

Probabilidades de impacto y energías de impacto de lacrimógenas lanzadas en distintas condiciones

Nicolás Mujica and Rodrigo Soto

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile, Avenida Blanco Encalada 2008, Santiago, Chile*

(Dated: 15 de mayo de 2020)

Mediante mediciones in situ de lanzamiento de proyectiles lacrimógenos de tipo Condor triple, Condor único y ALS único, y el uso de modelos físicos alimentados con datos proporcionados por los experimentos, se estudió la probabilidad de impacto y la energía de impacto sobre una persona ubicada a 51 metros de distancia del lugar de lanzamiento. Los resultados muestran que si la persona recibió impactos de proyectiles, no existe ninguna posibilidad que éstos hayan sido lanzados con un ángulo de 25° o 45° , sino que el ángulo de disparo debe estar entre 0° o 10° . Los proyectiles Condor triple, si bien pueden impactar, tienen una baja energía que, de acuerdo a la literatura no podrían provocar una rotura ocular. Los proyectiles únicos lanzados entre 0° y 5° tienen una apreciable probabilidad de impactar entre 1 y 2 metros de altura y, si impactan, tienen una alta energía, consistente de acuerdo a la literatura con valores que pueden provocar una rotura ocular. Dado que ocurrió un impacto a 51 metros, con rotura ocular, se puede concluir que el proyectil usado es de tipo único, disparado entre 0° y 5° , descartando el uso de un proyectil Condor triple o un disparo con un ángulo de 10° o mayor. Adicionalmente, se determinó que al momento del impacto a 51 m todos los proyectiles llegan rotando, siendo imposible predecir en qué orientación ocurre el impacto, además todos llegan emitiendo gases, con una temperatura entre 150 y 220°C .

I. DAÑO DE PROYECTILES EN OJOS

Existe una amplia literatura sobre el uso de armas de control de multitudes. En particular, los proyectiles de impacto cinético (KIP, por sus siglas en inglés) han sido bastante estudiados (para una revisión reciente ver [1]). Éstos han sido diseñados para causar dolor o heridas no letales, ya sea con proyectiles únicos (postas únicas de goma u otros materiales) o por grupos (perdigones de goma u otros materiales). Sin embargo, debido a su relativa poca precisión y su potencial mal uso, causando discapacidad o muerte, los proyectiles de impacto cinético no parecen ser buenos instrumentos de control de multitudes [1].

El presente informe trata del uso de bombas lacrimógenas como proyectiles de impacto cinético. Aunque su diseño no está contemplado para su uso como proyectil, es de público conocimiento que éstos han causado heridas graves en manifestantes, debido justamente al impacto directo sobre partes del cuerpo, tanto en extremidades, torso, como en el rostro o cabeza de personas.

Las variables que determinan el tipo y gravedad de una lesión de impacto directo por uno o más proyectiles son el tipo de material (densidad, dureza), su forma, la cantidad de proyectiles, la velocidad de salida de la escopeta con la cual son lanzadas, la trayectoria de vuelo, la distancia a la cual son disparadas y el lugar del cuerpo donde impactan [1].

En general, un proyectil está caracterizado por su tamaño, forma y masa M . Del tamaño y forma, la cantidad más relevante es el área de impacto A . Si el choque es frontal, el área A es el que se obtiene mirando el objeto de frente. Cuando el proyectil golpea a un cuerpo (ojo, piel, hueso, etc.) es relevante también la rapidez con que impacta V .

Diversos estudios han mostrado que lo más importante para poder determinar el daño que causa un proyectil al impactar en un ojo está dado por lo que se llama la energía normalizada [2–4]. Ésta se calcula como

$$E_n = \frac{1}{2} \frac{MV^2}{A}. \quad (1)$$

La unidad con la que se mide es J/m^2 ($1 \text{ J} = 1 \text{ joule} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$) y corresponde simplemente a la energía cinética del objeto dividido por el área de impacto del proyectil. Por otro lado, para el estudio de impacto en huesos, por ejemplo el tabique nasal, algunos autores han encontrado que la fuerza máxima en el impacto es la determinante para evaluar la probabilidad de rotura del hueso [5].

La figura 1-izquierda muestra el resultado principal del estudio realizado por Kennedy y coautores del año 2006 [3], sobre la colisión de proyectiles en ojos humanos. Los datos corresponden a eventos de impacto donde no se produjo ruptura del globo (triángulos, en el eje inferior) o donde sí se produjo ruptura (cruces, en el eje superior). Se trata de una colección de 83 impactos de diferentes tipos de objetos sobre ojos humanos. Los materiales y formas analizados son: esferas de espuma y de plástico, perdigones de rifles a postones, también de tipo “paintball”, y cilindros de acero, aluminio y de corcho, entre otros. El estudio estadístico de todos estos casos, para masas, formas, áreas de colisión y

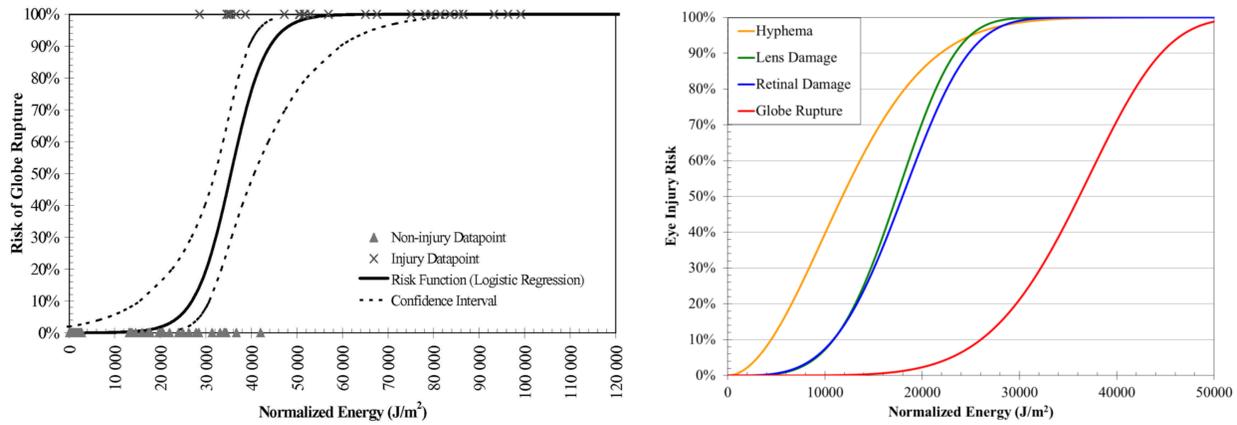


Figura 1. Izquierda: Datos y curva riesgo de ruptura ocular en ojos humanos en función de la energía normalizada, obtenida del trabajo Kennedy y coautores [3]. Derecha: Curvas de riesgo de diferentes tipos de lesión ocular: daño por hipema (hyphema), daño del lente (lens damage), daño en retina (retinal damage) y ruptura del globo (globe rupture) en función de la energía normalizada del proyectil, obtenido de Alphonse y Kemper [4].

