

FOTOGRAMETRÍA AÉREA Y SU APLICACIÓN EN LA RECONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS DE ACCIDENTES

AERIAL PHOTOGRAMMETRY AND ITS APPLICATION IN
THE RECONSTRUCTION OF ACCIDENT SCENARIOS

Eduardo Daniel García Gutiérrez¹
Omar Chávez Alegría²

^{1,2} Universidad Autónoma de Querétaro, México

¹ egarcia76@alumnos.uaq.mx

² omar.chavez@uaq.mx



RESUMEN

Se realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes obtenidas mediante vehículos aéreos no tripulados con el propósito de recrear los escenarios de accidentes de tránsito ocurridos en carretera. La particularidad de esta investigación es que la fotogrametría aérea se obtuvo bajo distintas condiciones climáticas y tomando como referencia puntos de control terrestres marcados con un equipo geodésico bajo un Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) que indica las coordenadas en que se anclan las imágenes captadas. Además, se identificaron la longitud y posicionamiento de huellas de frenado en el escenario de un accidente con los recursos del procesamiento fotogramétrico digital, tales como modelos 3D, ortofotos y nubes de puntos, para estimar la velocidad a la que circulaban los vehículos antes de accidentarse. La metodología planteada ayuda a eficientizar el levantamiento del escenario de un accidente a comparación de los métodos utilizados en campo por las fuerzas policiales.

Los resultados muestran un error relativo promedio en la estimación

Los modernos drones pueden emplearse para todo tipo de aplicaciones, desde reconocimiento militar hasta peritaje de zonas de accidentes. Sigue leyendo para enterarte de estas novedosas técnicas de medición.

de la longitud de huellas de frenado y el trayecto menor a 5 % en relación con las mediciones en campo obtenidas en pavimento asfáltico seco.

Palabras clave: accidentes de tránsito, escenario de accidente, fotogrametría, modelos 3D, UAV, VTAM.

ABSTRACT

In this research work, the photogrammetric processing of images obtained from unmanned aerial

vehicles is carried out with the purpose of recreating or reconstituting the scenarios of traffic accidents that occurred in the highway area. The particularity of this research is that aerial photogrammetry is obtained under different climatic conditions taking, as reference, ground control points marked with a geodetic equipment under a Global Positioning System (GPS for its acronym in English) that indicates the coordinates in which the captured images are fixed. In addition, with the resources obtained from digital photogrammetric processing, such as 3D models, orthophotos and / or point clouds, the identification, length and positioning of braking tracks in the scene of an accident are established to estimate the speed at which the vehicles were circulating, prior to the occurrence of the accident. The proposed methodology helps to survey the scene of an accident to be faster, more efficient and more precise than the methods currently used in the field by police forces.

The results suggested that, considering the number of traffic accident scenarios recreated with the methodology described in the previous paragraph, the average relative error in estimating the length of braking tracks and distances, in general, does not exceed five percent in relation to the distances obtained in the field on a dry asphalt pavement.

Keywords: road traffic accidents, accident scenario, photogrammetry, 3D models, UAV, VTAM.

INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados, o UAV por sus siglas en inglés, se introdujeron por primera vez en

1960 y se utilizaban para realizar actividades de vigilancia militar [1]. Recientemente han sido adoptados para obtener fotografías aéreas como una alternativa de menor costo en comparación con las aeronaves de ala fija [1].

En muchas de las aplicaciones actuales se utilizan equipos UAV, el campo de la fotografía aérea no es la excepción. Además, la fotogrametría aérea de corto alcance se ha posicionado como una aplicación líder para el uso de imágenes en mapeo, inspección, metrología, entre otros rubros [2].

La fotogrametría, definida como la ciencia y tecnología de hacer mediciones utilizando fotografía, tiene como objetivo principal describir con alta fidelidad la geometría de un escenario [2]. En la presente investigación, se describen múltiples escenarios de accidentes ocurridos en zona de carretera para recolectar datos del lugar, principalmente geométricos [3].

