

Investigación y reconstrucción de hechos de tránsito en vías de alta velocidad.

Nombre: Elizagaray Muñoz José de Jesús, elizagaray1@gmail.com.

RESUMEN:

Para lograr establecer estrategias para robustecer la seguridad vial en las empresas de transporte, es importante detectar la causa que originan los accidentes viales, para poder desarrollar e implementar planes de seguridad vial; muchas de estas causas están relacionadas con la velocidad, cuyo calculo depende de diferentes variables como el coeficiente de fricción, entre otros datos. Además de un buen relevamiento de los indicios como huellas, distancias de proyección y deformaciones de vehículos, que nos darán la oportunidad de realizar una excelente reconstrucción analítica y acercarnos a la realidad objetiva. Los modelos físicos que se aplican en la reconstrucción cuentan con variables prestablecidas y dan un resultado basado en ensayos controlados, por lo que el investigador de accidentes viales en la mayoría de las veces aprovecha la experiencia adquirida y determina valores contenidos en distintos estudios especializados para los coeficientes de fricción. Lo idóneo es realizar pruebas de frenado con instrumentos especializados como acelerómetros y hoy en día con las bondades que ofrecen las aplicaciones especializadas de los teléfonos inteligentes. En este trabajo se pretendo demostrar los alcances del Método Directo y del Modelo Montecarlo, para realizar los cálculos de velocidad por sin el uso herramientas especializadas, obteniendo muy buenos resultados.

Palabras Clave: Coeficientes de rozamiento; indicios, coeficiente de restitución, velocidad común, velocidad relativa.

1. Introducción

Los hechos de tránsito terrestre en carreteras de alta velocidad son usualmente difíciles de investigar por la gravedad de los daños y de las extensas longitudes en que se desarrollan las trayectorias post-colisionales, además de los diferentes giros de roto traslación y/o volcaduras que pudieran experimentar los vehículos participantes, además las deformaciones que sufren los mismos son tan extensas que no es posible aplicar los modelos clásicos para el cálculo de energía disipada en el trabajo de deformación.

Una de las variables más complejas a calcular es el coeficiente de fricción, su valor esta propuesto en documentos especializados, siendo uno de los más utilizados el de Wargner [1], donde se determina un valor de 0.65 para camiones en superficie de concreto hidráulico y de 0.66 propuesto por Bedsworth [2], ambos valores coincidentes, contenidos en diferentes estudios especializados en la materia. Desde luego que estos coeficientes fueron calculados en ambientes controlados y no siempre se asemejan a la realidad.

Cuando un vehículo frena sus ruedas experimentan diferentes fuerzas horizontales longitudinales de manera individual [3] y esas individualidades aportan una fuerza de trabajo de desaceleración, cuando por alguna razón mecánica o física sus ruedas no aportan esta fuerza el vehículo pierde "poder" en el proceso frenado, es decir que el coeficiente de fricción disminuye, estas deficiencias afectan la distancia de parada de un vehículo. En carreteras de alta velocidad este fenómeno resulta muy recurrente por las condiciones de la superficie de rodamiento, porque los vehículos de gran porte presentan daños en los elementos del sistema de frenado o simplemente porque el conductor no realizó alguna maniobra de frenado por alguna limitación psíquica y/o física.

A veces en los informes policiales el relevamiento de las evidencias, huellas y vestigios resulta con deficiencias, lo que dificulta notablemente la reconstrucción analítica, por lo que resulta necesario valerse del Modelo de Montecarlo, el cual es extremadamente poderoso para la reconstrucción de accidentes viales por las siguientes razones:

- a) Los cálculos se pueden realizar para prácticamente cualquier modelo.
- b) Se necesita relativamente poco trabajo analítico.
- c) El resultado del método permite al reconstruccionista ilustrar la probabilidad de los resultados, lo que no es posible con los otros métodos [4].