velocidades diferentes, es lo que permitió determinar que es la energía normalizada la cantidad correcta que describe la transición entre la baja y alta probabilidad de ruptura ocular. Por ejemplo, bajo 25000 J/m^2 no hay eventos de ruptura; en el rango $25000 - 45000 \text{ J/m}^2$ comienzan a ser mas probables estos eventos; ya sobre 45000 J/m^2 , todos los casos analizados corresponden a ruptura del globo ocular. La curva continua corresponde a la evaluación teórica de la función de riesgo, que es la probabilidad de que haya o no ruptura ocular. La transición entre no ruptura y ruptura ocurre en el rango de 30000 y 40000 J/m^2 . La figura 1-derecha muestra el resumen de un estudio más reciente también hecho por Kennedy y coautores, presentado en 2013 por Alphonse y Kemper [4]. Se trata de una colección de 250 impactos de diferentes tipos de proyectiles sobre ojos humanos. En este caso se logra obtener las funciones de riesgo para diferentes tipos de daños oculares. Considerando estos resultados, en este informe reportamos la energía normalizada al momento del impacto a una distancia de 51 m.

II. OBJETIVOS DEL INFORME

Mediante mediciones experimentales in situ y el uso de modelos físicos de movimientos de proyectiles se busca:

1. Determinar la probabilidad que un proyectil de lacrimógena impacte a una persona ubicada a 51 m del disparo, al considerar distintos tipos de munición y distintos ángulos de lanzamiento.
2. En los casos en que el impacto es posible, determinar las energías cinética y energías normalizadas con que impactan los proyectiles.
3. Medir la temperatura de los proyectiles al momento de impactar.
4. Determinar si al momento del impacto los proyectiles están emitiendo gases.

III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizaron dos campañas de medidas en dependencias de la Policía de Investigaciones de Chile, con fechas 9 y 20 de marzo de 2020. Para lograr los objetivos enunciados, se diseñaron dos tipos de medidas (experimentos). Los de primer tipo fueron de medida de velocidad de salida de las lacrimógenas desde la escopeta de lanzamiento, como también su dispersión angular de salida, usando la cámara rápida Phantom V641⁽¹⁾. Los de segundo tipo fueron medidas de llegada de bombas lacrimógenas a un blanco ubicado a 51 m de distancia de su lanzamiento, usando la

⁽¹⁾ Esta cámara permite grabar varios miles de imágenes por segundo, con lo cual se puede hacer el seguimiento de un objeto en una secuencia de imágenes, y por lo tanto obtener información de su trayectoria

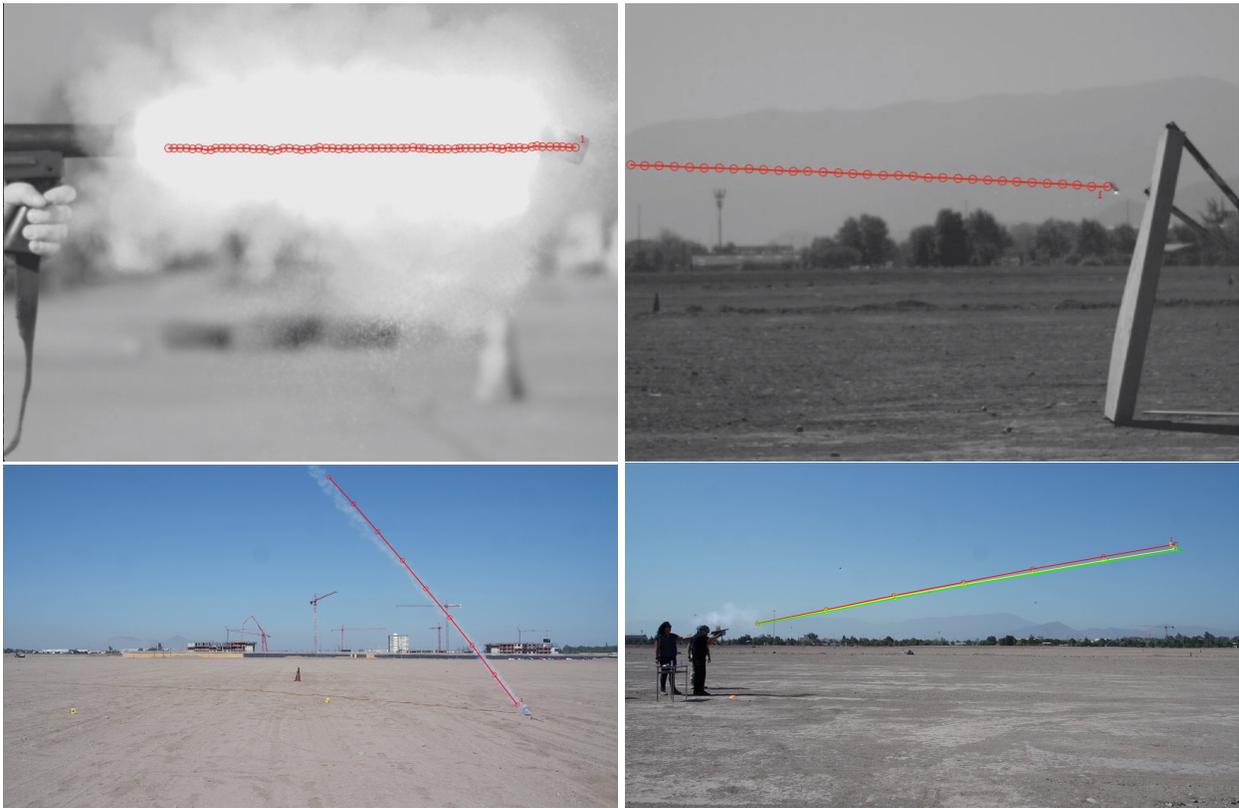


Figura 2. Ejemplos de imágenes capturadas. Arriba: cámara rápida Phantom; abajo: cámara de video Samsung. En el caso de la cámara Phantom la adquisición se realizó con una tasa de adquisición de 7300 cuadros por segundo para las grabaciones de disparo, y de 4300 cuadros por segundo para las grabaciones de llegada; en el caso de la cámara Samsung, esta graba videos a 30 cuadros por segundo. Los puntos en las líneas de colores indican las posiciones de los proyectiles en cada cuadro (en el caso de llegada con la Phantom es cada 10 cuadros). Se observa que la cámara rápida puede medir con mucho mayor detalle. En el caso inferior derecho, el lanzamiento es de un proyectil Condor triple.