La reconstrucción de escenarios para accidentes de tránsito por medio de fotogrametría aérea obtenida con UAV es una técnica funcional. La principal ventaja de este método consiste en que acelera e incrementa la precisión del trabajo de recolección de la información en el escenario del accidente de tránsito [3]. Un ejemplo de ello se muestra en la investigación realizada por [4], en la cual se establecen errores en la medición de distancias que oscilan entre 0.44 % y 4 %. Asimismo [5], experimentaron en las mismas condiciones de operación para el UAV que definió [4], es decir, se operaron equipos UAV en días de cielo despejado y soleado con viento débil o inexistente en un área abierta y libre de obstáculos, y se obtuvo un rango de porcentaje para el error

relativo en la medición de distancias de entre el 1.20 % y 9.94 %.

Como lo mencionan [3] en su investigación y de acuerdo a los resultados en [4] y [5], proponemos ganar ventaja de las imágenes obtenidas mediante equipo UAV, por la precisión que brindan en comparación con la recolección de datos a través de técnicas métricas e instrumentos tradicionales como el odómetro de rueda y el flexómetro para obtener información en campo. Tal como se establece en [4] y [5], a pesar de los numerosos trabajos de investigación válidos que involucran el uso de fotogrametría obtenida con UAV en la recreación de escenarios de accidentes, la mayoría de ellos se han desarrollado considerando circunstancias ideales (operación en cielo despejado, soleado, con viento débil o inexistente y en una amplia área abierta y libre de obstáculos) y no bajo condiciones climáticas desfavorables. Por tal motivo y para abordar dicha brecha, en esta investigación se recrearon escenarios de accidentes a través de fotogrametría obtenida con vehículos aéreos no tripulados operados bajo condiciones climáticas desfavorables, específicamente en días nublados y/o con una velocidad de viento de hasta 10 m/s [6] con el propósito de medir la longitud de las huellas de frenado que los neumáticos de los vehículos dejan en el escenario de un accidente sobre un pavimento asfáltico en estado seco. Los resultados obtenidos fueron comparados con el método que emplean las fuerzas policiales para medir las huellas de frenado en campo: uso de cinta métrica, odómetro de rueda, bloc de notas y lápiz para dibujar el boceto, tiza para marcar el pavimento y una cámara para documentación fotográfica [4]. La comparación se realizó con la finalidad de establecer la precisión,

expresada en porcentaje, de las longitudes obtenidas de una ortofoto resultante del procesamiento fotogramétrico de imágenes captadas con UAV (contemplando la variabilidad climática), en relación con las mediciones en campo.

Se ubicaron puntos de control terrestres o GCP (Ground Control Points) que ofrecen información para georreferenciar objetos [7]. Estos se colocaron en los escenarios recreados con ayuda de un GPS geodésico de mano, con la finalidad de evitar errores de posicionamiento; de acuerdo a [1], aunque las fotografías aéreas parecen similares a los mapas en la vista de planta del terreno, todas las fotografías aéreas contienen algunos errores de posicionamiento, por lo que no son utilizables directamente para hacer mediciones precisas de distancias, áreas ni direcciones.

De acuerdo con las características que debe cumplir el procesamiento fotogramétrico de imágenes obtenidas con equipo UAV, se estableció que a través del uso de un vehículo aéreo no tripulado, operado bajo distintas condiciones climáticas y con el procesamiento fotogramétrico digital georreferenciado a puntos de control terrestres, se corrige la variabilidad causada por efectos de clima sobre las coordenadas registradas en las fotografías aéreas y se obtiene un error relativo menor al 5 % en la medición de distancias y huellas de frenado en un pavimento asfáltico seco.

METODOLOGÍA

Se recrearon cinco accidentes ocurridos en carretera. Cada uno de los escenarios fue documentado primero por el método tradicional y también se realizó un registro de las condiciones climáticas predominantes en el

