



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE VEHICULOS EN SUPERFICIES UTILIZANDO DRONES - UAS

Diana Marcela Araque García
Juan Francisco Higuera Cruz
Didier Ferney Barón Rodríguez

Dirigido Por: **Jaime Enrique Orduy Rodriguez M.Sc**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Especialista en Sistemas de Aeronaves No Tripuladas.

Fundación Universitaria Los Libertadores.
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas.
Bogotá, Colombia.

2022

Tabla de Contenido

Resumen	3
Abstract	4
Introducción	5
Metodología	10
Elementos tecnológicos utilizados para ejecutar los experimentos	10
Elementos tecnológicos utilizados para ejecutar los experimentos	11
Análisis e interpretación de datos	15
Discusión	26
Conclusiones y recomendaciones para la estimación de coeficientes de fricción de vehículos en superficies utilizando drones – UAS	28
Referencias Bibliográficas	29

Tabla de Figuras.

Figura 1. Vía seleccionada para la realización de las pruebas.....	11
Figura 2. Ortomosaico del lugar de pruebas	12
Figura 3. Instalación y ajuste del Acelerómetro VC4000 en las motocicletas.....	13
Figura 4. Software Tracker, procesamiento de los videos tomados con el iPhone	16
Figura 5. Software Tracker, procesamiento videos tomados con el UAV Mavic Pro	16
Tabla 1. Datos del acelerómetro VC4000 Prueba 2	17
Tabla 2. Datos del acelerómetro VC4000 Prueba 4	17
Tabla 3. Agrupación de Datos de las Prueba 2 y 4.....	22
Grafica 1. Correlación coeficientes de fricción UAV/VC4000 prueba 2 – GS500	18
Gráfica 2. Correlación coeficientes de fricción UAV/VC4000 prueba 4 - BWS.....	19
Gráfica 3. Correlación coeficientes de fricción Motocicleta Suzuki GS500.....	20
Gráfica 4. Correlación Coeficientes de fricción con herramientas Yamaha BWS.....	21
Gráfica 5. Comparación de Coeficientes entre Suzuki GS500 y Yamaha BWS.....	23
Gráfica 6. <i>Gráfica de dispersión de los datos de cada experimento</i>	17

RESUMEN

Dentro del proceso metodológico realizado en la reconstrucción de accidentes de tránsito es necesario determinar los coeficientes de desaceleración o fricción a utilizar, según el caso, para establecer de manera objetiva las velocidades de circulación de los vehículos involucrados, teniendo en cuenta: el tipo de vehículo, superficie y geometría de la calzada y estado de la misma; para ese efecto los investigadores en el campo han efectuado desde la década de los años 70s experimentos con el fin de establecer estos coeficientes para diversas situaciones. Los métodos más comúnmente empleados retoman el análisis estadístico de datos obtenidos por medio de mediciones realizadas en el terreno, herramientas tecnológicas como acelerómetros digitales o imágenes procesadas con cámaras de video. El presente trabajo tuvo como objeto demostrar que la precisión de los datos obtenidos de las imágenes de video tomadas por un Vehículo Aéreo No Tripulado DJI Mavic Pro y procesadas en *software* educativo Tracker ® se pueden comparar con la información registrada con un acelerómetro digital VC4000, siendo la primera solución una opción con un costo racionalmente inferior, con una tasa de obtención de información superior a la segunda y con una versatilidad para ejecutar escenarios notoriamente superior. Fueron efectuadas 122 pruebas de frenado sin bloqueo de llantas en dos motocicletas en condiciones controladas cuyas maniobras se recolectaron en video por medio de Vehículo Aéreo No Tripulado a 32 metros de altura y la cámara de video angular de un teléfono iPhone 13 Pro desde tierra; que permitieron determinar que los datos obtenidos del VANT respecto la información adquirida por el acelerómetro VC4000 no contienen diferencias significativas y que esta solución es viable para aplicarse a otros escenarios que requieran estimar otro tipo de coeficientes de fricción o desaceleración.

Palabras clave: Coeficiente de desaceleración, reconstrucción de accidentes, vehículo aéreo no tripulado, acelerómetro, video análisis.

ABSTRACT

Within the methodological process carried out in the reconstruction of traffic accidents, it is necessary to determine the coefficients of deceleration or friction to be used, depending on the case, to objectively establish the traffic speeds of the vehicles involved, taking into

account: the type of vehicle, surface and geometry of the roadway and its condition; To this end, researchers in the field have carried out experiments since the 1970s in order to establish these coefficients for various situations. The most commonly used methods take up the statistical analysis of data obtained through measurements made in the field, technological tools such as digital accelerometers or images processed with video cameras. The purpose of this work was to demonstrate that the accuracy of the data obtained from the video images taken by a DJI Mavic Pro Unmanned Aerial Vehicle and processed in Tracker ® educational software can be compared with the information recorded with a VC4000 digital accelerometer, being The first solution is an option with a rationally lower cost, with a rate of obtaining information that is higher than the second, and with a versatility to execute scenarios that is notoriously superior.

122 braking tests without wheel lock were carried out on two motorcycles under controlled conditions whose maneuvers were recorded on video by means of an Unmanned Aerial Vehicle at a height of 32 meters and the angular video camera of an iPhone 13 Pro phone from the ground; that allowed to determine that the data obtained from the UAV with respect to the information acquired by the VC4000 accelerometer do not contain significant differences and that this solution is viable to be applied to other scenarios that require estimating other types of friction / deceleration coefficients.

Keywords: Deceleration coefficients, accidents reconstruction, unmanned aircraft vehicle, accelerometer, video analysis.

INTRODUCCIÓN

La década de los años 60 se destacó en el ámbito de la investigación y reconstrucción de accidentes de tránsito a través de la participación de investigadores y miembros de la SAE (*Society of Automotive Engineers*) quienes a través de diferentes pruebas y experimentos desarrollaron metodologías para estimar coeficientes de fricción de varios tipos de vehículos, dentro de los cuales se encuentran: automóviles, camiones livianos, buses y motocicletas, inicialmente utilizados para introducir en el mercado automotriz estándares de calidad en los diferentes sistemas de seguridad tanto activos como pasivos. (SAEJ918).

En ese orden de ideas, se encuentran autores como: J.A Davidson (1968), J.J Bajer (1969) y G. Goodenow, R Kolhoff junto a F Smithson (1968), quienes desarrollaron diferentes métodos con metodologías propias para determinar estos coeficientes con base en las distancias de derrape, los cuales fueron empleados por el subcomité de neumáticos de la SAE en pruebas sobre diversas superficies y con ello regular el mercado de este tipo de productos. En los años subsiguientes, más investigadores se unieron para determinar con mayor precisión los datos obtenidos por los autores iniciales, destacándose en los inicios de la década del 80, los autores Charles Y. Warner, Gregory C. Smith, Michael B. James y Geoff J. Germane con su ensayo técnico “Aplicación de la Fricción en Reconstrucción de Accidentes”, en el cual describen los fenómenos que afectan el desempeño de los neumáticos causados por diversos factores, como la presión de inflado, fuerzas laterales causadas por el movimiento del vehículo e incluso la misma velocidad de circulación.

Los resultados obtenidos en sus diferentes experimentos derivaron las primeras tablas de coeficientes de fricción (Warner, Smith, James, & Germane, 1983), en las cuales se desglosan principalmente los coeficientes de fricción que deben ser aplicados por los investigadores y reconstructores de accidentes de tránsito para determinar las velocidades de diferentes rodantes ya sea antes o después del impacto, sobre diferentes superficies, condiciones climáticas, e incluso presenta coeficientes independientes para motocicletas, deslizamiento de cuerpos para aplicación en casos de atropello y otros coeficientes de carácter especial. Desde entonces, tablas de coeficientes de fricción han sido sometidas a actualizaciones (Fricke & Baker, 1990) por otros autores, los cuales han hecho uso de nuevas tecnologías (Barlett & Wright, 2010) que han permitido obtener datos más precisos que los obtenidos inicialmente, aunado a la propuesta de nuevos coeficientes de los cuales no se tenía información y han sido necesarios por la particularidad de cada investigación, lo anterior por medio de sensores especializados, acelerómetros digitales, soluciones *low cost*, entre otros (Remolina, Baena, & Higuera, 2019).