2. Metodología

Un evento que se registró en una carretera un camión de tres ejes vehículo (1), con peso del orden de los 25,000 kg., peatón (2), vehículo (3) sedan de 1,350 kg., vehículo (4) sedan de 1,500 kg., vehículo (5) pick up de 2,080 kg., y camión estacionado (6), mediante la aplicación de la fórmula para calcular la velocidad a partir de la huella de frenado, se puede calcular la velocidad a la que transitaba el vehículo (1), quien fue el participante que apporto la mayor energía.

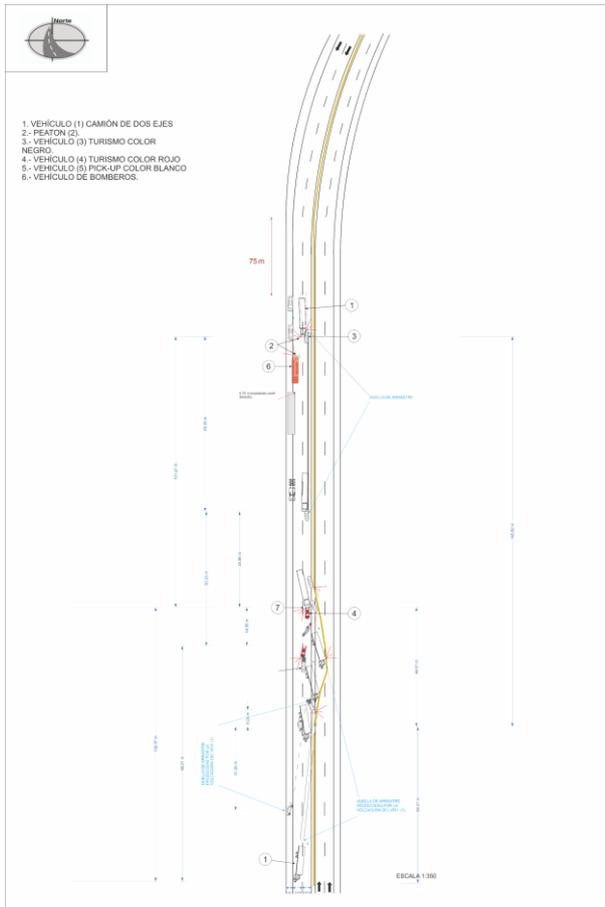


Fig. 1: Esquema de la dinámica de la colisión.

luego el vehículo (1) prosiguió su trayectoria post-colisional por 50.23 m. sin dejar huella de frenado, hasta volcar y desplazarse sobre su parte lateral por 88.01 metros donde dejo huellas de arrastre, entonces la variación del movimiento se puede calcular con:

$$v = \sqrt{2 * g * \mu * d} \dots \dots \dots \text{Ec. 1 [5]}$$

En símbolos:

- v es la velocidad;
- g, es la fuerza gravitatoria,
- μ, es el coeficiente de fricción,
- d, es la distancia de la huella de frenado,

Luego para poder aplicar el Método Directo, se debe despejar el coeficiente de fricción para poder realizar mejores cálculos, teniendo como evidencia los 203.28 metros de distancia que recorrió

$$\mu = \frac{v^2}{2 * g * d} \dots \dots \dots \text{Ec. 2}$$

Como la distancia post-colisional del vehículo (1) lo realizo en dos procesos, se tomaran en cuenta dos tramos con diferentes coeficientes de fricción, el primero neumatico-concreto hidráulico; y el segundo metal -concreto hidráulico, entonces:

$$\mu_1 = \frac{v^2}{2 * g * d} \quad \mu_2 = \frac{v^2}{2 * g * d}$$

Ahora, lo que “forzó” a utilizar este método, fue que en el proceso de frenado solo se identificó y se relacionó una sola huella de frenado, producidas cuando el vehículo (1) se montó sobre el vehículo (3) y se desplazaron en una sola pieza por 65.35 m.

$$v = \sqrt{2 * g * (\mu_1 * d_1 + \mu_2 * d_2 + \mu_3 * d_3)}$$

Resultando lo siguiente:

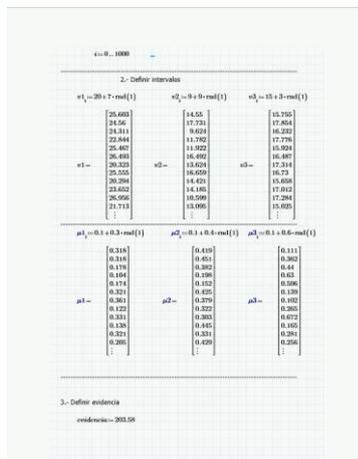


Fig. 2: Imagen de la definición de intervalos en Mathcad.

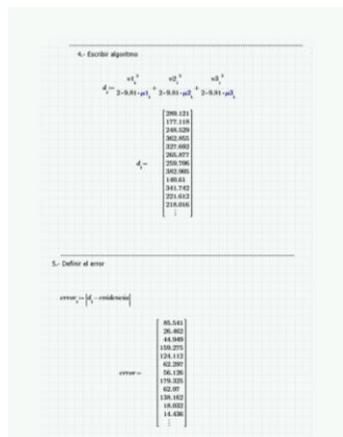


Fig. 3: Imagen de la definición de algoritmos en Mathcad.



Fig. 4: Imagen de la definición de algoritmos en Mathcad.

Resultando un valor de 116 km/h, aplicando este Método Directo, nos da una idea de los valores del coeficiente de fricción para poder ahora realiza cálculos con el Método Montecarlo resultaría:

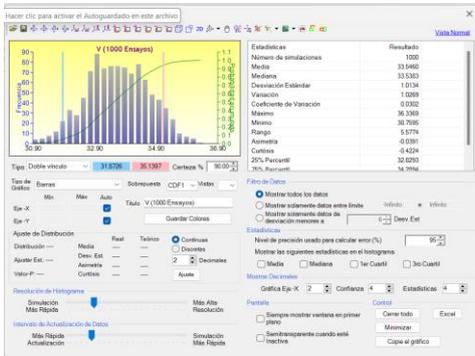


Fig. 5: Imagen de simulador Risk 2017 versión demo.

Con esta herramienta se obtiene una velocidad entre 110 y 129 km/h.

Una vez conocida la velocidad a la que transitaba el vehículo (1), ahora vamos a calcular las velocidades de los demás vehículos (3), (4) y (5).

De la información obtenida por medio de las entrevistas un testigo manifestó que estos vehículos circulaban a baja velocidad, porque ese era el gran “acertijo” para resolver.

Como se estableció que el vehículo (1) se “monto” sobre el vehículo (3) y ambos se trasladaron en una sola pieza en un orden de los 65.35 metros, es decir se presentó una colisión inelástica y su velocidad común fue la misma para ambas unidades motrices, por tanto, su coeficiente de restitución fue

$e=0$, esto de acuerdo con los valores del coeficiente de restitución que van desde 0 para una colisión inelastica y de 1 para una colisión elástica, los valores de e en colisiones de vehículos oscilan entre 0.05 y 0.45 [6], debido a la composición de su estructura, entonces se tendría que calcular la velocidad común que alcanzaron ambos móviles, mediante el principio de la conservación cantidad de movimiento PCCM, asumiendo que los centro de masa de cada vehículo son coincidentes:

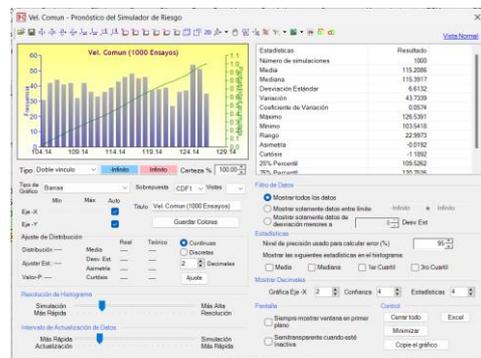


Fig. 6: Imagen de los cálculos de la velocidad común con simulador Risk 2017 versión demo.