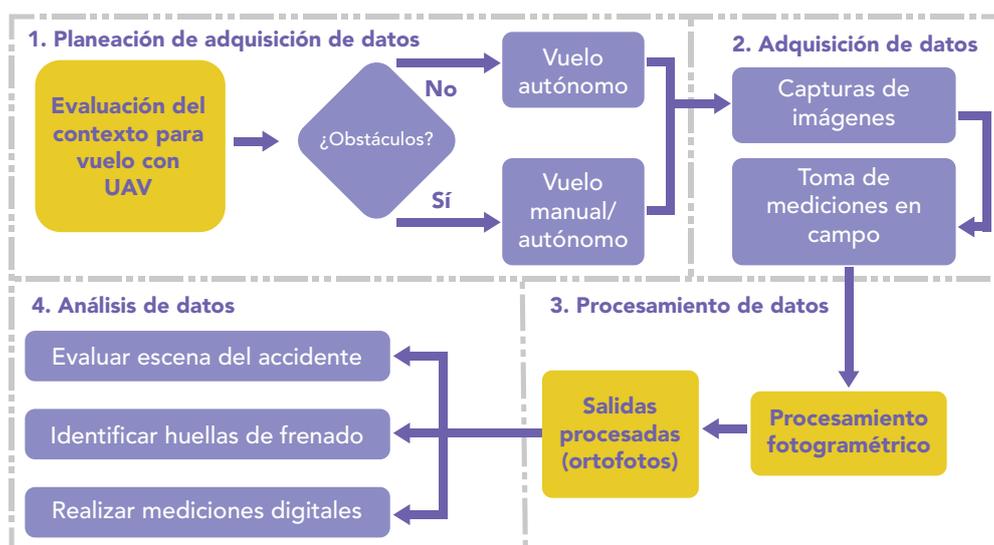


Figura 1. Metodología de reconstitución de accidentes de tránsito basada en vehículos aéreos no tripulados (UAV), diagrama funcional. Fuente: [4].

lugar del siniestro, recolectando datos geométricos de la carretera, así como de los vehículos involucrados. Posteriormente se realizó el vuelo de un UAV para obtener fotografías aéreas del lugar del accidente. El equipo utilizado fue un dron de ala rotatoria cuadrícóptero (un UAV con cuatro rotores) por su facilidad operativa; este tipo de drones no requiere que el aire pase a través de sus alas para mantenerse a flote [8] y cuenta con habilidad para realizar despegues y aterrizajes totalmente verticales, así como permanecer en una posición estacionaria durante el vuelo [4]. Estas capacidades no son parte de las características de manejo de los drones de ala fija.

De conformidad con [4], varios autores con amplia experiencia en la operación de diferentes UAV recomiendan el uso de cualquiera de los siguientes dos equipos: DJI Phantom 4 o su predecesor, DJI Phantom 3 Standard del fabricante DJI TECHNOLOGY CO., LTD, Shenzhen, China. Para efecto de este estudio, se utilizó el equipo DJI Phantom 4 ADVANCED, que posee las características listadas en el apéndice de este artículo.

CARACTERÍSTICAS DE LOS VUELOS PROGRAMADOS

Los cinco vuelos programados se realizaron bajo condiciones de clima no extremas pero desfavorables, específicamente en días nublados y/o con una velocidad de viento de hasta 10 m/s [6]. La metodología para la realización de los vuelos programados se describe en la Figura 1.

Para la planeación y ejecución del vuelo, se utilizaron dos herramientas de software: DJI GO (DJI TECHNOLOGY CO., LTD, Shenzhen, China) y Pix4Dcapture (Pix4D SA, Lausanne, Switzerland). En esta última aplicación, se definieron los parámetros de vuelo dentro de los siguientes rangos y especificaciones:

- Modo de vuelo: Autónomo.
- Tipo de malla: Doble (Double Grid; dg).
- Altura de vuelo: mayor a 10 metros y menor a 50.
- Ángulo de cámara: Entre 60° y 90°.
- Traslape de imágenes: de 60 % a 90 %.

Los parámetros anteriores se definieron a partir de que [4] indicaron en su investigación el uso de un equipo DJI Phantom 4 y bajo condiciones ideales para el vuelo. Los resultados más precisos se obtuvieron utilizando los siguientes parámetros: una malla doble para la toma de las fotografías aéreas en vuelo autónomo del equipo UAV a 15 metros de altura con orientación de la cámara en un ángulo de 65°.

En cuanto a los escenarios, se excluyó la zona urbana por las características del área de estudio y debido a que [4] establece que el error relativo obtenido en la medición de distancias en el plano (x,y) es similar en el contexto urbano y en carretera. La única diferencia relevante es que en el primero se presenta un mayor número de obstáculos.

LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL TERRESTRES

Al finalizar el vuelo del dron, se marcaron como mínimo tres puntos de control terrestres en cada área fotografiada con el

propósito de geoposicionar de una mejor manera las imágenes obtenidas con el UAV. Para el levantamiento de dichos puntos se utilizó un GPS de mano marca Garmin, modelo 64csx con las características físicas y de rendimiento mostradas en la Tabla 1.