misma cámara rápida. Estas medidas fueron de impacto en el blanco o de pasada por arriba de éste o de llegada al suelo a una corta distancia del blanco, dependiendo del tipo de lacrimógena y del ángulo de lanzamiento. En este segundo tipo de experimento, se midió entonces la rapidez y ángulo con el cual se llega al blanco a 51 m del lanzamiento y su altura de llegada, o en su defecto la distancia a la cual choca (o chocan) en el piso antes o después (si pasan por arriba) del blanco.

Se dispararon lacrimógenas de tres tipos: triple y únicas de marca Condor (Brasil), y únicas de marca ALS (EE.UU).

En la primera fecha se realizaron 11 adquisiciones de video (secuencias de imágenes con la cámara rápida). Todos fueron de salida, para ángulos de lanzamiento de 0° y 45° . En esta primera campaña también se midió la temperatura de los cartuchos de bombas lacrimógenas al momento de impactar en el suelo, usando un sensor infrarrojo a distancia con puntero láser (modelo CPS Temp-Seeker Tmini12).

En la segunda fecha se realizaron 38 adquisiciones de video, los primeros 18 de salida y los siguientes 20 de llegada. Para los de primer tipo, los ángulos de lanzamiento fueron de 25° y 45° , y para los de segundo tipo, de 0° , 5° y 10° . El detalle del número de lanzamientos por ángulo y con cuales tipos de lacrimógenas se entrega en una tabla presentada en la sección siguiente. Para todos los lanzamientos de esta segunda fecha se midió también la posición planimétrica de impacto de cada bomba lacrimógena (ya sea de tipo triple o única). En esta ocasión se colocó una segunda cámara de video Samsung NX 3000, full HD, ubicada en la salida o llegada de manera complementaria a la cámara rápida. Con esta cámara es posible medir los ángulos de salida o de llegada de los proyectiles.

Algunos ejemplos de las imágenes obtenidas y del análisis de la o las trayectorias (según si era de tipo única o triple) se presentan en la figura 2. Las trayectorias se obtuvieron con la función MTrackJ del programa de análisis de imágenes ImageJ.

En las dos campañas de experimentos no se presentó viento fuerte que afectara de manera importante las medidas. De acuerdo a los informes meteorológicos, la velocidad máxima reportada fue de 5 m/s, la cual es mucho menor que las velocidades de los proyectiles.

IV. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS PROYECTILES

Para calcular la energía normalizada de los proyectiles se necesita el área de impacto y la masa de los proyectiles. Como los proyectiles rotan, se consideran dos casos límite, tal como se describe en la figura 3. Si L es el largo del proyectil y D su diámetro, el área de impacto frontal es $A_{\text{frontal}} = \pi D^2/4$ y el área de impacto lateral es $A_{\text{lateral}} = LD$. Los largos y diámetros promedios de los proyectiles, junto con sus desviaciones estándares fueron entregados en el Informe Pericial Balístico N° 564/2020 de la Policía de Investigaciones de Chile. Los resultados se indican en el cuadro I.

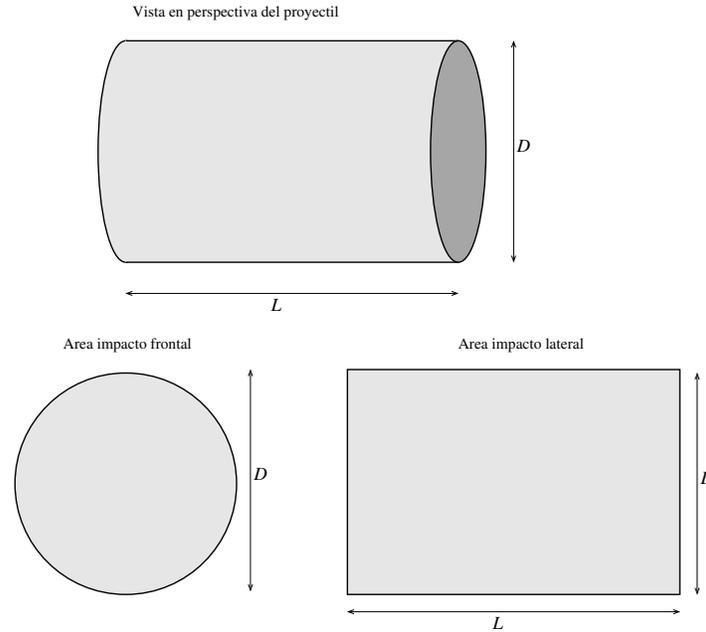


Figura 3. Áreas frontal y lateral de los proyectiles cilíndricos, usadas para calcular las energías normalizadas de impacto.

Tipo de proyectil	Largo L	Diámetro D	Área de impacto frontal A_{frontal}	Área de impacto lateral A_{lateral}	Masa mínima $M_{\text{mín}}$	Masa máxima $M_{\text{máx}}$
Condor triple (promedio)	0.0293 m	0.0358 m	0.00100 m ²	0.00105 m ²	0.0184 kg	0.0381 kg
(desviación estándar)	0.0004 m	0.0000 m	0.00000 m ²	0.00001 m ²	0.0015 kg	0.0013 kg
Condor único (promedio)	0.0968 m	0.0349 m	0.00096 m ²	0.00338 m ²	0.0478 kg	0.1081 kg
(desviación estándar)	0.0005 m	0.0000 m	0.00000 m ²	0.00002 m ²	0.0007 kg	0.0002 kg
ALS único (promedio)	0.0882 m	0.0354 m	0.00099 m ²	0.00312 m ²	0.0447 kg	0.1135 kg
(desviación estándar)	0.0005 m	0.0000 m	0.00000 m ²	0.00002 m ²	0.0067 kg	0.0024 kg

Cuadro I. Características geométricas y de masa de las lacrimógenas de tipo única y triple.