$$vc = \frac{m1 * v1 + m3 * v3}{m1 + m3}$$

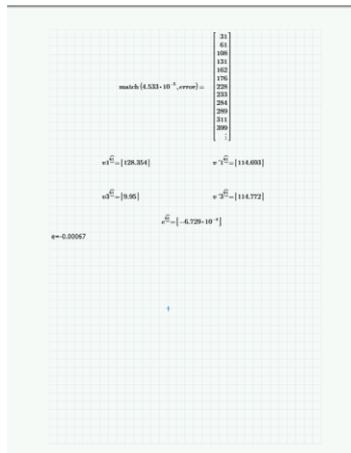
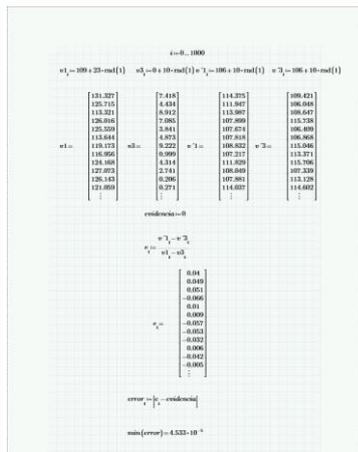
Dado que no tenemos un indicio objetivo para demostrar la velocidad antes del impacto del vehículo (3), la cual según el testigo era baja, por lo que iniciaremos una aproximación entre 0 y 20, mediante el Método Montecarlo y utilizando la herramienta Risk Simulator 2017 versión demo.

Resultando una velocidad común entre 106 y 126 km/h., si deseáramos comprobar estos valores el Método Directo es un procedimiento idóneo, considerando un valor del coeficiente de restitución $e=0$, mediante [7].

$$e = \frac{v'1 - v'3}{v1 - v3}$$

En símbolos:

- e es el coeficiente de restitución;
- $v'1$, es la velocidad post-impacto vehículo (1);
- $v'3$, es la velocidad post-impacto vehículo (3);
- $v1$, es la velocidad pre-impacto del vehículo (1);
- $v3$, es la velocidad pre-impacto del vehículo (3);



El coeficiente de restitución [6] es un parámetro de la colisión que caracteriza la pérdida de energía al impacto entre vehículos, pero es posible relacionarlo directamente con uno de los vehículos, además en determinados casos puede adoptar valores negativos, entre otras cosas cuando existen empotramientos debajo de una estructura (Campón, 2020, pág. 97).

Es por la anterior que obtuvimos un valor de $e = -0.00067$.

Un valor aceptable para obtener la velocidad común de entre 109 km/h 126 km/h y una velocidad del vehículo (3) antes de ser impactado no mayor a 20 km/h.

En la segunda colisión del vehículo (1) contra el vehículo (4) resultó por alcance, recorriendo el primer automotor una distancia del orden de los 101.21 metros antes de este segundo impacto, siendo necesario calcular la disminución de la cantidad de movimiento en este trayecto, mediante la relación del coeficiente de fricción con la fuerza gravitatoria [8].

$$a = -\mu * g$$

En símbolos:

- a, es la desaceleración;
- μ , es el coeficiente de fricción,
- g, es la fuerza gravitatoria.

Tomado en cuenta dos coeficientes de fricción: (0.38 – 0.45) y (0.23-0.3) obtenidos anteriormente en los dos tramos de 65.35 m. y 35.68 m. antes de impactar al vehículo (4),

Se obtiene valores entre, luego con esta información se obtiene una desaceleración de:

Valor de μ	Primer tramo (m)	Desaceleración.
0.38	65.35	- 3.72 m/s ²
0.45	65.35	-2.94 m/s ²

Valor de μ	Segundo tramo (m)	Desaceleración.
0.23	35.68	- 2.25 m/s ²
0.30	35.68	-1.47 m/s ²