La configuración de GPS utilizada para marcar los puntos de control terrestres se indica en la Tabla 2.

PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO

Las imágenes aéreas adquiridas fueron procesadas en el software fotogramétrico Autodesk ReCap Photo versión 2021 para obtener un mosaico ortofotográfico. En la ortofoto resultante se midieron las huellas de frenado en cada uno de los cinco siniestros estudiados con la herramienta de medición que contiene el software y se compararon con las mediciones obtenidas en sitio con el odómetro de rueda y el flexómetro. La expresión utilizada para obtener el porcentaje de error relativo para la medición de distancias en el plano (x,y) corresponde a la Ecuación (1):

$$\% e_{relativo} = \frac{D_{UAV} - dD_{suelo}}{D_{suelo}} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

- % e relativo: Porcentaje de error relativo entre D_{UAV} y D_{suelo} .
- D_{UAV} : Distancia en el plano (x,y) obtenida a través de fotogrametría aérea empleado equipo UAV.
- D_{suelo} : Distancia en el plano (x,y) obtenida a través de medición directa realizada a nivel de suelo y utilizando cinta métrica, flexómetro u odómetro de rueda.

Tabla 1. Características de GPS Garmin 64csx.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
DIMENSIONES FÍSICAS	6.1 × 16.0 × 3.6 cm	Autonomía de la batería	16 horas
TAMAÑO DE LA PANTALLA (ANCHURA × ALTURA)	3.6 × 5.5 cm; 6.6 cm de diagonal	Clasificación de resistencia al agua	IPX7
RESOLUCIÓN DE LA PANTALLA (ANCHURA × ALTURA)	160 × 240 píxeles	Interfaz del equipo	Compatible con USB de alta velocidad y NMEA 0183
TIPO DE PANTALLA	TFT transreflectiva de 65 000 colores	Altímetro barométrico	Sí
PESO	260.1 g con pilas	Cámara fotográfica	Sí. 8 Mega Píxeles
BATERÍA	2 pilas AA (no incluidas); se recomienda NiMH o litio	Brújula electrónica	Sí (tres ejes con inclinación compensada)

Fuente: [9]

Tabla 2. Configuración de GPS Garmin 64csx.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
SISTEMA DE SATÉLITE	GPS + GLONASS
FORMATO DE POSICIÓN	UTM UPS
DATUM DEL MAPA	WGS 84
ESFEROIDE DEL MAPA	WGS 84
ALTÍMETRO	Calibración automática activada
PRECISIÓN DE POSICIONAMIENTO	3 m promedio
MODO BARÓMETRO	Altura variable
TIEMPO DE DURACIÓN PARA MARCAR EL PUNTO	60 segundos

Fuente: [9]

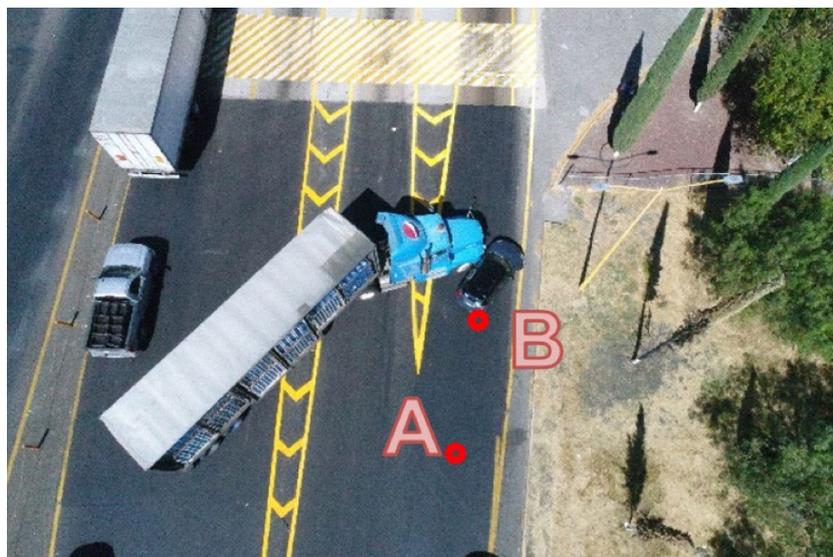


Figura 2. Identificación de extremos de huellas de frenado con los puntos A y B.

