con el pavimento, mientras que Merlín sí y ante cualquier desastre natural de baja intensidad se cancela el levantamiento. Por otro lado, referente a visual, el RPAS por su tecnología de cámaras puede hacer inspección a oscuras, mientras que merlín tiene que incrementarse los costos para realizar la actividad a oscuras.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Mexicano del Transporte, Quintana Roo, México, "Prácticas para evaluar la calidad de infraestructura carretera de cuota". Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt353.pdf>
- [2] D. Ortega-Rengifo, J. Capa-Salinas, J. Perez-Caicedo, y M. Rojas Manzano, "Unmanned Aircraft Systems in Road Assessment: A Novel Approach to the Pavement Condition Index and VIZIR Methodologies," *Drones*, vol. 8, no. 3, art. 99, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/drones8030099>
- [3] A. Ragnoli, M. Rosaria-De Blasiis, y A. Di Benedetto, "Pavement Distress Detection Methods: A Review," *Infrastructures*, vol. 3, no. 4, art. 58, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058>

- [4] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), Lima, Perú, Norma Técnica Peruana CE.010, Pavimentos Urbanos, 2016. Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619679-cc-010-pavimentos-urbanos-ds-n-010-2010>
- [5] J. Chevarria Begazo, "Correlación entre el índice de regularidad internacional y el índice del inventario de condición del Ministerio de Transportes y Comunicaciones," Tesis de Ingeniería Civil, Univ. San Martín de Porres, Lima, Perú, 2019. Disponible: https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/5342/chevarria_bjle.pdf?sequence=1
- [6] A. Ulloa Calderón, "Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico," Métodos y Materiales, vol. 1, 2011. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6240953>
- [7] H. Tingal Limay, "Análisis del índice de rugosidad internacional (IRI) de la superficie del pavimento flexible de la vía Cajamarca – Baños del Inca, utilizando el rugosímetro de Merlin," Tesis de Ingeniería Civil, Univ. Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 2021. Disponible: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4366?show=full>
- [8] P. L. Ramos, "Estudio del índice de regularidad internacional en vías pavimentadas mediante el uso del perfilómetro láser ROMDAS," Tesis de Ingeniería Civil, Pontif. Univ. Católica del Perú, Lima, Perú, 2018. Accedido el 21 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/11734>
- [9] Instituto Mexicano del Transporte, Quintana Roo, México, "Sistema de evaluación de pavimentos versión 2.0," Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt245.pdf>
- [10] E. Rodríguez Zelaya, L. Torres Mayorga, y M. Villeda Alvarenga, "Desarrollo de metodología para la medición de IRI mediante el uso de un rugosímetro basado en el Merlin para evaluación de pavimentos flexibles y rígidos en El Salvador," Tesis de Ingeniería Civil, Univ. de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2019. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.14492/16440>
- [11] L. F. Macea-Mercado, L. Morales, y L. G. Márquez-Díaz, "Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo," Ing. Investig. Tecnol., vol. 17, no. 2, pp. 223–236, abr. 2016. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007>
- [12] H. A. Perdomo, "Estado del arte de tecnologías emergentes y metodologías tradicionales para la evaluación de la calidad de pavimentos flexibles," Tesis de Ingeniería Civil, Univ. Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2023. Disponible: <http://hdl.handle.net/10654/45764>
- [13] G. Legramanti et al., "Classificação supervisionada de patologias na superfície de pavimentos asfálticos a partir de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA)," Rev. ALCONPAT, vol. 13, no. 3, pp. 271–285, sep. 2023. Disponible: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.685>
- [14] J. H. Yulgo Fidel, "Evaluación del pavimento flexible mediante los métodos PCI y VIZIR utilizando el dron para una propuesta de conservación de la carretera Emp. PE-1S (Dv. Cañete) - Dv. Quilmana," Tesis de Ingeniería Civil, Lima, Perú, 2024. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12867/9027>
- [15] L. F. U. Chagala, "Comparación entre método tradicional y método con UAV para detección de deterioros superficiales en pavimentos semirrígidos de adoquín," Tesis de Maestría, Univ. Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Querétaro, México, 2023. Disponible: <https://ring.uaq.mx/handle/123456789/7984>
- [16] M. A. Chilet Silva y G. Maurício Diaz, Viabilidad del uso del vehículo aéreo no tripulado en la evaluación superficial en carreteras no pavimentadas en la carretera La Encantada, PKI 0+000 – PKF 3+950, Santa María - Lima, Tesis de título profesional, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Univ. San Martín de Porres, Lima, Perú, 2019. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12727/6477>
- [17] J. A. F. Iglesias, "Fotogrametría aérea para identificación de fallas en pavimentos flexibles," Tesis de Maestría en Geomática, Univ. del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2024. Disponible: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/15096>
- [18] R. T. Vasconcelos Fernandes et al., "Mapeamento de manifestações patológicas em pavimento asfáltico por meio de uso de drones," Rev. ALCONPAT, vol. 11, no. 1, pp. 61–72, ene. 2021. Disponible: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.521>
- [19] M. P. Bustamante Torres y J. J. Cayo Perea, "Contraste del índice de rugosidad internacional mediante mediciones de RPAS y smartphone en la carretera Enaco – Pumamarca, Cusco," Tesis de Ingeniería Civil, Univ. Andina del Cusco, Cusco, Perú, 2019. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12557/3598>
- [20] R. González Herrera et al., "Drones. Aplicaciones en ingeniería civil y geociencias," Interciencia, vol. 44, no. 6, art. 327, 2019. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7011689>
- [21] L. B. R. de Oliveira, J. W. R. Chaves, N. de O. Gurjão, y F. H. L. de Oliveira, "Evaluación de métodos topográficos para obtener la irregularidad longitudinal en pavimentos de carreteras," Rev. Estradas, vol. 27, oct. 2022. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/366090110_Avaliacao_de_metodos_topograficos_para_obtencao_da_irregularidade_longitudinal_em_pavimento_rodoviario
- [22] V. Solutions, "Inspección y mantenimiento de carreteras con drones," Visual Solutions. Accedido el 25 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://inspeccionestecnicascondrones.com/inspeccion-y-mantenimiento-de-carreteras-con-drones/>
- [23] L. Tello-Cifuentes, M. Aguirre-Sánchez, J. P. Díaz-Paz, y F. Hernández, "Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales," TecnoLógicas, vol. 24, no. 50, art. e1686, ene. 2021. doi: <https://doi.org/10.22430/22565337.1686>
- [24] J. O. Cruz Toribio y J. W. Gutiérrez Lázares, "Evaluación superficial de vías urbanas empleando vehículo aéreo no tripulado (VANT)," Mét. Mater., vol. 8, pp. 23–32, mayo 2019. doi: <https://doi.org/10.15517/mym.v8i1.34113>
- [25] K. F. Falcón y N. S. Ramón, "Aplicación de la fotogrametría con RPA para analizar la calidad del pavimento flexible en la carretera Lima-Canta-Huallay, tramo Laguna 7 Colores-Fantasma, Cordillera La Viuda, 2023," Tesis de Licenciatura, Univ. Privada del Norte, Lima, Perú, 2023. Disponible: <https://hdl.handle.net/11537/35622>
- [26] C. Cárdenas-Resines, J. Carrillo-Sinche, A. Izarra-Vargas, C. Murga Tirado, y A. Vásquez Salazar, "Herramientas tecnológicas de evaluación de fallas en la superficie de pavimento flexible: Una revisión sistemática," Llamkasun, vol. 4, no. 2, jul.-dic. 2023. doi: <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v4i2.121>
- [27] L. D. K. Castro Chuyo, S. Muñoz Pérez, J. J. Paucar Aguilar, y R. V. Ramírez Silva, "Tecnologías empleadas en la evaluación de pavimentos e impacto que han generado," Llamkasun, vol. 2, no. 1, pp. 29–44, ene. 2021. doi: <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v2i1.29>
- [28] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), Lima, Perú, "Red Vial Nacional: Datos y estadísticas," 2023. Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informespublicaciones/344790-estadistica-infraestructura-detransportes-infraestructura-vial>
- [29] MTC, Lima, Perú, "Inversión en infraestructura vial: Presupuesto 2023," 2023. Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ositran.gob.pe/anterior/noticias/inversion->