Para un investigador, lograr establecer el coeficiente de fricción o factor de desaceleración a utilizar (según sea el caso) dentro de los modelos físicos para cada escenario de accidente es determinante, ya que deben considerarse aspectos tales como: la geometría de la vía, nivel de humedad de la superficie, tipo de superficie y en algunos casos debe tenerse en cuenta si el lugar de los hechos registra una curva con pendiente, curva sin pendiente, curvas con peralte o con ausencia de éste (Rivers, 2006). De la correcta interpretación del lugar de los hechos y la aplicación del coeficiente correspondiente, es posible proponer hipótesis técnicas, científicas y duplicables que permitan demostrar objetivamente con resultados muy aproximados a la realidad la dinámica de eventos que originaron un accidente de tránsito. Sin embargo, pese a que es posible de forma teórica determinar un coeficiente de fricción o factor de arrastre de acuerdo a la superficie de rodadura por la cual se desplace un móvil, ver Ecuación 1, se requiere conocer el valor de dos de las variables que sin sus valores hace imposible el desarrollo de la ecuación, estos son: la velocidad inicial (V^2_0) o la velocidad final (V^2_f) del vehículo, y en la práctica son justamente éstos los valores los que normalmente se requieren conocer en una reconstrucción de accidente de tránsito ya que son la información primordialmente requerida para las autoridades judiciales con el fin de endilgar posibles responsabilidades en el ámbito penal, civil o administrativo.

$$\mu = \frac{V^2_0 - V^2_f}{2 g d} \quad [1]$$

Donde:

μ = *Coeficiente de Fricción*

V^2_0 = *Velocidad inicial*

V^2_f = *Velocidad final*

g = *Aceleración de la fuerza de gravedad*

d = *Distancia de desaceleración – frenado*

De hecho, las metodologías empleadas por los investigadores anteriormente enunciados que han presentado los resultados obtenidos en sus trabajos y que se traducen en las tablas (Fricke & Baker, 1990) (Barlett & Wright, 2010) entre otros, precisamente han

realizado las pruebas en entornos controlados, conociendo la totalidad de las variables por lo que las estimaciones son completamente aplicables.

La cuestión que da origen a la presente investigación es la identificación y determinación de coeficientes que, al menos en Colombia se han hecho necesarios para calcular velocidades donde no se registran evidencias relacionadas con huellas de frenado por bloqueo de llantas en el lugar de los hechos, pero, que indudablemente permiten deducir maniobras de desaceleración o frenado por parte de los conductores de los vehículos, esto por medio de herramientas tecnológicas como un acelerómetro digital Vericom VC4000PC e información obtenida a partir de imágenes de video tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (Drone) y procesadas en *software* tracker ®, el cual ha sido implementado para fines académicos (Lenz, 2014).

La ausencia de datos concretos disponibles en referencia a los coeficientes de desaceleración o fricción de vehículos o motocicletas cuando no se presenta bloqueo de llantas hace necesario plantear una serie de experimentos que permitan a partir de un protocolo la medición de las variables descritas anteriormente para formular una serie de resultados que, a su vez, permitan a los investigadores de accidentes de tránsito, proponer velocidades pre o post impacto (según el caso) cuando se logra determinar las posiciones relativas de impacto y se cuenta con las posiciones finales. (Alvarez & Luque, 2007). La implementación de la tecnología drones en múltiples aspectos de la cotidianidad de la industria, agricultura, investigación y desarrollo e incluso el ámbito militar (Ramesh & Muruga Lal Jeyan, 2020) ha permitido recolectar información de una manera que nunca se había logrado anteriormente en la historia moderna del hombre, tanto por la facilidad de acceso a los equipos, como a la posibilidad de múltiples configuraciones de carga paga que pueden ser instalados en estos dispositivos para obtener información de imágenes o datos cuya interpretación ha facilitado la toma de decisiones en múltiples escenarios, principalmente en la agricultura (Gonzalez, Amarillo, Amarillo, & Sarmiento, 2016) e ingeniería (Gonzalez, y otros, 2019)

Por otro lado, más específicamente en el tema relacionado con la investigación y reconstrucción de accidentes de tránsito, los Vehículos Aéreos No tripulados (VANT) han sido empleados para recolectar fotográficamente los elementos materiales probatorios dentro del lugar de los hechos, como método alternativo al uso de estaciones totales de topografía y escáneres topográficos (N.C. Department of Transportation, 2017), cuyos resultados favorecen notoriamente el uso de estas aeronaves en cuanto al tiempo de afectación del tráfico, relevamiento de información fotográfica, costo de operación y calidad de información procesada, convirtiéndose en soluciones con destacada aceptación entre cuerpos de seguridad pública e investigadores privados.

Por otro lado, al análisis de imágenes de video adquiridos por varios dispositivos y este video procesado por el *software* educativo Tracker ® en el análisis de las imágenes de video para estudios experimentales de coeficientes de fricción (Hurtado, Villota, Florez, & Carrillo, 2018), ha demostrado ser un método cuyos resultados fueron aceptables respecto a los modelos físicos aplicados, igualmente en el estudio de colisiones inelásticas de un sólido esférico (Franco, Miranda, Dutra, & Ribeiro, 2021), cuyos resultados permitieron hacer aclaraciones respecto a la energía cinética disipada, respecto con la fuerza de rozamiento. Estas investigaciones permiten deducir que el *software* educativo Tracker ® es una herramienta que permite a través de una interface amigable insertar información de archivos de video y generar un análisis basado en el seguimiento del algoritmo a los pixeles de la imagen seleccionados por el operador para realizar diferentes mediciones. Adicionalmente, este *software* ha sido implementado por investigadores y analistas de video, para establecer velocidades de diferentes cuerpos ya sean personas o vehículos, a partir de información en video extraída de cámaras de seguridad, cuyos resultados han sido presentados en estrados judiciales con precisión razonable para la toma de decisiones de las autoridades.

Este trabajo tuvo como objetivo el uso de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) marca DJI modelo Mavic Pro, por medio del cual se obtuvieron datos en video de desaceleraciones en condiciones controladas a dos motocicletas: una Suzuki GS500, tipo *naked* mecánica y una Yamaha BWS tipo *scooter* automática y esta información

digital procesada en el *software* Traker ®, adicionalmente se instaló en la estructura de cada vehículo un acelerómetro digital VC4000, cuyos datos fueron comparados con los datos procesados del video, permitiendo determinar los coeficientes de desaceleración de estos vehículos y validar el empleo de VANT en la estimación pruebas para determinación de coeficientes de fricción / desaceleración, en condiciones que no son posibles por medio de otras herramientas tecnológicas disponibles.

METODOLOGÍA

Se empleó la metodología experimental causa/efecto, a partir de la observación, recolección análisis e interpretación de datos en un entorno controlado, como se describe a, continuación.

Elementos tecnológicos utilizados para ejecutar los experimentos.

1. Acelerómetro VC4 000PC
2. UAV DJI Mavic Pro, según (Dà-Jiāng Innovations DJI , 2022)
3. Motocicleta Scooter marca Yamaha BWS FI 125 modelo 2021, Longitud 1910 mm, Anchura 765 mm, motor mono cilíndrico, 4 tiempos, Peso llena 119.0 kg (262.4 libras), Neumático delantero 120/70-12, Neumático trasero 130/70-12, Frenos delanteros Single disc. Two piston calipers, Diámetro freno delantero 245 mm (9.6 pulgadas), Frenos traseros Frenos traseros de disco Diámetro freno trasero 245 mm (9.6 pulgadas), con llantas MICHELIN CITY GRIP 2, profundidad de labrado 0.5 milímetros llanta delantera y 0.5 milímetros llanta trasera y 30 PSI en su llanta delantera y 32 PSI en la trasera.
4. Motocicleta Suzuki GS 500 modelo 2016, Longitud 2.080 mm, Altura 1.060 mm, motor Cuatro tiempos, refrigeración por aire, DOHC, 2 cilindros, Peso llena 173 kg (346 libras), Llanta delantera 110/70-17 M/C 54H Llanta trasera 130/70-17 M/C 62H, Frenos delanteros y traseros simple disco, con llantas Michelin, 31 PSI en su llanta delantera y 36 PSI en la trasera.
5. Teléfono móvil iPhone 13 pro.
6. KIT de grabación trípode VTA.
7. Cinta métrica de 50 metros.