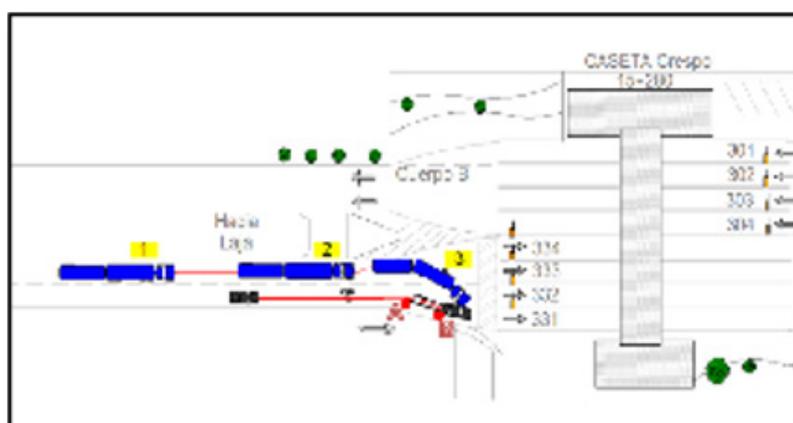


Figura 3. Croquis del escenario del accidente.

DETALLE DE HUELLAS DE FRENADO

MÉTODO TRADICIONAL

En la ubicación del escenario donde ocurrió el accidente, se marcaron gráficamente los extremos de las huellas de frenado con ayuda de una tiza directamente en el pavimento. Por medio del odómetro de rueda, se midió la longitud de las huellas de frenado, partiendo de la marca realizada con tiza en un extremo y avanzando en un solo sentido de circulación hasta llegar a la indicación del otro extremo. Después se midió la longitud de las huellas de frenado con

el flexómetro y partiendo de la marca realizada con tiza en un extremo, avanzando en un solo sentido de circulación hasta llegar a la marca del otro extremo. Las longitudes obtenidas con odómetro de rueda y flexómetro se registraron en una sola dirección de medición. Al final, las longitudes fueron documentadas en un formulario de recreación de escenarios de accidentes junto con un croquis para su mejor identificación.

En la Figura 2 se ilustran los extremos de las huellas de frenado identificadas en un accidente. El sentido de medición en todos los escenarios fue del punto A al punto B.

En la Figura 3 se ilustran los extremos de las huellas de frenado en el croquis del escenario de un accidente.

MÉTODO A PARTIR DE FOTOGRAFÍA AÉREA

De los productos resultantes del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas en el software Autodesk ReCap Photo versión 2021, se seleccionó la ortofoto y se exportó al software Autodesk Autocad Civil 3D en su versión 2022, donde se verificó que la ortofoto estuviera georreferenciada de manera correcta. Se identificaron

las marcas de tiza (o testigos) colocadas en los extremos de las huellas de frenado y se midió la huella directamente con la herramienta de medición en el mismo sentido que se tomó la medida en campo.

ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD INICIAL DE LOS VEHÍCULOS

La estimación de la velocidad inicial a la que circulaban los vehículos involucrados en cada

accidente se estimó a partir de la medición de la longitud de las huellas de frenado; con ello se determinó la velocidad inicial de los automóviles utilizando la Ecuación (2), que aplica para huellas marcadas por el derrape [10].

$$V_i = \sqrt{V_f^2 - 2\mu g d} \quad (2)$$

Donde:

- V_i : Velocidad inicial (m/s).
- V_f : Velocidad final (m/s).

- μ : Coeficiente de fricción longitudinal entre el vehículo y el pavimento (adimensional), el cual se describe en la Tabla 3. Coeficientes de fricción para pavimentos secos. Extraída de la N-CSV-CAR-1-03-007/17 [11].
- g : Constante de aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).
- d : Longitud de huellas de frenado obtenida a través de fotogrametría aérea (m).

Tabla 3. Coeficientes de fricción longitudinal para pavimentos secos.