eninfraestructuras-de-transporte-cerro-2023-con-un-
crecimientosuperior-
a33/#:~:text=La%20inversi%C3%B3n%20en%20infraestructura
s%20de,de%20Uso%20P%C3%ABlico%20(Ositr%C3%A1n).

- [30] MTC, Lima, Perú, "Estrategias para el desarrollo social e infraestructura del país," 2023. Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_privada/planes/PNIC_2019.pdf
- [31] M. Prosser-Contreras, E. Atención, F. Muñoz-La Rivera, y R. Herrera, "Potencial de VANT para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8788, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/app10248788>
- [32] L. Martínez Pacheco y S. Narváez Tobar, "Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI," Tesis de Grado, Univ. Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2023. Disponible: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12434>
- [33] W. Quispe Quispe, "Índice de rugosidad internacional (IRI) en pavimentos flexibles mediante el uso de dron a diferentes alturas de vuelo y el rugosímetro de Merlin en la vía MO-590-Moquegua," Tesis de Ingeniería, Univ. Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 2024. Disponible: <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21590>
- [34] L. Benavides-Arbulú, N. Marín Bardales, y S. Muñoz Pérez, "Revisión de las tecnologías para la evaluación de pavimentos flexibles," *Rev. Ciencia Nor@ndina*, vol. 3, no. 2, pp. 133-140, 2020. doi: <https://doi.org/10.37518/2663-6360X2020v3n2p133>
- [35] M. Flórez Mesa, "Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento," Doctoral dissertation, Univ. Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2021. Disponible: <http://hdl.handle.net/11634/43154>
- [36] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), Lima, Perú, *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG- 2018*, 2018. Accedido: 19 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-02-18%20Dise%C3%B1o%20Geometrico%20DG-2018.pdf
- [37] S. Steiniger, J. C. Herrera, S. González, R. Mora, and J. C. Muñoz, "Análisis y recomendaciones para el uso de drones (UAV) en estudios de movilidad," *Estudios de Transporte*, vol. 25, no. 1, pp. 1–15, 2024. https://www.researchgate.net/profile/Stefan-Steiniger/publication/382942666_Analisis_y_recomendaciones_para_el_uso_de_drones_UAV_en_estudios_de_movilidad/links/66b4145151aa0775f270d569/Analisis-y-recomendaciones-para-el-uso-de-drones-UAV-en-estudios-de-movilidad.pdf