8 Platos circulares de color rojo y verde.

9 Conos de señalización vial.

10 chaleco reflectivo color naranja.

11 Abrazaderas plásticas de 15 centímetros.

12 Dos computadores marca Asus para procesamiento del software Tracker ® y un computador Mac.

Lugar seleccionado para los experimentos

Para la ejecución de los experimentos se seleccionó, una vía conformada por una calzada de 9,78 metros de ancho, integrada por tres carriles de 3,48 metros de ancho cada uno con único sentido de circulación, tramo recto, sin pendiente, construida en material asfalto nuevo y seco, como se observa en la Figura 1, para agosto de 2022, en desuso, ubicada en la ciudad de Bogotá D.C., Colombia.

Figura 1.

Vía seleccionada para la realización de las pruebas



Fuente: Elaboración propia (2022)

Se ejecutaron diez maniobras de frenado, cinco para la GS500 y cinco para Yamaha BWS, con una velocidad inicial de 40 kph aproximadamente y velocidad final de 0 kph, de forma tal que dicha desaceleración o maniobra de frenado se realizó de manera normal, sin bloquear las llantas ni ocasionar incomodidad en el conductor en cada operación. Para identificar el punto de inicio, se ubicaron platos verdes y para límite de frenado platos rojos, efectuando diez ejercicios se estableció una distancia de desaceleración promedio de 28.86 metros, como se observa en la Figura 2.

Figura 2.

Ortomosaico del lugar de pruebas



Fuente: Elaboración propia en software FaroZone 3D ®

Seguidamente, se realizó un vuelo con el UAV para establecer la altura de grabación, en la cual la línea de vista captura por completo el recorrido desde el inicio de la maniobra hasta el final de la misma, se establece que el ángulo de línea de vista del UAV utilizado es de 65,48 grados, capta video a 3840x2160 24/25/30p y la altura requerida fue de 32 metros; debe tenerse en cuenta que el cuadro de imagen de la cámara del UAV no es un tetragono (cuadrado), sino un paralelogramo (rectángulo); por lo que es necesario que el operador realice el giro de guiñada correspondiente para ajustar la imagen donde sea

posible captar la mayor cantidad de espacio a medir. Para efectos de comparación de videos, se ubicó una posición transversal a la calzada en la cual fuera posible captar la totalidad del área de desaceleración, con el teléfono móvil iPhone 13 Pro, contando una distancia máxima de 19.80 metros, la cual no fue suficiente para captar el área, por lo que se utilizó la herramienta que ofrece este dispositivo de cámara gran angular 0.5 x incrementando el campo visual del dispositivo, con la que se registraron los experimentos. Finalmente, de acuerdo con la estructura de cada una de las motocicletas, se instaló el acelerómetro VC4000, en la Suzuki GS 500 sobre el tanque de combustible, utilizando la ventosa y para la Yamaha BWS sujeta por medio de abrazaderas plásticas ante la imposibilidad de contar con una superficie lo suficientemente amplia para la ventosa, se observa en la Figura 3.

Figura 3.

Instalación y ajuste del Acelerómetro VC4000 en las motocicletas



Fuente: Elaboración propia (2022)

Establecida la metodología general, se procedió a realizar los siguientes experimentos para la recolección de los datos:

1. Experimento motocicleta Suzuki GS 500 13/05/2022 inicia 13:39 horas finaliza 15:57 horas:

Condiciones atmosféricas de vuelo: viento de 8 km/h, ráfagas de 17 km/h, precipitaciones del 7%, visibilidad de 16 km, temperatura de 17 c y KP 3.

Se realizan diez pruebas, registradas en video por el UAV y el teléfono móvil iPhone 13 pro en su totalidad, siete de ellas registraron información útil para análisis en el acelerómetro VC4000, las tres restantes se consideran error por activación anticipada del dispositivo por lo que no se generaron datos.

El consumo de baterías del UAV para las diez pruebas, fue de dos baterías con tiempo de vuelo veinte (20) minutos cada una, aterrizando el UAV al 25 % de batería restante.

2. Experimento motocicleta Yamaha BWS 27/05/2022 inicia 10:40 horas finaliza 11:30 horas:

Condiciones atmosféricas de vuelo: superficie asfáltica seca, viento de 9 km/h, ráfagas de 15 km/h, precipitaciones del 6%, visibilidad de 16 km, temperatura de 16 c y KP 1.

Se realizan diez pruebas registradas en video por el UAV y el teléfono móvil iPhone 13 pro en su totalidad, al verificar los datos de desaceleración se identificó un valor muy alto de coeficiente arrojado por el acelerómetro, determinado que la causa fue un error en la distancia predeterminada para la maniobra (28,86 metros), por lo que se programó un nuevo experimento.

El consumo de baterías del UAV para las diez pruebas, fue de una batería con tiempo de vuelo veinte (20) minutos, aterrizando el UAV al 30 % de batería restante.

3. experimento motocicleta Yamaha BWS 06/06/2022 inicia 08:15 horas finaliza 09:50 horas:

Condiciones atmosféricas de vuelo: viento de 10 /h, ráfagas de 22 km/h, precipitaciones del 28%, visibilidad de 4 km, temperatura de 14 c y KP 2.

Se realizan ocho pruebas, ninguna se registró en video debido al mal funcionamiento de acelerómetro, por lo que no hubo datos para hacer cotejo de información.

El consumo de baterías del UAV para las diez pruebas, fue de una batería con tiempo de vuelo veinte (18) minutos, aterrizando el UAV al 35 % de batería restante.

4. experimento motocicleta Yamaha BWS 07/06/2022 inicia 07:50 horas finaliza 09:00 horas:

Condiciones atmosféricas de vuelo: viento de 7 km/h, ráfagas de 16 km/h, precipitaciones del 8%, visibilidad de 16 km, temperatura de 13 c y KP 1.

Se realizan diez y seis pruebas registradas en video por el UAV y el teléfono móvil iPhone 13 pro en su totalidad, nueve de ellas registraron información útil para análisis en el acelerómetro VC4000, las restantes se consideran error por activación anticipada del dispositivo por lo que no se generaron datos.

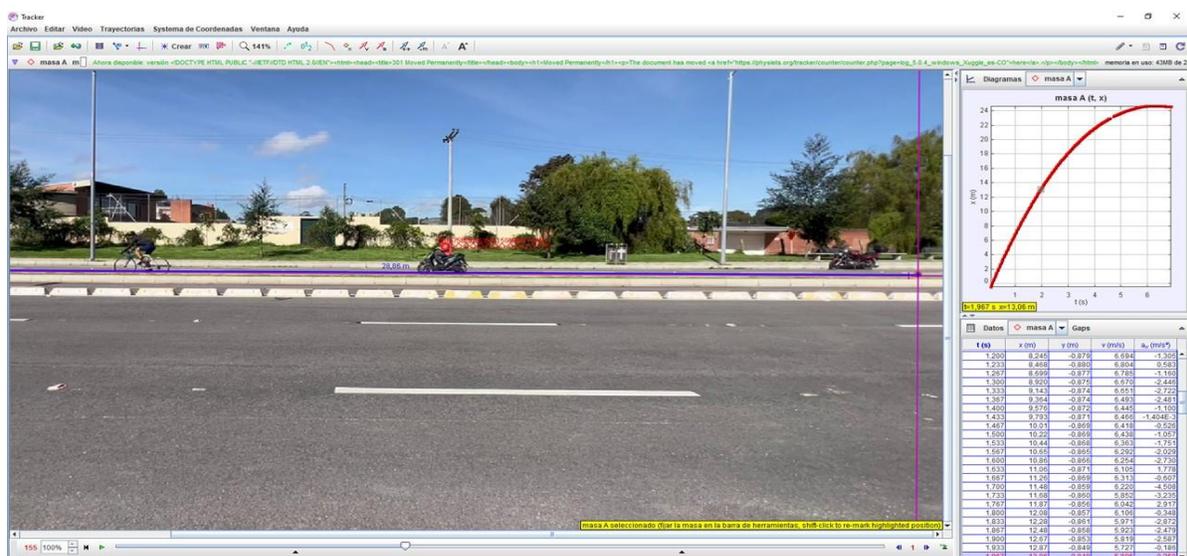
El consumo de baterías del UAV para las diez pruebas, fue de dos baterías con tiempo de vuelo veinte (20) minutos cada una, aterrizando el UAV al 20% de batería restante.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Para analizar e interpretar los datos obtenidos en video tanto del UAV como del teléfono móvil, se requiere el uso de *software* académico de uso libre Tracker®, ver Figura 4, para lo cual se efectuó el siguiente procedimiento:

Figura 4.