PAVIMENTO	VEHÍCULO			
	$C_{2'}, C_{3'}, C_4$	$A, B_{1'}, B_2$	$T_2-S_{2'}, T_3-S_{2'}, T_3-S_3$	$T_3-S_2-R_{2'}, T_3-S_2-R_4$
RÍGIDO	0.80	0.85	0.80	0.80
FLEXIBLE	0.80	0.85	0.85	0.85
POROSO	0.75	0.85	0.85	0.85
LECHADAS	0.80	0.90	0.80	0.85
SELLOS	0.85	0.90	0.75	0.80

Fuente: [11].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DURACIÓN DEL LEVANTAMIENTO EN EL ESCENARIO DE UN ACCIDENTE EMPLEANDO EL MÉTODO TRADICIONAL

La Tabla 4 muestra el tiempo requerido para recabar datos con el método tradicional en campo, también se incluye el tiempo designado para completar el registro y realización del boceto a mano.

Tabla 4. Tiempo necesario para realizar el levantamiento en campo por el método tradicional.

PARÁMETRO	RESULTADOS					PROMEDIO
	ACCIDENTE No.					
	1	2	3	4	5	
HORA DE INICIO DE LAS MEDICIONES	12:00	12:30	13:35	08:59	14:30	No aplica
HORA FINAL DE LAS MEDICIONES	13:30	13:15	14:10	10:20	15:20	No aplica
TIEMPO TOTAL OBTENIDO EN CAMPO (MINUTOS:SEGUNDOS)	90:00	45:00	35:00	81:00	50:00	60:20



La Tabla 5 describe las condiciones climáticas bajo las que se realizó el vuelo con equipo UAV en cada escenario; la velocidad del viento fue medida en campo con un anemómetro convencional.

Tabla 5. Condiciones climáticas durante el vuelo del UAV.

PARÁMETRO	RESULTADOS				
	ACCIDENTE No.				
	1	2	3	4	5
CONDICIÓN DE LUZ	CIELO PARCIALMENTE NUBLADO (CONDICIÓN DESFAVORABLE)				
VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO (m/s)	1.8	2.2	1.6	2.1	1.7
VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO (m/s)	3.2	2.6	2.3	2.5	2.58
VELOCIDAD MÍNIMA (m/s)	0.7	2	1.4	1.8	1.28

**PARÁMETROS DE VUELO ASIGNADOS
Y TIEMPO DE PROCESAMIENTO
FOTOGRAMÉTRICO**

La Tabla 6 indica los parámetros de vuelo asignados al equipo UAV y el tiempo requerido para el procesamiento fotogramétrico en el software Autodesk ReCap Photo versión 2021.

Tabla 6. Parámetros de vuelo y tiempo de procesamiento fotogramétrico.

PARÁMETRO	RESULTADOS					PROMEDIO
	ACCIDENTE No.					
	1	2	3	4	5	
ALTURA (m)	35	20	25	20	20	No aplica
ÁNGULO DE CÁMARA (°)	65	75	70	70	70	No aplica
TIPO/MODO DE VUELO	Autónomo: Double Grid (DG)					No aplica
NÚMERO DE IMÁGENES	50	100	100	100	84	No aplica
DURACIÓN DE VUELO (MIN:S)	05:00	08:40	07:30	08:15	05:30	No aplica
TRASLAPE DE IMÁGENES (%)	80	70	80	90	80	No aplica
TAMAÑO DE PIXEL (CM/PX)	1.69	0.91	1.16	0.93	0.93	No aplica
DURACIÓN DEL PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO (MIN:S)	30:00	42:53	46:27	44:36	47:05	42:00
ÁREA (M ²):	2,924	4,200	3,430	3,267	2,000	No aplica

PRECISIÓN EN LAS MEDICIONES DE HUELLAS DE FRENADO

En la Tabla 7 se establece la comparativa de las distancias obtenidas con flexómetro, odómetro de rueda y UAV. También se indica el error relativo calculado con la Ecuación 1.

Tabla 7. Error relativo en huella de frenado.