Valores necesarios para obtener la velocidad del vehículo (1) al momento de impactar al vehículo (4), mediante las fórmulas del Movimiento Rectilíneo Uniformemente Variado:

$$v_{imp\ v1\ vs\ v4} = \sqrt{2 * -a * d + v1^2}$$

En símbolos:

- $v_{imp\ v1\ vs\ v4}$, es velocidad de impacto del vehículo (1) contra el vehículo (4);
- a, es la desaceleración;
- d, es la distancia recorrida por el vehículo (1),

v_1 , es la velocidad del vehículo (1) antes de impactar el vehículo (4).

$-a$	Distancia	v_1 , es la velocidad del vehículo (1) antes de impactar el vehículo (3).	$v_{imp\ v1\ vs\ v4}$
- 3.72 m/s ²	65.35 m.	30.55 m/s	21.09 m/s 75.93 km/h.
- 2.25 m/s ²	35.68 m.	21.13 m/s	16.84 m/s 60.64 km/h
- 3.72 m/s ²	65.35 m.	35.83 m/s	25.58 m/s 95.70 km/h.
- 2.25 m/s ²	35.68 m.	28.24 m/s	21.07 m/s 75.88 km/h

La suma vectorial de esas dos velocidades nos dará la velocidad de impacto del vehículo (1) al impactar al vehículo (4) transitaba en un orden entre 60 y 75 km/h.

Por otro lado, el vehículo (4) después del impacto se proyectó 14.50 metros y con coeficiente de fricción entre 0.45 y 0.55, obtenemos una velocidad post-impacto del orden de los 40 y 45 km/h.

De la misma manera es necesario calcular la velocidad común de esta colisión para poder obtener la velocidad del vehículo (4) antes de ser impactado, cuya masa es 1,500 kg.

$$v_c = \frac{m_1 * v_1 + m_3 * v_4}{m_1 + m_3}$$

Se realiza la misma operación de aplicar el Método Montecarlo y se obtiene una velocidad común del orden de los 57 y 72 km/h.

Ahora si calculamos el Coeficiente de Restitución, podemos aproximarnos a la velocidad antes del impacto del vehículo (4), con una velocidad del vehículo (1) igual a la velocidad común, considerando que la pérdida de la energía después de este impacto es casi nula, obteniendo un coeficiente de restitución entre 0.3 y 0.4 valores que dan como resultado una velocidad del vehículo (4) no mayor a 30 km/h.

Después de este segundo impacto el vehículo (1) se volcó y continuó su trayectoria sobre su parte lateral izquierda, impactando a su paso al vehículo (5), el cual producto de ese impacto también volcó, pero sobre su parte lateral derecha.

Desde luego para continuar con la investigación es necesario calcular la velocidad pre-impacto y post-impacto del vehículo (5), cuya masa es 2,080 kg., trocha 3.7 m. y altura del centro de gravedad de 1.3 m mismo que se proyectó 6.24 sobre el carril izquierdo sobre sus ruedas y 31.25 metros sobre su parte lateral derecha, con coeficiente de fricción de .3 para neumático con superficie de concreto hidráulico y .26, desde luego que se siguió utilizando el Método Directo para calcular las aproximaciones de los coeficientes de fricción respectivos. Además de sumar a la cantidad de movimiento la velocidad mínima de vuelco.

$$v_{vuelco} = \sqrt{\frac{2 * M * g * \left[\left(\left(\frac{t}{2} \right)^2 + hc g^2 \right)^{0.5} - hc g \right]}{\left[M * \left(\left(\frac{t}{2} \right)^2 + hc g^2 \right) + I_o \right]} * \frac{\left[M * \left[\left(\frac{t}{2} \right)^2 + hc g^2 \right] + I_o \right]}{M * hc g}}$$

Utilizando la herramienta informática RACTT versión 5.8 [8], se obteniendo un resultado de velocidad mínima de vuelco de 11 km/h.