Extracto de pantalla de *software* Tracker, procesamiento de los videos tomados con el iPhone 13 PRO.

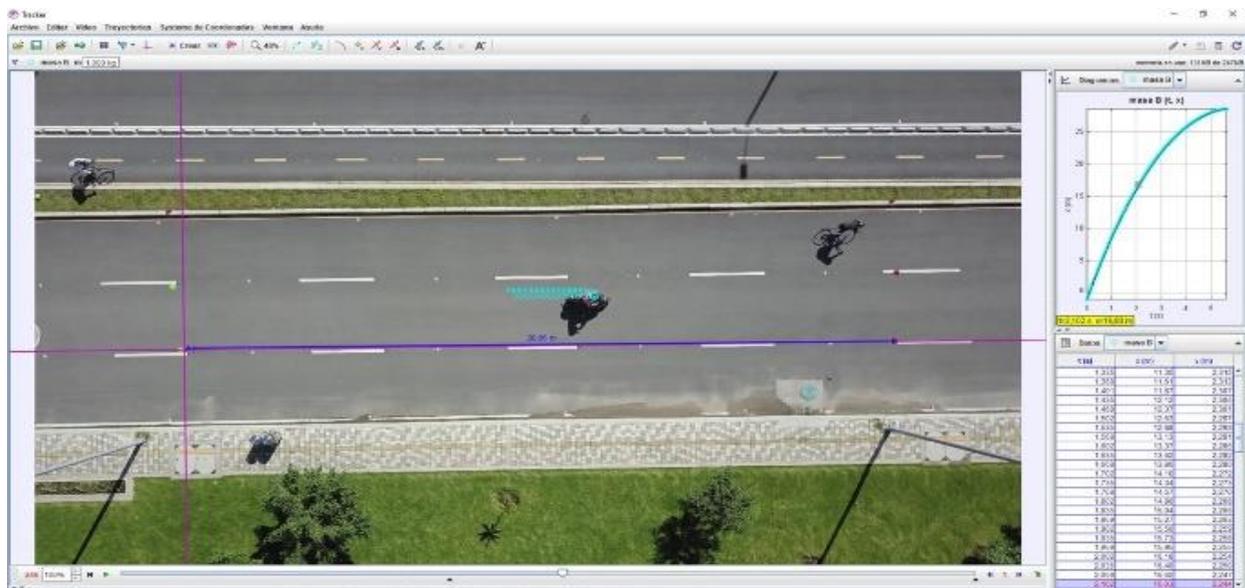


Fuente: Elaboración propia (2022)

En la plataforma del *software* se cargaron cada uno de los videos, donde se requiere establecer un parámetro de referencia para la medición, el cual, como se indicó anteriormente es de 28,86 metros, seguidamente se establece el eje de recorrido del cuerpo al que se va a hacer la medición horizontal para videos del teléfono móvil iPhone y vertical para el UAV, se observa en la Figura 5. Se debe tener en cuenta que el software hace seguimiento manual o automático a un conjunto de pixeles que se establecen por parte del operador, por lo que, en lo posible debe haber un elemento en el cuerpo a seguir cuya forma y color se destaque del resto del entorno para que no se presenten errores en el seguimiento de los pixeles, fotograma por fotograma. Así las cosas, para el experimento uno se estableció la masa a seguir en el casco del conductor de la motocicleta, mientras que para el experimento número cuatro el lugar seleccionado es el hombro del motociclista.

Figura 5.

Extracto de pantalla de software Tracker, procesamiento videos tomados con el UAV Mavic Pro



Fuente: Elaboración propia (2022)

Los datos extraídos del acelerómetro a través de su interfase y de los videos a partir del *software* Tracker ® son procesados en Microsoft Excel, correlacionado el nombre de

archivo del video del UAV con el del iPhone y del consecutivo del VC 4000, obteniendo la información de las Tablas 1 y 2.:

Tabla 1

Datos del acelerómetro VC4000 Prueba 2

Video	Fecha	PRUEBA 2	GS 500
		Acelerometro	UAV
633	16-may-22	0,3205	0,3258
634	16-may-22	0,2287	0,2348
635	16-may-22	0,1822	0,3109
636	16-may-22	0,2865	0,3054
637	16-may-22	0,1173	0,2284
638	16-may-22	0,2787	0,2548
639	16-may-22	0,2907	0,3050
640	16-may-22	0,2581	0,2717
641	16-may-22	0,3092	0,3203
642	16-may-22	0,2801	0,3141
		VC4000	MAVIC
	CF	0,255276561	0,28712824
	DE	0,059714009	0,03653139

Tabla 2

Datos del acelerómetro VC4000 Prueba 4

Video	Fecha	PRUEBA 4	BWS
		Acelerometro	UAV
161	10-jun-22	0,2270	0,2173
164	10-jun-22	0,2381	0,2270
166	10-jun-22	0,2325	0,2450
168	10-jun-22	0,2360	0,2386
169	10-jun-22	0,2182	0,2091
170	10-jun-22	0,2314	0,2268
171	10-jun-22	0,2137	0,2098
175	10-jun-22	0,2454	0,2356
178	10-jun-22	0,1909	0,1858
		VC4000	MAVIC
	CF	0,22590976	0,219174433
	DE	0,016357735	0,01896582

Fuente: Elaboración propia en Excel (2022) *Fuente: Elaboración propia en Excel (2022)*

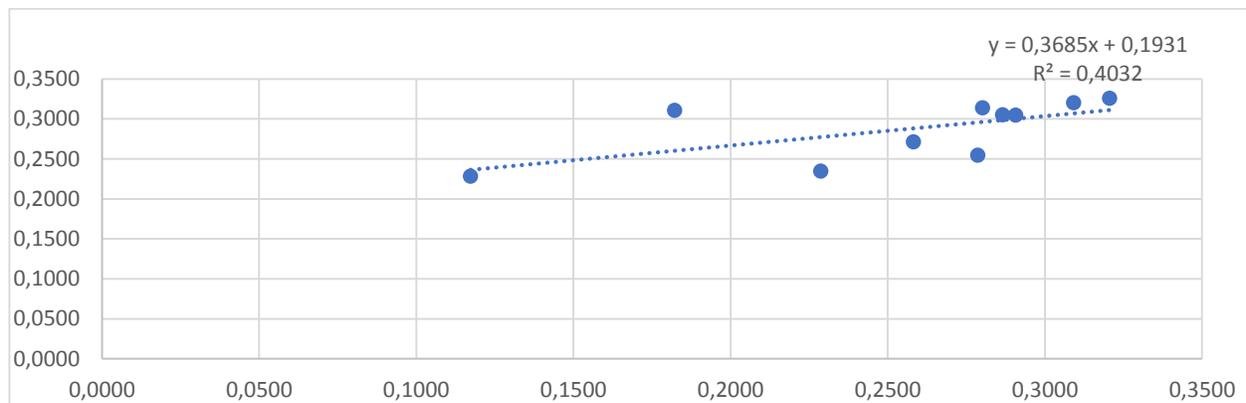
La información registrada en las Tablas 1 y 2 condensan la totalidad de pruebas realizadas, la prueba (2) fue ejecutada con la motocicleta Suzuki GS500, mientras que la prueba (4) con la Yamaha BWS; en éstas se correlaciona la información obtenida por la cámara de video del UAV y los datos extraídos del acelerómetro digital VC4000, en la columna izquierda se registró el número asignado al video según el consecutivo del sistema del UAV, las columnas siguientes registran la fecha de realización de la prueba y los resultados obtenidos de la media estadística de la totalidad de datos extraídos por cada uno de los sistemas.

Finalmente, los datos inferiores fuera de la tabla presentan: CF, coeficiente de fricción por media estadística y DE, desviación estándar del mismo.