En el Informe Pericial Balístico referido más arriba, se reportan las masas de los proyectiles. Dos valores son entregados para cada tipo de proyectil, la masa mínima $M_{\text{mín}}$, que se obtiene cuando ya ha emitido todo el gas (lacrimógena completamente activada) y la masa máxima $M_{\text{máx}}$ antes de que emita el gas (lacrimógena sin activar) (ver cuadro I). En la sección VB se justifica que el valor que se debe usar para calcular la energía normalizada de impacto de los proyectiles a una distancia de 51 m es $M_{\text{máx}}$.

V. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DIRECTAS

A. Alcance de los proyectiles lanzados con distintos ángulos

El perito planimétrico midió los alcances para los tres tipos de proyectiles y diferentes ángulos de disparo. Los alcances promedios y sus desviaciones estándar se presentan en el cuadro II. Se puede apreciar que sólo para disparos

entre 0° y 10° para el caso de Condor triple y sólo para 0° en el caso de los proyectiles únicos el alcance es del orden de los 51 m. Para disparos con proyectiles Condor triple en 25° o más, el alcance es mucho mayor que los 51 m, siendo imposible que impacten a una persona a esa distancia pues pasan por una altura mucho mayor. En el caso de los proyectiles únicos, todos los disparos con inclinación de 10° o mayor resultan en alcances mucho mayores que 51 m, siendo nuevamente imposible que impacten a una persona a esa distancia pues, de nuevo, pasan por una altura mucho mayor.

Ángulo nominal de lanzamiento	0°	5°	10°	25°	45°
Alcance promedio (Condor triple)	54.8 m	62.6 m	70.5 m	103.5 m	107.2 m
Desviación estándar	5.0 m	8.9 m	11.9 m	9.5 m	17.8 m
Alcance promedio (Condor único)	59.7 m	84.2 m	100.3 m	149.0 m	169.3 m
Desviación estándar	8.1 m	12.4 m	5.1 m	5.5 m	12.9 m
Alcance promedio (ALS único)	47.4 m	85.1 m	108.2 m	142.5 m	142.0 m
Desviación estándar	4.0 m	8.3 m	14.0 m	6.0 m	9.3 m

Cuadro II. Alcances promedio y sus desviaciones estándar para los tres tipos de proyectiles y distintos ángulos de disparo.

B. Emanación del gas

Mediante los videos es posible determinar si los proyectiles ya emiten gases cuando eventualmente habrían impactado a la víctima. Dos casos son considerados. Para los disparos a 25° y 45° , los que chocan el suelo mucho más lejos que los 51 m, se observó usando la cámara Samsung que en todos los casos, independiente del tipo de proyectil, los proyectiles llegan al suelo emitiendo gases. Para los disparos a 0° , 5° y 10° , se usó las grabaciones de la cámara rápida ubicada a 51 m del disparo. Se encontró que el 88 % de los proyectiles Condor triple llegan emitiendo gases y que el 100 % de los proyectiles únicos llegan emitiendo gases.

Se midió además, el tiempo en que permanecen emitiendo gas los proyectiles, encontrando que para los tres tipos de proyectiles estos tiempos son del orden de los 20 segundos (22 s para Condor triple, 25 s para Condor único y 20 s para ALS único). Como este tiempo es mucho mayor que el tiempo de vuelo para recorrer los 51 m (del orden de 1 s), se puede concluir que al momento del impacto a esa distancia, los proyectiles conservan prácticamente toda su masa. De esta forma, para calcular la energía normalizada de impacto lo adecuado es tomar la masa $M_{\text{máx}}$, que corresponde a la lacrimógena sin activar (ver cuadro I).

C. Temperatura de los proyectiles

Las temperaturas de los proyectiles disminuyen rápidamente una vez que dejan de emitir gases. Un proyectil triple fue medido inmediatamente después de chocar y luego 10 segundos después, registrándose las temperaturas 200°C y 110°C , respectivamente. Esta disminución provoca un error experimental pues no todos los proyectiles fueron medidos inmediatamente al chocar con el suelo, y en algunos pasos pasaron algunos segundos. Con esta consideración, y usando solo las medidas realizadas mientras los proyectiles estaban emitiendo gases, las temperaturas medidas fueron $T_{\text{Condor triple}} = (218 \pm 26)^\circ\text{C}$ y $T_{\text{Condor unica}} = (151 \pm 7)^\circ\text{C}$.

D. Rotación de las lacrimógenas

De las trayectorias, se observa que para todos los tipos de proyectiles, éstos no viajan siempre de frente, sino que en general van rotando y cambiando de orientación (ver figura 4). De manera más cuantitativa, se analizan con detalle los videos grabados a la salida y a la llegada para determinar la fracción de los casos en que rota y medir la velocidad de rotación. A la salida, se detecta que rota el 66 % de los proyectiles Condor (triples y únicos) y 33 % de los proyectiles ATS. A la llegada, a 51 m de distancia, el 100 % de los proyectiles llegan rotando.

Para los casos en que los proyectiles rotan, se midió cuánto tardan en dar una vuelta. Los proyectiles Condor triples dan una vuelta cada (1.4 ± 0.2) m y los proyectiles únicos de ambos modelos dan una vuelta cada (12 ± 6) m. Estas distancias son bastante menores que los 51 m, de manera que los proyectiles han dado varias vueltas antes de impactar por lo que no es posible determinar en qué orientación van a impactar a una víctima ubicada a esa distancia.