ACCIDENTE No.		1	2	3	4	5
CLIMA	VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO (m/s):	3.2	2.6	2.3	2.5	2.58
	CONDICIÓN DE LUZ PRESENTADA	Cielo parcialmente nublado (condición desfavorable)				
LONGITUDES	FLEXÓMETRO (MM)	9550	40500	5300	26200	14650
	ODÓMETRO DE RUEDA (MM)	9620	40750	5350	26250	4700
	UAV (MM)	9600.96	39423	5233.2	26100	14400
	% DE ERROR OBTENIDO ENTRE EL FLEXÓMETRO Y UAV	0.53 %	2.66 %	1.26 %	0.38 %	1.74 %
	% DE ERROR OBTENIDO ENTRE EL ODÓMETRO Y EL UAV	0.20 %	3.26 %	2.18 %	0.57 %	2.04 %

Las longitudes definidas por el método UAV se obtuvieron de las ortofotos resultantes del procesamiento fotogramétrico en el

software Autodesk ReCap Photo versión 2021, ilustradas en las Figuras 4 a 8 para los accidentes 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente.



Figura 4. Ortofoto del accidente 1.



Figura 6. Ortofoto del accidente 3.



Figura 8. Ortofoto del accidente 5.



Figura 5. Ortofoto del accidente 2.



Figura 7. Ortofoto del accidente 4.



Una vez medidas las huellas de frenado a partir de las ortofotos, se calcularon las velocidades iniciales a la que circulaban los vehículos involucrados en los accidentes utilizando la Ecuación 2. Los resultados se ilustran en la Tabla 8.

CONCLUSIONES

Bajo las condiciones climáticas de día con cielo parcialmente nublado y velocidades de viento de hasta 3.2 m/s, hay una corrección de la variabilidad causada por efectos de clima sobre las coordenadas registradas en las fotografías aéreas y el error relativo encontrado fue menor al 5 % en la medición de huellas de frenado en un pavimento asfáltico seco. El error máximo relativo obtenido en los eventos recreados fue del 3.26 % en relación con las mediciones ejecutadas con los instrumentos que utiliza comúnmente un levantamiento tradicional, demostrando

que la hipótesis planteada en la presente investigación se cumple.

El tiempo de recolección de datos geométricos del escenario de un accidente por el método del procesamiento fotogramétrico de imágenes es más rápido que el método tradicional, con un tiempo promedio de 42 minutos. En comparación con el método tradicional que tomó 60 minutos, hubo un ahorro de tiempo promedio del 30 %.

Por otra parte, la precisión del posicionamiento de las imágenes obtenidas con el equipo UAV y georreferenciadas a puntos de control terrestres marcados con

un GPS de mano es baja; su error oscila entre los tres y cinco metros en el plano (x,y) y también en el eje z. Por tanto, y aunque el ajuste de las fotografías aéreas con los puntos de control se logró de manera casi perfecta durante el procesamiento fotogramétrico, el margen de error relativo al posicionamiento del GPS es considerable; no así la medición de huellas de frenado. Para el desarrollo de futuras investigaciones se propone utilizar un equipo topográfico que cuente con un sistema global de navegación por satélite (GNSS por sus siglas en inglés) o GPS de alta precisión a la hora de marcar los puntos de control terrestres.

Tabla 8. Velocidad inicial de investigación.

ACCIDENTE No.	1	2	3	4	5
VELOCIDAD DE INVESTIGACIÓN OBTENIDA (KM/H)	45.55	92.30	33.63	75.01	55.8

APÉNDICE

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO AÉREO NO TRIPULADO UTILIZADO PARA OBTENER FOTOGRAFÍAS AÉREAS

Tabla 9. Especificación de la aeronave.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
PESO (BATERÍA Y HÉLICES INCLUIDAS)	1 368 g	ALTURA MÁX. DE SERVICIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR	6 000 m (19 685 pies)
TAMAÑO WVDIAGONAL (SIN HÉLICES)	350 mm	RESISTENCIA AL VIENTO MÁX.	10 m/s
VELOCIDAD DE ASCENSO MÁX.	Modo-S: 6 m/s (19.7 ft/s)	TIEMPO DE VUELO MÁX.	30 minutos aprox.
	Modo-P: 5 m/s (16.4 ft/s)	RANGO DE TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	De 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F)