Para el análisis estadístico se generan las gráficas de ambos experimentos, en primer lugar el experimento (2) con la motocicleta Suzuki GS500, donde se correlacionan los coeficientes obtenidos con el análisis de video como variable dependiente y los datos del acelerómetro como variable independiente, igualmente se genera la línea de tendencia y regresión lineal de los datos:

Grafica 1.

Correlación coeficientes de fricción UAV/VC4000 adquiridos en la prueba 2 con la motocicleta Suzuki GS500, línea de tendencia y regresión lineal.



Fuente: Elaboración propia (2022)

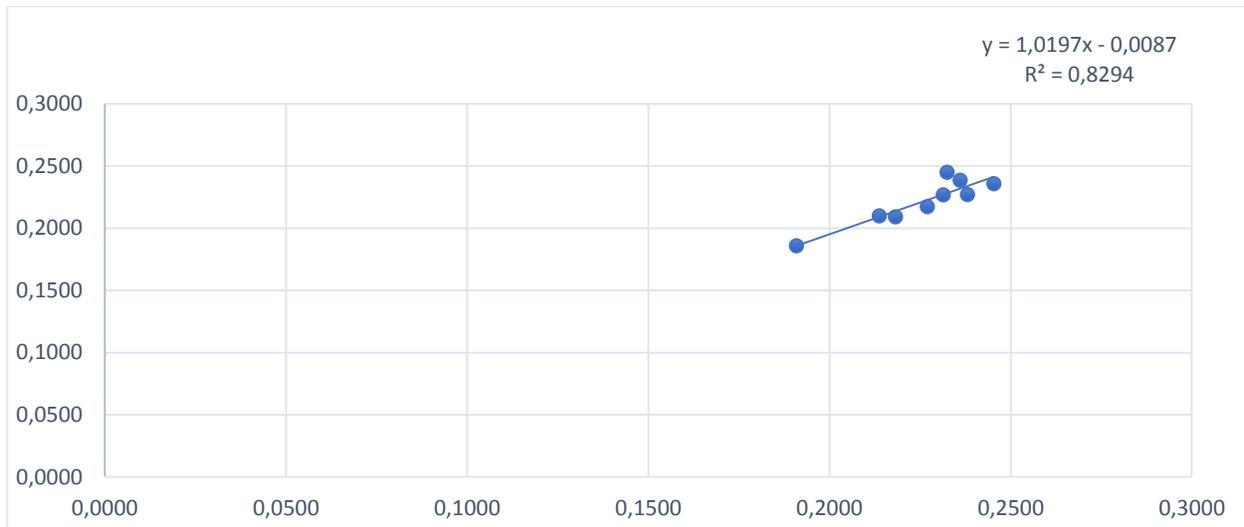
En la Gráfica 1, se evidencia dispersión de puntos con un valor de R^2 relativamente bajo, lo cual no es un resultado favorable para este experimento, permitiendo deducir una correlación mínima de los datos de acuerdo con la diferencia de valores en cada una de las nueve pruebas de donde se logró extraer información; sin embargo, esta variación de datos y correlación mínima entre los mismos puede asociarse más a la capacidad del conductor de la motocicleta para la ejecución de cada maniobra de frenado, como por ejemplo una mayor presión en palanca y pedal de freno generando desaceleraciones poco homogéneas y variaciones en los datos, pero no asociable con las herramientas de medición y los datos obtenidos por medio de cada una de ellas.

Por otro lado, se presentan los resultados del análisis estadístico a partir de los datos generados en el experimento (4) motocicleta Yamaha BWS, de los coeficientes de

fricción obtenidos igualmente por medio del UAV Mavic Pro y el acelerómetro digital VC4000.

Gráfica 2.

Correlación coeficientes de fricción UAV/VC4000 adquiridos en la prueba 4 con la motocicleta Yamaha BWS, línea de tendencia y regresión lineal.



. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia (2022)

A diferencia de la Gráfica 1 presentada inicialmente, en la Gráfica 2 se observa que los resultados obtenidos en el experimento (2) presentan una dispersión mucho menor de los puntos y un valor de R^2 alto cercano a 1, por lo que se deduce que la correlación de los datos es muy aceptable, lo que permite afirmar que la información de imágenes de video adquiridas mediante el UAV es información precisa y confiable; dependiente de en este caso las condiciones de la prueba realizada y particularmente el comportamiento de cada conductor al enfrentar la maniobra de frenado indicada.

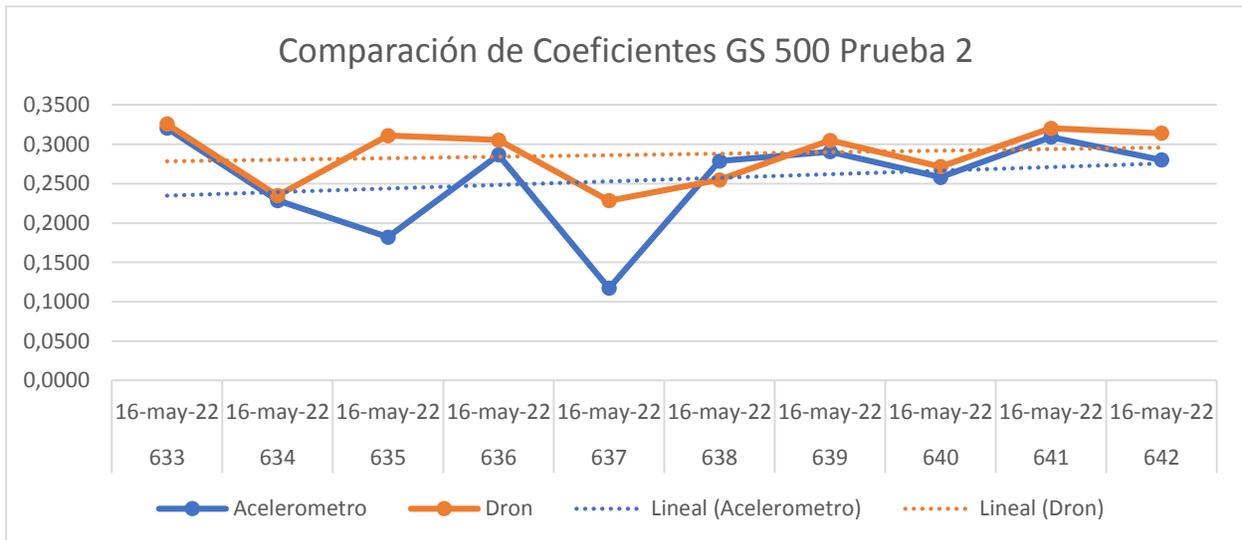
A continuación se realiza un análisis de correlación individual de los experimentos realizados con cada una de las motocicletas, donde se presentan las líneas de tendencia según la herramienta utilizada y el número del experimento, de esta manera se puede comprender en mayor medida interpretar los argumentos enunciados anteriormente,

donde la causa de la variación en los datos adquiridos no obedece necesariamente a la herramienta tecnológica por medio de la cual se adquiere el dato, sino en este caso el factor humano contribuye al error en el análisis, error traducido en la variabilidad del conductor de la motocicleta del primer experimento en la ejecución de cada maniobra de frenado ocasionando dispersión de los puntos obtenidos según cada coeficiente de fricción calculado.

En la Gráfica 3, se observa la correlación de los coeficientes obtenidos tanto por el acelerómetro, como por el procesamiento de las imágenes del UAV, de esta manera, se observa una leve variación en el comportamiento de los datos; sin embargo esta variación no invalida la información procesada ya que como se puede observar, básicamente dos de los diez datos muestran la mayor variación, lo que puede obedecer no a la adquisición de los datos, o calibración de las herramientas sino a la maniobra de frenado como tal.

Gráfica 3.

Correlación de coeficientes de fricción adquiridos con las dos herramientas aplicadas en una motocicleta Suzuki GS500.