E. Resultados de salida de lacrimógenas desde la escopeta

Usando ambas cámaras se midieron las velocidades de disparo y su dispersión angular. Al respecto es importante destacar las siguientes observaciones

1. Existe una variabilidad en la velocidad de disparo, incluso para un mismo tipo proyectil, de manera que además de las velocidades medias, es relevante dar la desviación estándar de la misma. Los resultados son: $V_{\text{condor triple}} = (65.6 \pm 15.5) \text{ m/s}$, $V_{\text{condor único}} = (81.4 \pm 6.8) \text{ m/s}$, $V_{\text{ALS único}} = (74.2 \pm 5.8) \text{ m/s}$. Notamos que los proyectiles Condor triple son los que presentan mayor dispersión de velocidades; incluso, en algunas ocasiones se observó que los tres proyectiles de un mismo disparo pueden salir a velocidades notoriamente diferentes.
2. Aún cuando el tirador fijaba el ángulo de la escopeta usando un transportador que se adhería al cañón, al momento de disparar se desviaba del ángulo nominal. Esta desviación era de unos pocos grados presentando las siguientes tendencias:
 - En promedio la desviación es positiva, es decir, tendía a subir el cañón.
 - La mayor desviación promedio ocurre para disparos a 0° , en cuyo caso en promedio es de 1.3° .
 - La mayor varianza de desviaciones ocurre para disparos a 45° , observándose que los disparos ocurren en el rango 42.2° – 49.4° .

F. Resultados de llegada de lacrimógenas a un blanco a 51 m de distancia

Apuntando la cámara rápida al blanco se midieron las alturas (desde el suelo) a las que pasan los proyectiles cuando llegan a un distancia de 51 m. En algunos casos, los proyectiles no fueron captados por la cámara pues pasan por encima de su campo visual. En esos casos, que rotularemos como “arriba de la cámara” en el cuadro III, se indica la cota que se obtiene para la altura de esos proyectiles.

Tipo de proyectil	Condor triple			Condor único			ALS único		
Ángulo nominal de lanzamiento	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°
Número de proyectiles medidos por la cámara	7	7	6	3	3	0	2	2	1
Altura promedio de proyectiles medidos por la cámara	1.2 m	3.2 m	3.4 m	1.5 m	4.2 m		1.0 m	1.9 m	7.0 m
Número de proyectiles “arriba de la cámara”	0	0	6	0	0	3	0	1	2
Cota de altura para proyectiles “arriba de la cámara”			> 5 m			> 5.5 m		> 5.8 m	> 5.5 m

Cuadro III. Detalles de los lanzamientos de lacrimógenas únicas y triples.

En los casos en que los proyectiles pasan por el campo visual de la cámara, se mide su velocidad. A partir de estas velocidades se calculan las energías. El cuadro IV indica los valores promedio y las desviaciones estándares de



Figura 4. Secuencia de imágenes cada 6.5 ms de proyectiles únicos que van rotando al viajar de izquierda a derecha. En el caso de la izquierda se ve, además, el chorro de gas que impulsa levemente al proyectil hacia arriba.

Tipo de proyectil	Condor triple			Condor único		ALS único	
	0°	5°	10°	0°	5°	0°	5°
Ángulo nominal de lanzamiento	0°	5°	10°	0°	5°	0°	5°
Velocidad promedio de impacto	33.3 m/s	32.5 m/s	25.5 m/s	44.7 m/s	49.8 m/s	52.0 m/s	45.2 m/s
Desviación estándar	2.6 m/s	4.3 m/s	2.0 m/s	8.5 m/s	5.0 m/s	1.6 m/s	
Energía cinética	21.3 J	20.4 J	12.5 J	111 J	135 J	154 J	120 J
Desviación estándar	3.5 J	5.2 J	2.0 J	41 J	27 J	9 J	
Energía normalizada (frontal)	21300 J/m ²	20500 J/m ²	12400 J/m ²	115000 J/m ²	141000 J/m ²	160000 J/m ²	121000 J/m ²
Desviación estándar	3400 J/m ²	3600 J/m ²	1900 J/m ²	42000 J/m ²	28000 J/m ²	10000 J/m ²	
Energía normalizada (lateral)	20200 J/m ²	19500 J/m ²	11800 J/m ²	32700 J/m ²	40000 J/m ²	49100 J/m ²	37200 J/m ²
Desviación estándar	3300 J/m ²	5000 J/m ²	1800 J/m ²	12000 J/m ²	7900 J/m ²	3100 J/m ²	

Cuadro IV. Medidas de velocidad, energía cinética y energías normalizadas promedio con sus desviaciones estándar, para los diferentes tipos de lacrimógenas únicas y triples, y los tres ángulos utilizados.

las velocidades, energías cinéticas y energías normalizadas. El caso del proyectil ALS a 10° que sí fue medido por la cámara no se considera pues la altura a la que pasa (7 m) es mucho mayor que la de una persona.

Las energías cinéticas al impactar de los proyectiles únicos son notoriamente mayores que las de los proyectiles triples. Esto se debe a que llegan con mayor velocidad y tienen una masa mayor. En el caso de los proyectiles únicos, hay una diferencia apreciable en las áreas entre las dos posibles formas de impactar, resultando en una mayor energía normalizada si el impacto es frontal (caso de menor área).

VI. RESULTADOS INFERIDOS

Además de las medidas directas, presentadas en la sección anterior, es posible inferir otros resultados usando un modelo físico de movimiento de proyectiles. Este modelo depende de un único parámetro desconocido, el coeficiente de roce turbulento con el aire $C^{(2)}$. Si bien hay valores medidos de este coeficiente para proyectiles de distinta forma, el hecho que los proyectiles que consideramos vayan rotando implica que el roce que experimentan va variando en el tiempo y lo que corresponde entonces es encontrar un roce promedio. Además, desde el momento que los proyectiles empiezan a soltar el gas lacrimógeno, éste juega el rol de un chorro que puede empujar al proyectil en direcciones que son variables debido a la rotación ya referida (ver figura 4). Este efecto es pequeño, pero no puede ser despreciado completamente y se incorpora en el modelo como un coeficiente de roce efectivo, el que debe ser medido. Para esto, se aprovechó que se midió de manera simultánea, para muchos proyectiles, la velocidad y ángulo de disparo, la velocidad, ángulo y altura a la que pasaban sobre el blanco ubicado a 51 m y el alcance total de los proyectiles. Estos datos son suficientes para restringir con bastante precisión el coeficiente de roce turbulento para cada uno de los proyectiles: $C_{\text{condor triple}} = (0.0182 \pm 0.0073) \text{ m}^{-1}$, $C_{\text{condor único}} = (0.0100 \pm 0.0053) \text{ m}^{-1}$ y $C_{\text{ALS único}} = (0.0118 \pm 0.0036) \text{ m}^{-1}$. Notamos que los proyectiles únicos, por el hecho de tener mayor masa experimentan menos roce que los proyectiles triples. Por último, en todos los casos, hay una variabilidad, debido principalmente al efecto de la rotación y la emisión de gases.