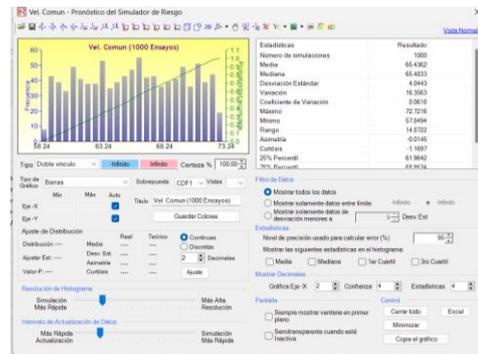


Fig. 9: Imagen de los cálculos de la velocidad común con simulador Risk 2017 versión demo.

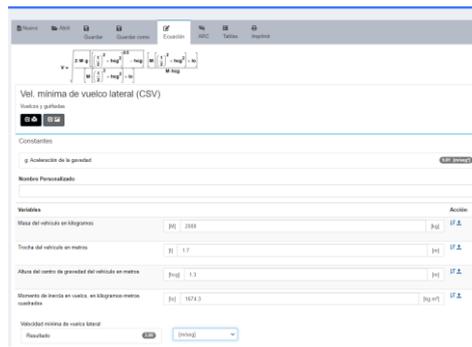


Fig. 10: Imagen del cálculo de la velocidad mínima de vuelo utilizando RACTT versión 5.8

Luego, la suma de las velocidades en cada etapa de la trayectoria post colisional del vehículo (5), con el Método Directo nos da una velocidad de post-impacto del vehículo (5) de 56 km/h.

$$v_5 = \sqrt{2 * g * \mu * d + v_{vuelco}^2}$$

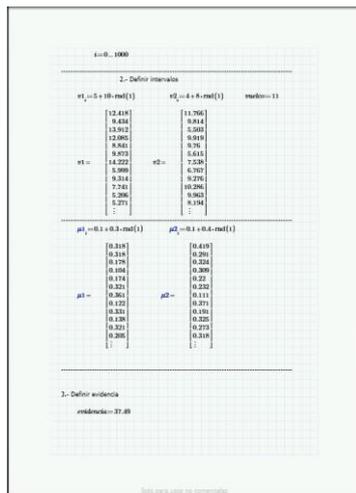


Fig. 11: Imagen de la definición de algoritmos en Mathcad.

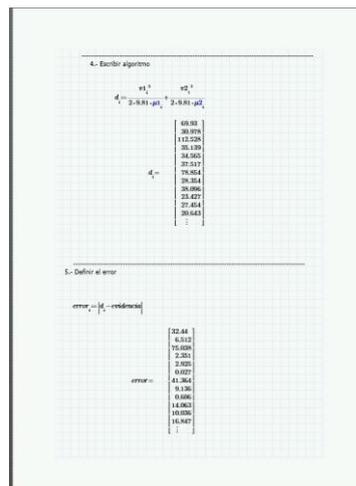


Fig. 12: Imagen de la definición de algoritmos en Mathcad.

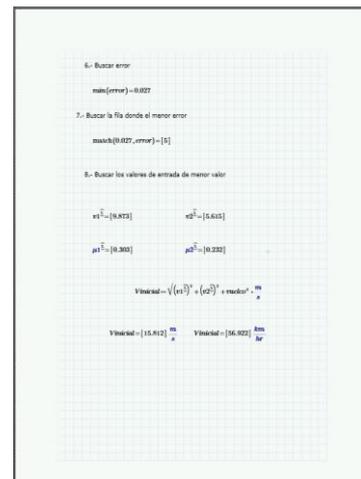


Fig. 13: Imagen de la definición de algoritmos en Mathcad.