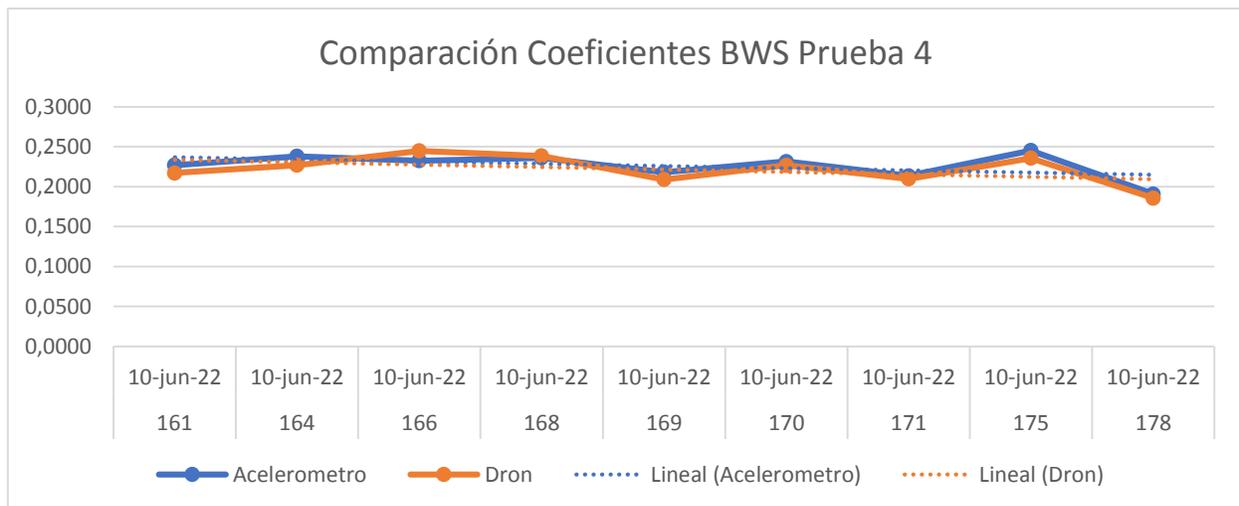


Fuente: Elaboración propia (2022)

Igualmente se observa que la información obtenida por medio del UAV presenta una estabilidad mayor en cuanto a la relación de datos, lo que podría obedecer a la sensibilidad de los sensores del VC4000. Esta simetría en los datos sigue un patrón que permite deducir que la información adquirida a partir de cualquiera de las herramientas puede ser equiparable y comparable con una razonable precisión. La gráfica 4, presenta una semejanza significativa en el procesamiento de la información y resultados de las pruebas, lo que permite afirmar que la información que se obtiene por medio del UAV puede ser tan precisa como la del mismo acelerómetro digital VC4000, en este caso, a diferencia de la prueba con la Suzuki GS500, la variación de los datos es muy inferior, permitiendo evidenciar una tendencia mucho más estable.

Gráfica 4.

Correlación de coeficientes de fricción adquiridos con las dos herramientas aplicadas en una motocicleta Yamaha BWS.



Fuente: Elaboración propia (2022)

Esta estabilidad en los datos, puede obedecer a una maniobra de frenado más estable por habilidad del conductor para mantener la desaceleración constante hasta velocidad final cero, localización del sistema de frenos en este tipo de motocicletas (dos palancas en el manubrio) lo que podría traducirse como un sistema con un mayor control de tensión por el motociclista por acción de las manos o un funcionamiento más eficiente

del sistema de frenos en esta motocicleta, registrando desaceleraciones más constantes y resultados más estables. Para una comprensión de los resultados obtenidos por cada tipo de motocicleta; se agrupan los datos de las pruebas en la Tabla 3.

Tabla 3.

Agrupación de Datos de las Prueba 2 y 4

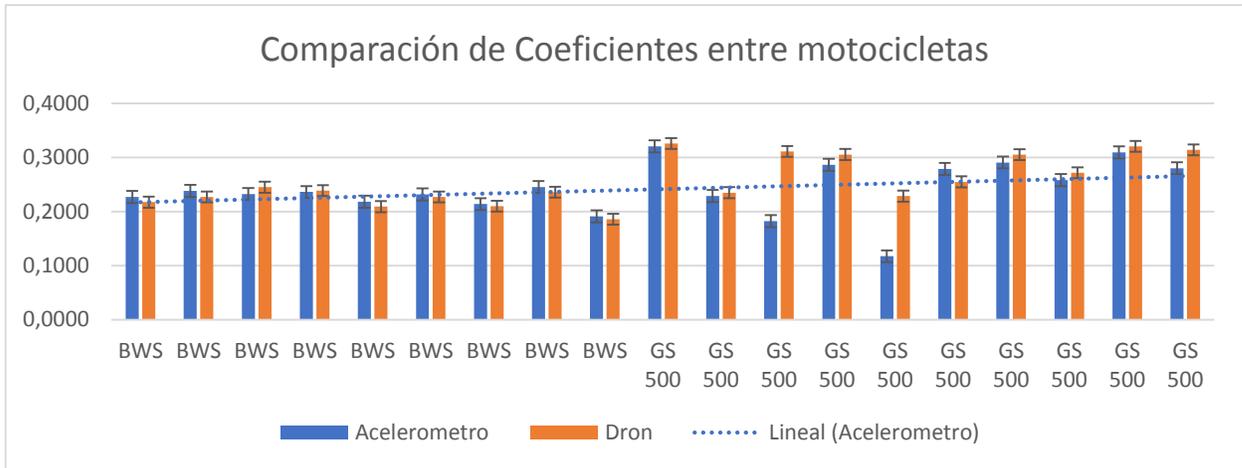
Video	Modelo Moto	Fecha	Acelerómetro	Dron
161	BWS	10-jun-22	0,2270	0,2173
164	BWS	10-jun-22	0,2381	0,2270
166	BWS	10-jun-22	0,2325	0,2450
168	BWS	10-jun-22	0,2360	0,2386
169	BWS	10-jun-22	0,2182	0,2091
170	BWS	10-jun-22	0,2314	0,2268
171	BWS	10-jun-22	0,2137	0,2098
175	BWS	10-jun-22	0,2454	0,2356
178	BWS	10-jun-22	0,1909	0,1858
633	GS 500	16-may-22	0,3205	0,3258
634	GS 500	16-may-22	0,2287	0,2348
635	GS 500	16-may-22	0,1822	0,3109
636	GS 500	16-may-22	0,2865	0,3054
637	GS 500	16-may-22	0,1173	0,2284
638	GS 500	16-may-22	0,2787	0,2548
639	GS 500	16-may-22	0,2907	0,3050
640	GS 500	16-may-22	0,2581	0,2717
641	GS 500	16-may-22	0,3092	0,3203
642	GS 500	16-may-22	0,2801	0,3141
Promedio			0,241321762	0,256114372

Fuente: Elaboración propia(2022)

La Gráfica 5 presenta, la variación de los coeficientes con las dos herramientas utilizadas por modelo por motocicleta, de lo cual se puede determinar que las variaciones no son considerables y que por tanto la información obtenida a partir de los sensores tanto del UAV como por el VC4000 son equivalentes, constantes y confiables.

Gráfica 5.

Correlación de información de las dos herramientas empleadas en cada una de las motocicletas, se adiciona la tendencia de los resultados.

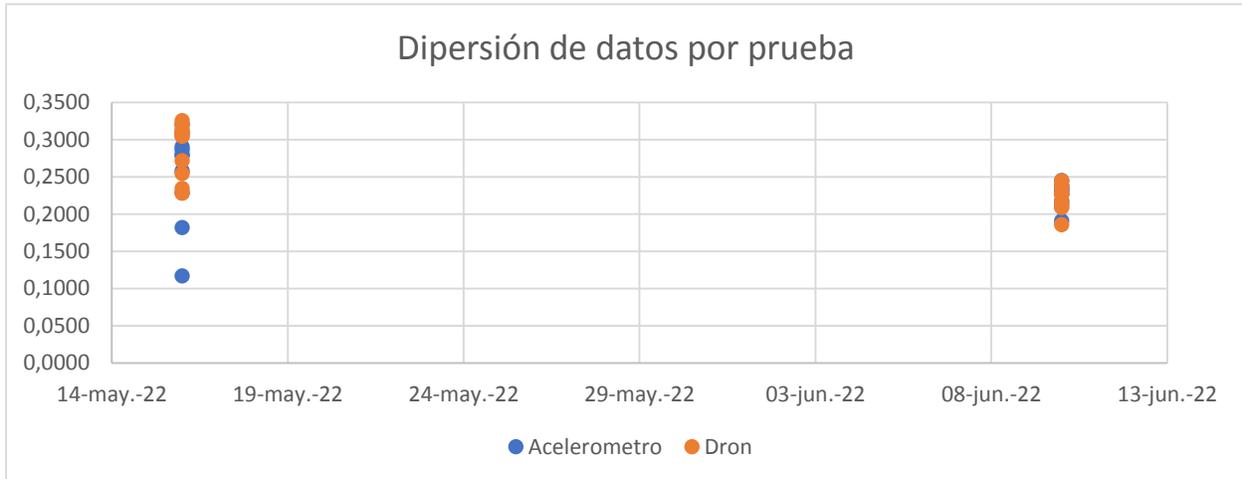


Fuente: Elaboración propia (2022)