Teniendo los rangos de las velocidades de salida, de dispersión angular y de coeficientes de roce, es posible hacer simulaciones computacionales donde se simula el lanzamiento de miles de proyectiles tomando todos los posibles valores de velocidad, ángulo y coeficiente de roce dentro de sus rangos. Con estos lanzamientos simulados se puede calcular la probabilidad de que el proyectil impacte a una persona que está ubicada a una distancia determinada. En este caso, se tomó la referencia de 51 m.

Las figuras 5, 6 y 7 presentan la distribuciones de altura a la que pasa el proyectil a los 51 m para los tres tipos de proyectil y distintos ángulos nominales de tiro (0°, 5°, 10°, 25° y 45°). Se indica la altura promedio a la que pasan y el rango de alturas que incluye el 95% de los disparos. Se muestra también el porcentaje de los disparos que pasa entre 1 y 2 metros de altura, es decir que podrían haber impactado a una persona. Para todos los proyectiles, resulta muy improbable que impacten a una persona entre a una altura entre 1 y 2 metros si son disparados a 25° y 45° (probabilidades menores que 0.6% para Condor triple e imposible para los proyectiles únicos). Incluso para proyectiles únicos es muy poco probable (menor que 0.6%) que un proyectil único impacte si es disparado a 10°. Las probabilidades de impacto se vuelven apreciables sólo si se dispara entre 0° y 10° para el caso de proyectiles Condor triples, y entre 0° y 5° si se usan proyectiles únicos (Condor y ALS). Estos resultados son consistentes con los alcances reportados en el cuadro II.

⁽²⁾ Este coeficiente está definido tal que la fuerza de roce sea $F = CMV^2$

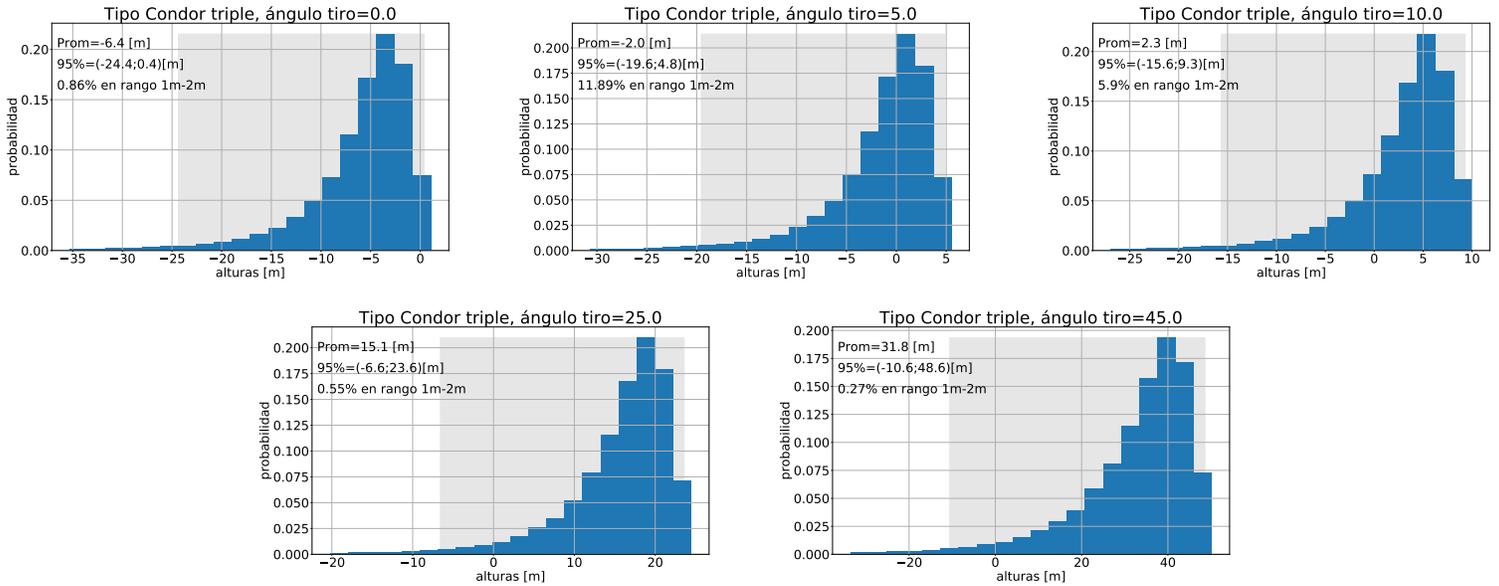


Figura 5. Distribuciones de alturas a la que pasa el proyectil a los 51 m para proyectiles Condor triple y distintos ángulo nominal de tiro. En cada panel se indica además el valor promedio de la altura, el rango de alturas que concentra el 95 % de los casos (también indicado con una banda gris) y el porcentaje de los disparos que pasa entre 1 y 2 m de altura. Las alturas negativas se deben interpretar como que el proyectil impactó el suelo antes de los 51 m.