Resulta necesario una vez más calcular la desaceleración del vehículo (1) antes de impactar al vehículo (5) para así poder aproximarnos a la velocidad pre-impacto de este último móvil, continuando con la aplicación del Movimiento Rectilíneo Uniformemente Variado: calculado la desaceleración, podemos obtener la velocidad de impacto del vehículo (1) contra el vehículo (5), con una distancia recorrida del vehículo (1) desde que choco con el vehículo (4) en un orden de los 44.61 metros, con coeficiente de fricción del orden de 0.3, con velocidad después del impacto contra el vehículo (4) de 72 km/h. (20 m/s)

$$a = -\mu * g; v_{velocidad\ de\ impacto\ veh.(1)\ vs.\ veh.(5)} = \sqrt{2 * a * d + v_1^2}$$

Se obtiene una velocidad del orden 42 km/h.

No logrando tener una aproximación fiable de la velocidad del vehículo (5), por falta de información confiable.

3.- Discusión de los resultados

De los resultados obtenidos de las velocidades de los vehículos (3) y (4), como se demostró con el cálculo del coeficiente de restitución fue un elemento para manejar la incertidumbre y dar buenas aproximaciones en las velocidades, pre impacto de estos vehículos.

Como es notorio la investigación de accidentes viales en carreteras de alta velocidad son complejos por las distancias post-colisionales recorridas por los vehículos y por los daños que resultan los mismos, siendo necesario aplicar los protocolos de medidas más usuales, con objetivo de garantizar que la investigación de campo sea medible - que obtengan las longitudes de las evidencias- comparable – que esas medidas sean comparadas con una segundo registro- y repetible- que cualquier otro perito tenga las posibilidades de volver a ubicar las evidencias.

4. Conclusiones

Con el uso del Método Monte Carlo y el Método Directo, empleando de manera correcta los algoritmos mostrados en la figura 2 ofrecen buenas alternativas para calcular los coeficientes de fricción, es deseable realizar los cálculos físicos en ese tramo carretero para obtener una mejor aproximación, desde luego con el uso de tecnología diseñada, para tal efecto, como acelerómetros y/o con la utilización de teléfonos celulares inteligentes.

El coeficiente de restitución puede ser un factor de utilidad para calcular y comprobar las velocidades obtenidas a partir de otros modelos fisicomatemáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFIAS:

- [1] Warner, Charles; Gregory C.; Michael B., J. and Geoff J. Germane “Friction Applications in Accident Reconstruction”, SAE 830612.
- [2] Bedsworth K., Butler R., Rogers G., Breen K, Fisher W., “Commercial Vehicle Skid Distance Testing and Analysis” , SAE 2013-01-0771.
- [3] Accidentes de Tránsito: Investigación y Reconstrucción, Segunda Edición, García. Anibal O., Editorial Nueva Librería, Buenos Aires Argentina, ISBN 978-987-1871-4.
- [4] Brach Matthew, R., Brach M., Raymond y Mason J. James, “Vehicle Accidente Analysis and Reconstruction Methods”, Tercera Edición, SAE, International, SBN978-1-4686-0419-1.
- [5] Aguilar, M.O., Navas, P J., Olivares, A. R., Investigación Criminalística en Hechos de Tránsito Terrestre, Instituto Nacional de Ciencias Penales, México, Cd. Mx.: 2009; ISBN 978-607-7882-04-6.
- [6] Accidentes de Tránsito: Investigación y Reconstrucción, Segunda Edición, García. Anibal O., Editorial Nueva Librería, Buenos Aires Argentina, ISBN 978-987-1871-4.
- [7] Manual La Reconstrucción de Siniestros Viales, Departamento de Investigación y Calidad Centro Universitario de la Guardia Civil (CUGC), Madrid, España, 2020, ISBN: 978-84-121575-5-0.
- [8] Traffic Accident Reconstruction, Volumen 2, Fricke Lynn B. Northwestern University Traffic Institutem Illinois, USA, ISBN 0-912642-07-6.

Nota importante: enviar el resumen a arat4@apiat.org respetando las fechas límites de organización.

Enviar el archivo en formato abierto Word con el siguiente nombre de archivo: Apellido1-Nombre1-Nombre2.docx