La Gráfica 6 presenta la dispersión de los datos de manera lineal por experimento, en la cual se evidencia que para el experimento o prueba 2, la correlación de la información es bastante estable y que no presenta dispersión significativa de la información, mientras que para el primer momento, si presenta una dispersión considerable de los datos, esto se puede obedecer entre otras circunstancias al tipo de motocicleta, calibración del sistema de frenos de las máquinas, ejecución de la maniobra por cada uno de los conductores, localización del centro de gravedad de las motocicletas relacionado éste con mantener el equilibrio a velocidad final 0 km/h, localización del sistema de frenos en cada motocicleta, entendiéndose que la Yamaha tiene dos palancas de frenado a la altura de las manos, mientras que la Suzuki cuenta con una palanca en la mano derecha y un pedal de freno en el mismo plano; sin embargo, el desempeño de los sistemas de frenado aunque ofrezca valores de coeficientes de fricción con relativa variación entre las motocicletas, es posible emplear la media estadística de los resultados obtenidos para efectos de estimación de distancias totales de detención sin forzar la máquina y sin generar maniobras de bloqueo de llantas, deslizamiento y pérdida de control del vehículo.

Gráfica 6.

Dispersión de los datos de cada experimento, se observa una menor dispersión de datos en el experimento de la Yamaha BWS.

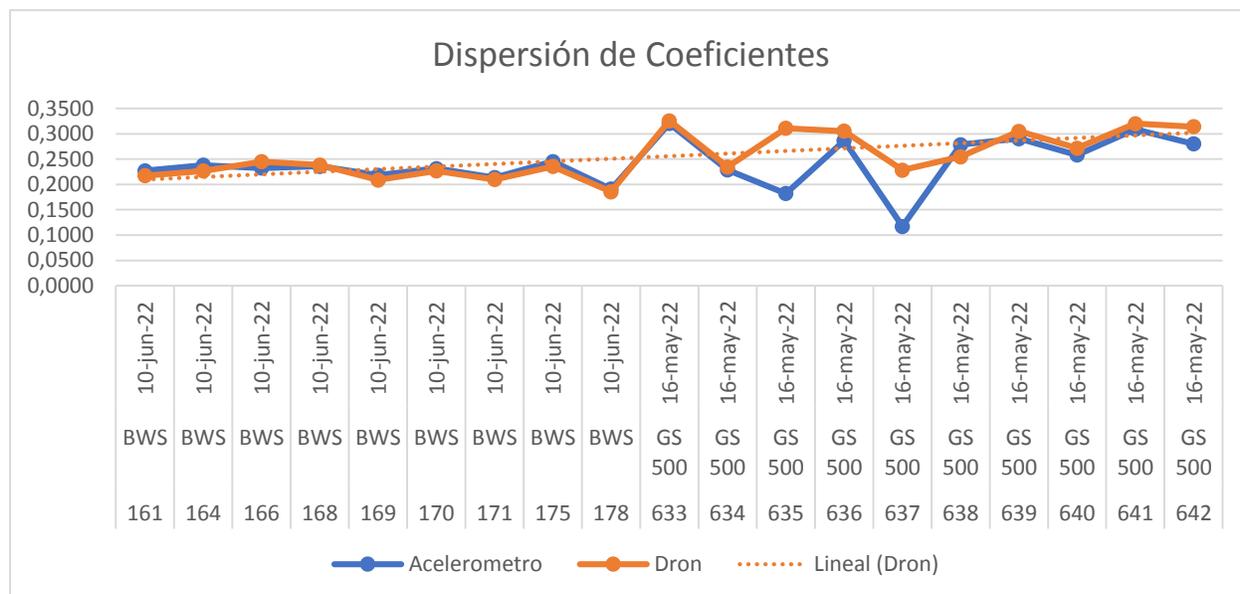


Fuente: Elaboración propia (2022)

En el Análisis de la Gráfica 7 sobre la dispersión de coeficientes, la información presentada evidencia que los dos modelos de motocicletas podrían tener diferentes tipos de frenos o por lo menos esta rectificada en una motocicleta más que la otra. De tal manera que para la motocicleta Yamaha los coeficientes de frenado, es decir, los coeficientes de fricción son mucho más estables que para la Suzuki, eso también se puede ver por el tipo de la marca, la categoría de la moto, entre otras tantas cosas. De tal manera, que se evidencia que los dos momentos del experimento con los dos tipos de motocicleta, los coeficientes de relación entre uno y entre otros no son distantes entre el UAV y entre el VC4000, por lo que se puede determinar según la información dada, ambos equipos de medición son muy precisos y que los decimales de dispersión que hay entre sus resultados son mínimos y no son lo suficientemente amplios para determinar que exista una diferencia considerable. Cuando se habla de decimales y que una diferencia sea muy pequeña quiere decir que el grado de confianza entre uno y otro es bastante alto.

Gráfica7.

Correlación de coeficientes de fricción en cada motocicleta



Fuente: Elaboración propia (2022)

Entonces se puede determinar, que para esta gráfica se tienen dos experimentos donde el que se encuentra representado en naranja presenta unos coeficientes de fricción mucho más estables que el azul, el cual tiene algunos datos más amplios y aun así se comporta con una tendencia relativamente estable frente a las herramientas utilizadas, estableciendo un coeficiente de fricción para este tipo de maniobras para una motocicleta tipo estándar *naked* es de $0,26 \pm 0,04$, mientras que para una motocicleta scooter es de $0,22 \pm 0,01$, con un promedio general de $0,24 \pm 0,02$. Estos resultados son compatibles con los resultados obtenidos por Fries, Smith y Cronrath (1989), quienes realizaron pruebas con cinco tipos de motocicletas, efectuando maniobras de frenado aplicando al sistema máxima presión sin llegar al bloqueo de llantas únicamente con freno trasero, obteniendo coeficientes entre 0,31 y 0,52.

Adicionalmente, en experimentaciones realizadas con 18 motociclistas experimentados, llevados en sus vehículos a alcanzar una velocidad de 50 mph (80 km/h) e instruidos para detener su motocicleta en la menor distancia posible, se lograron coeficientes entre 0,44 y 0,52. (Hugemann & Lange, 1993).

Otros investigadores, practicaron un significativo número de pruebas de frenado en superficies de asfalto y concreto seco, entre los años 1987 y 2006, donde se emplearon más de 112 tipos de motocicletas alcanzando velocidades iniciales antes de maniobra de 20, 30 y 40 mph (32,2, 48,3 y 64,4 km/h), discriminadas en 275 pruebas con sólo freno posterior, 239 son únicamente freno delantero y 221 pruebas con frenos combinados, presentando resultados de coeficientes de $0,37 \pm 0,06$ para frenos traseros, $0,60 \pm 0,16$ con freno delantero y $0,74 \pm 0,15$ con frenos combinados. (Barlett, Robar, & Baxter, 2007).

Lo que permite deducir que los coeficientes presentados en esta investigación son coherentes con el tipo de maniobra ejecutada, donde se buscó establecer dicho valor a partir de una maniobra donde no se generara la máxima eficiencia del sistema de freno, sino maniobras donde el frenado se pudiera considerar como un frenado normal sin causar incomodidades en el conductor, ni pérdida de control del vehículo.

DISCUSIÓN

De la ejecución de los experimentos se observó que el UAV es una plataforma de obtención de datos tan confiable como un acelerómetro digital VC4000, sin embargo, para la recolección de los datos sí, se determina que el sistema de aeronave no tripulada es más estable, en el sentido que el acelerómetro digital se activa con mayor sensibilidad y con estímulos externos de desaceleración o de cambios en la posición de la motocicleta, lo que requiere que se realicen muchas más mediciones, igualmente se encontró que esta activación no programada de los sensores del VC4000 genera información inútil para procesar, mientras que el UAV mientras cuente con la batería suficiente para mantener su vuelo estacionario, la recolección de información es constante mientras se estén captando las imágenes de video, ya que esta información obviamente es independiente al funcionamiento correcto del acelerómetro.