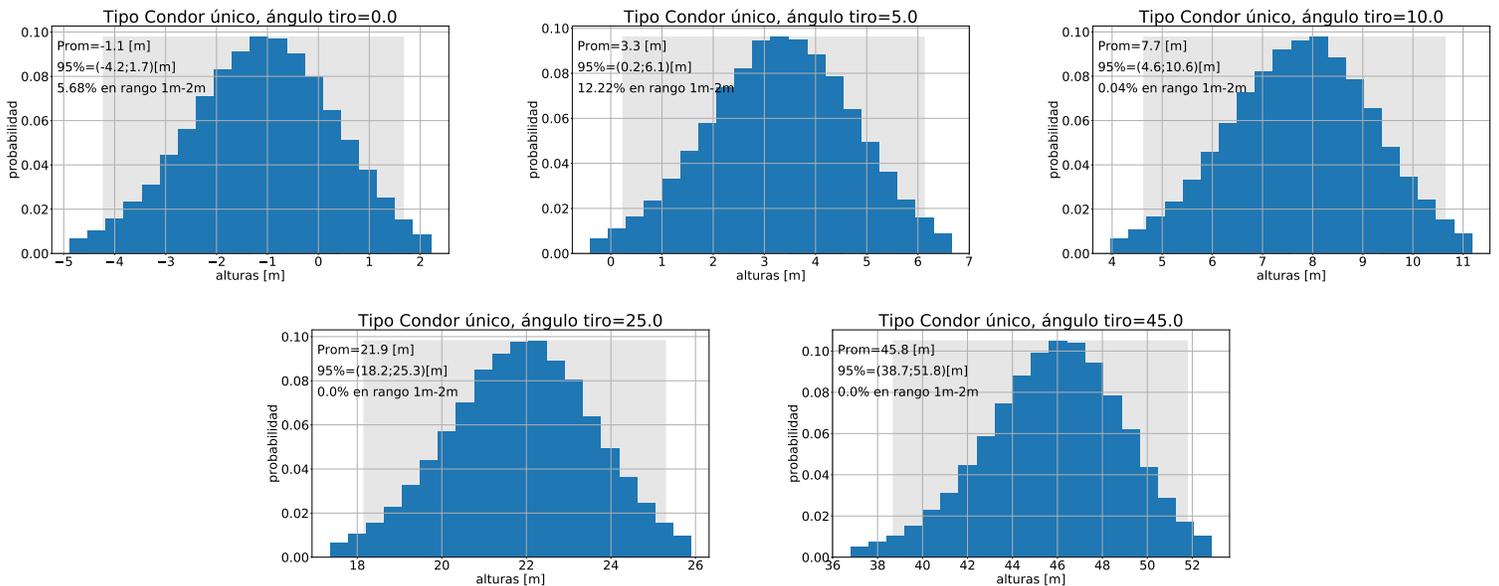


Figura 6. Igual a figura 5 para el caso de proyectiles Condor único.

Para los casos en que los proyectiles pasan entre 1 y 2 metros de altura, se calcula la energía normalizada de impacto. Se usan las dos posibles geometrías de impacto, frontal y lateral. Los resultados se presentan en las figuras 8, 9 y 10. Se indica la energía normalizada promedio y el rango que incluye el 95 % de los disparos. Se muestra también el porcentaje de los disparos que, habiendo pasado entre 1 y 2 metros de altura, tiene una energía normalizada mayor que 30000 J/m^2 y 45000 J/m^2 , es decir que de acuerdo a la literatura tienen una alta probabilidad de provocar rotura ocular [3, 4]. Para proyectiles Condor triple lanzados a 0° , la figura 8 pareciera indicar que existe una alta probabilidad que los proyectiles lleguen con energías normalizadas mayores que 30000 J/m^2 (85 %) siendo, además, muy diferente de los resultados que se obtienen para 5° (misma figura). Para entender esto cabalmente, dicha figura debe ser leída en conjunto con la figura 5. Ahí se indica que la mayoría de los proyectiles cae al suelo antes de llegar a los 51 m

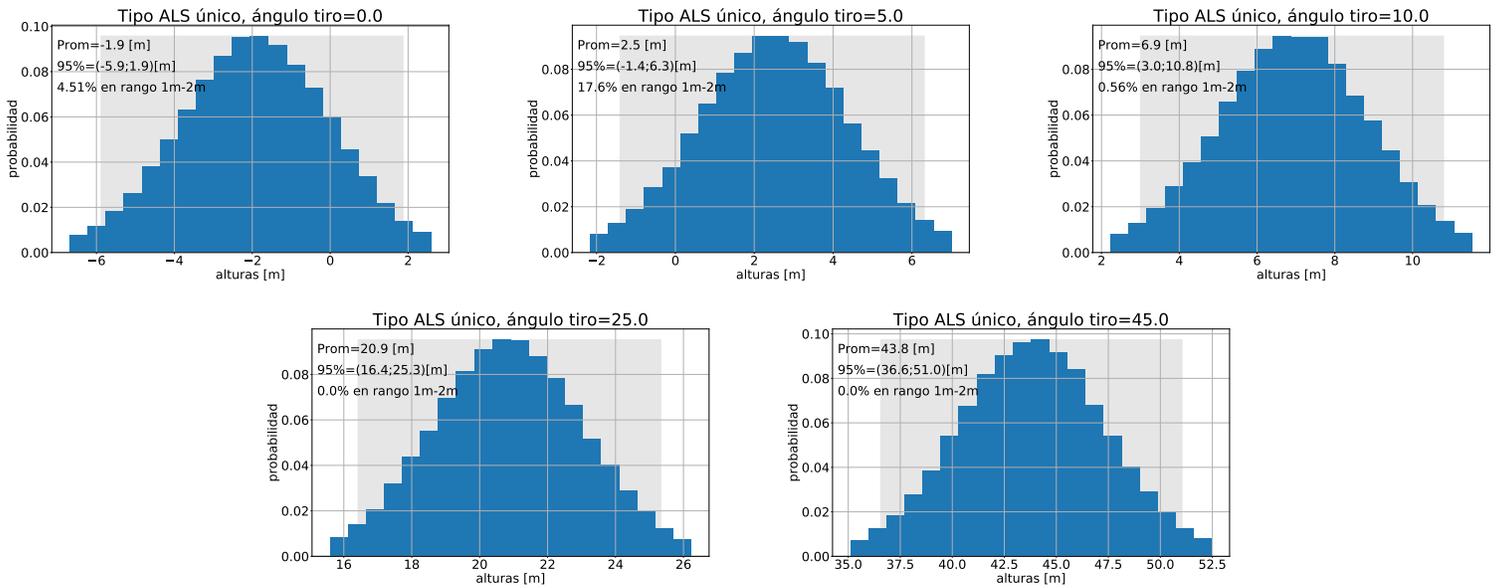


Figura 7. Igual a figura 5 para el caso de proyectiles ALS único.

y que sólo 0.86 % de los disparos llegan entre 1 y 2 metros. Estos son justo los poquísimos casos en la simulación en que la velocidad de disparo fue alta y el roce fue bajo, por ejemplo, porque el chorro empujaba un poco. Es este subconjunto pequeño el que es analizado en la figura 8. Del total, solo el 85 % de los 0.86 % de los disparos, es decir el 0.73 % de los disparos llegan entre 1 y 2 metros con energías normalizadas mayores que 30000 J/m^2 . Considerando que para proyectiles Condor triple el área lateral y frontal son similares, lo que entrega energías normalizadas similares, ambas geometrías de choques pueden promediar, entregando los siguientes resultados: el porcentaje de disparos que simultáneamente son capaces de llegar entre 1 y 2 metros con energías normalizadas mayores que 30000 J/m^2 es de 0.73 % a 0° , 2.1 % a 5° y despreciable para 10° o más. Los proyectiles únicos (de ambas marcas) tienen energías normalizadas mayores. Para los disparos a 0° y 5° , para los cuales había una probabilidad apreciable de impactar entre 1 y 2 metros, existe una alta probabilidad de llegar con altas energías al impacto (mayores que 30000 J/m^2 o 45000 J/m^2). Se destaca el caso de Condor único, disparado a 0° , en cuyo caso el 99.95 % de los impactos tiene energía mayor que 45000 J/m^2 . La probabilidad de tener altas energías es mayor para Condor debido a las mayores velocidades con que son disparados estos proyectiles.