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
VELOCIDAD DE DESCENSO MÁX.	Modo-S: 4 m/s (13.1 ft/s)	SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATÉLITE	GPS / GLONASS
	Modo-P: 3 m/s (9.8 ft/s)		Vertical:
VELOCIDAD MÁX.	72 km/h (45 mph) (Modo-S)	RANGO DE PRECISIÓN DE VUELO ESTACIONARIO	±0.1 m (con posicionamiento visual)
	58 km/h (36 mph) (Modo-A)		±0.5 m (con posicionamiento por gps)
	50km/h (31mph) (Modo-P)		Horizontal:
ÁNGULO DE INCLINACIÓN MÁX.	42° (Modo-S)		±0.3 m (con posicionamiento visual)
	35° (Modo-A)		±1.5 m (con posicionamiento por gps)

Fuente: [6]

Tabla 10. Especificaciones de la cámara de la aeronave.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
SENSOR	1" cmos	TAMAÑO DE IMAGEN DE VIDEO	4096 × 2160 (4096 × 2160 24/25/30/48/50p)
	Píxeles efectivos: 20 M		3840 × 2160 (3840 × 2160 24/25/30/48/50/60 p)
OBJETIVO	FOV 84° 8.8 mm / 24 mm (formato equivalente a 35 mm) f/2.8 - f/11, enfoque a 1 m - ∞		2720 × 1530 (2720 × 1530 24/25/30/48/50/60 p)
RANGO ISO	Foto:		Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 horquilla de exposición a 0.7 eV bias
	100 - 3200 (Automático)		Intervalo: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s
	100- 12800 (Manual)		FOTO
VELOCIDAD OBTURADOR MECÁNICO	8 - 1/2000 s	VIDEO	mp4/mov (avc/H.264; hevc/H.265)
VELOCIDAD OBTURADOR ELECTRÓNICO	8 - 1/8000 s	RANGO DE TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	de 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F)
TAMAÑO DE IMAGEN	Proporción de imagen 3:2: 5472 x 3648		
	Proporción de imagen 4:3: 4864 x 3648		
	Proporción de imagen 16:9: 5472 x 3078		

Fuente: [6]



REFERENCIAS

- [1] P. Collier, "Photogrammetry and Aerial Photography", *International Encyclopedia of Human Geography*, vol. 10, pp. 91-98, 2020.
- [2] M. Daakir, M. Pierrot Deseligny, P. Bossier, F. Pichard, C. Thom, Y. Rabot y O. Martin, "Lightweight UAV with on-board photogrammetry and single-frequency GPS positioning for metrology applications", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 127, pp. 115-126, mayo 2017.
- [3] I. Stáňa, S. Tokař, K. Bucsházy y M. Bilík, "Comparison of Utilization of Conventional and Advanced Methods for Traffic Accidents Scene Documentation in the Czech Republic", *Procedia Engineering*, vol. 187, pp. 471-476, 2017.
- [4] L. Pádua, J. Sousa, J. Vanko, J. Hruška, T. Adão, E. Peres, A. Sousa y J. Sousa, "Digital Reconstitution of Road Traffic Accidents: A Flexible Methodology Relying on UAV Surveying and Complementary Strategies to Support Multiple Scenarios", *Environmental Research and Public Health*, vol. 17, p. 1868, 2020.
- [5] P. Jin, S. Ardestani, Y. Wang y W. Hu, "Unmanned Aerial vehicle (UAV) Based Traffic Monitoring and Management", Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT), University of New Jersey, New Jersey, 2016.
- [6] DJI, *Disclaimer and safety guidelines. Phantom 4 series*, Beijing: DJI, 2017.
- [7] R. Kamnik, M. Nekrep y D. Topolšek, "Using the scanners and drone for comparison of point cloud accuracy at traffic accident analysis", *Accident Analysis & Prevention*, vol. 135, p. 105391, febrero 2020.
- [8] J. Verbeke y J. De Schutter, "Experimental maneuverability and agility quantification for rotary unmanned aerial vehicle", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 10, n° 1, pp. 3-11, marzo 2018.
- [9] Garmin, "GPSMAP 64 series / GPSMAP 64X series Manual de usuario", Garmin Ltd, Olathe, 2020.
- [10] J. Borrel, *Manual de Investigación y Reconstrucción de Accidentes de Tráfico*, Primera ed., Valencia: Editorial Tirant lo Blanch, 2018, pp. 465-467.
- [11] SCT, "N-CSV-CAR-1-03-007/17. Determinación del coeficiente de fricción", SCT, Ciudad de México, 2017.