Por otro lado aunque inicialmente se utilizó un teléfono móvil iPhone 13 Pro para la adquisición de video de manera horizontal a nivel, al momento de realizar el procesamiento del seguimiento de píxeles en el *software* Tracker ®, fue necesario

ajustar la configuración del dispositivo para captar la totalidad de distancia de desaceleración (28,86 metros) por lo que la cámara se activó con una apertura gran angular de 0,5x, lo que permitió abrir el ángulo de vista del teléfono satisfactoriamente, sin embargo la curvatura en la imagen del video que no es evidente a simple vista, sí genera saltos significativos en los cambios de velocidad y aceleración en el tiempo por los cambios de los píxeles en el cuadro, por lo que esta información no arrojó resultados útiles para esta investigación y fue desechada.

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron a lo largo de la ejecución de las pruebas, se logró establecer que la precisión de los datos obtenidos a partir del video de una cámara instalada en un sistema de aeronave no tripulada y procesada en un *software* de seguimiento de píxeles para calcular aceleraciones, velocidades, desplazamientos, entre otros, es tan confiable como los datos obtenidos por un dispositivo diseñado con dicho fin específico, por lo que se sugiere continuar con experimentaciones para determinar coeficientes de desaceleración en otras circunstancias, como ejemplo la desaceleración de buses articulados al aproximarse a intersecciones semaforizadas o estaciones para dejar o recoger pasajeros, igualmente pueden realizarse mediciones para análisis de velocidad de circulación en tramos de vía, obteniendo resultados aplicables a reconstrucción de accidentes de tránsito donde no se logre obtener huellas de frenado o se requieran coeficientes de desaceleración o fricción específicos; igualmente, es posible realizar la estimación de coeficientes de fricción en trenes a partir de las desaceleraciones obtenidas en aproximación a estaciones de cargue y descargue.

La cantidad de pruebas que se pueden ejecutar para obtener datos interpretables obedece a las condiciones atmosféricas al momento de realizar el vuelo del equipo, estado de las baterías del UAV, agilidad y planeación del escenario donde se realizara la prueba, más no se encontró una relación directa con el tipo de cámara de video que se encuentra instalada como carga paga del sistema ya que las cámaras actuales de los UAV comerciales y profesionales cuentan con la suficiente capacidad para obtener un video con buena calidad de píxeles, sin embargo si es importante tener en cuenta que a mayor altura para la toma de las imágenes de video evidentemente se amplía la línea de

vista del UAV y se puede tomar una mayor distancia para la prueba, pero se pierde la capacidad de seguimiento de un pixel específico, por lo que si bien es cuerpo podría considerarse un problema, éste se resuelve generando un cambio de contraste importante entre la superficie de rodadura y el color del vehículo a realizar el seguimiento. El desempeño del UAV para este tipo de misiones fue satisfactorio, se logran obtener datos en múltiples escenarios con una precisión significativa, permitiendo incorporar estos sistemas no sólo a la toma de fotografías de lugares de los hechos para reconstrucciones fotogramétricas, sino para la investigación científica en el campo de la reconstrucción de accidentes de tránsito.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE VEHICULOS EN SUPERFICIES UTILIZANDO DRONES - UAS

La presente investigación tuvo como objetivo presentar el uso de UAV como un método alternativo, versátil y de relativo menor costo, para la adquisición de datos que permitan establecer coeficientes de fricción o desaceleración de cualquier tipo de vehículo en diversas circunstancias cuya precisión es equiparable a la de un acelerómetro digital VC4000.

Para ese efecto se desarrollaron experimentos con dos tipos de motocicletas: una estándar naked (Suzuki GS500) y una scooter (Yamaha BWS), en las cuales se midió una desaceleración desde los 40 km/h en una distancia de 28,86 metros, utilizando un acelerómetro digital VC4000 y entretanto siendo filmadas por un UAV Mavic Pro a 32 metros de altura, obteniendo imágenes de video para ser procesadas en el *software* educativo Tracker ®.

Realizado el procesamiento de los datos obtenidos por ambas herramientas se pudo determinar que los coeficientes de desaceleración para maniobras de frenado sin bloqueo de llantas y sin generar incomodidad en el conductor de una motocicleta estándar *naked* es de $0,26 \pm 0,04$, mientras que para una motocicleta *scooter* es de $0,22 \pm 0,01$, con un promedio general de $0,24 \pm 0,02$.

En conclusión, a partir de la metodología aplicada es posible afirmar que los datos obtenidos por un UAV son tan precisos en la medición de coeficientes de fricción como los datos adquiridos por un acelerómetro digital VC4000, por lo que es un método confiable, con un relativo menor costo y con una amplia gama de posibilidades de ejecución de misiones que podrá facilitar la investigación académica y científica en el ámbito de la reconstrucción de accidentes de tránsito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, D. M., & Luque, P. R. (2007). *Investigación de Accidentes de Tráfico: Manual de Reconstrucción*. La Coruña: Netbiblo.
- Barlett, W., & Wright, W. (2010). *Braking on Dry Pavement An Gravel With an Without ABS*. Florida: SAE International.
- Barlett, W., Robar, N., & Baxter, A. (2007). *Motorcycle Braking Tests: IPTM data through 2006"*. Jacksonville, Florida: accident Reconstruction Journal ISSN: 1057-8153.
- Dà-Jiāng Innovations DJI . (14 de 06 de 2022). *DJI Mavic Pro*. Obtenido de <https://www.dji.com/mavic>
- Franco, R. S., Miranda, V. S., Dutra, R. S., & Ribeiro, L. C. (2021). *¿Qué pasa si la superficie es rugosa? Un estudio sobre la influencia de la fuerza de fricción en las colisiones inelásticas a través del análisis de video*. Artigos Gerais: Revista brasileira de enseñanza de física.
- Fricke, L. B., & Baker, J. S. (1990). *Drag Factor an Coefficient of Friction in Traffic Accident Reconstruction*. Evanston: Northwestern University Traffic Institute.
- Gonzalez, A., Amarillo, G., Amarillo, M., & Sarmiento, F. (2016). *Drones Aplicados a la Agricultura de Precisión*. Bogotá: Revista Especializada en Ingeniería Universidad nacional Abierta y a Distancia.
- Gonzalez, R. H., Ucan, J. N., Sanchez y Pinto, I., Medina, R. E., Arcega, F. C., Zetina, C. M., & Casares, R. S. (2019). *Drones. Aplicaciones en Ingeniería Civil y Geociencias*. Yucatán: Asociación Interciencia vol 44(6).
- Hugemann, W., & Lange, F. (1993). *Braking performance of motorcyclists*. Alemania: SAE International.
- Hurtado, R. V., Villota, Y. N., Florez, D., & Carrillo, H. (2018). *Video analysis-based estimation of bearing friction factors*. Bogotá: European Journal of Physics.
- Lenz, J. A. (2014). *Utilização de TIC para o estudo do movimento: alguns experimentos didáticos com o software Tracker*. Paraná: Journal ofc interdisciplinary Studies on Science and Informatics.
- N.C. Department of Transportation, D. o. (2017). *Collision Scene Reconstruction & Investigation using Unmanned Aircraft System*. North Carolina: North Carolina Department of Transportation.

- Ramesh, P. S., & Muruga Lal Jeyan, J. V. (2020). *Comparative analysis of the impact of operating parameters on military and civil applications of mini unmanned aerial vehicle (UAV)*. AIP Conference Proceedings 2311, 030034.
- Remolina, E. C., Baena, A. V., & Higuera, J. C. (2019). *Procedimiento para la estimación del coeficiente de fricción neumático - vía*. Bogota: Revista Logos Ciencia y Tecnología.
- Rivers, R. W. (2006). *Evidence in Traffic Crash Investigation and Reconstruction*. Springfield: Charles C. Thomas.
- Warner, c. Y., Smith, G. C., James, M. B., & Germane, G. J. (1983). *Friction Applications in Accident Reconstruction*. Detroit: SAE International.