A partir de la energía normalizada de cada disparo simulado y de los resultados de la literatura sobre rotura ocular [3, 4], se puede calcular la probabilidad que genere ruptura ocular. El protocolo consiste en tomar todos los disparos simulados, si pasan entre 1 m y 2 m de altura se les calcula la energía normalizada. Luego, usando la probabilidad de rotura dada por la figura 1, se calcula la probabilidad para cada disparo. Finalmente se toman todos estos disparos y se calcula la probabilidad promedio de provocar rotura ocular dado el tipo de proyectil y ángulo de tiro. Un ejemplo de este cálculo se presenta en el cuadro V. De manera consistente con los resultados previos, se obtiene que los proyectiles Condor triple tienen bajas probabilidades de provocar rotura ocular, mientras que los proyectiles únicos tienen una alta probabilidad. Como los casos relevantes ocurren para ángulos pequeños, se hace el mismo procedimiento en detalle para ángulos de disparo entre 0° y 8° , los que se presentan en la figura 11. La mayor probabilidad de generar daño estaría para disparos entre 2° y 4° , siendo poco probable para proyectiles Condor triple y mucho más probable para disparos con proyectil único (especialmente Condor).

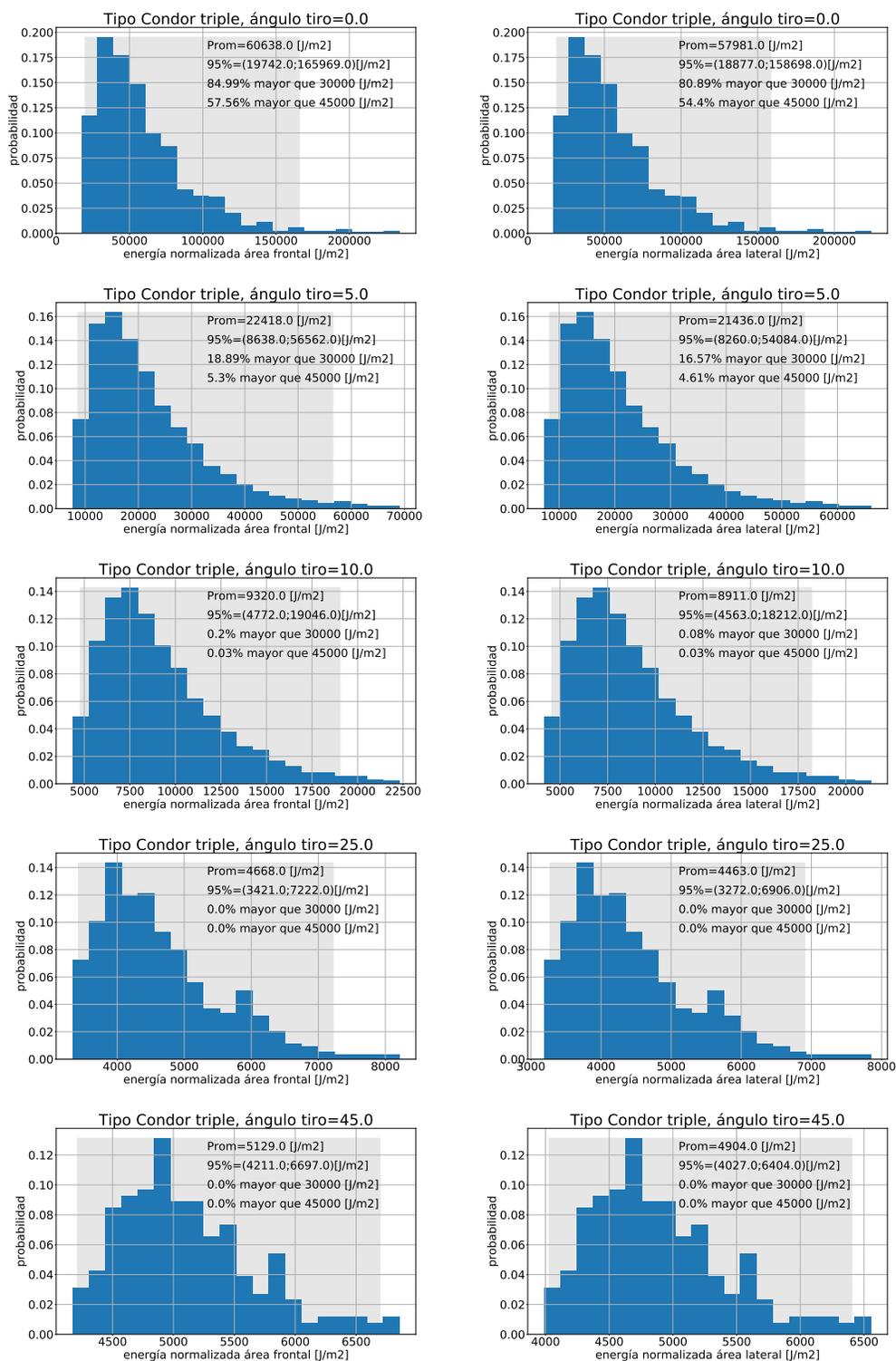


Figura 8. Distribuciones de energías normalizadas de proyectiles Condor triple que a los 51 m pasan entre 1 y 2 metros de altura. Izquierda: caso de impacto frontal. Derecha: caso de impacto lateral. Las filas corresponden a distintos ángulos de ángulo nominal de tiro. En cada panel se indica además el valor promedio, el rango que concentra el 95% de los casos (también indicado con una banda gris) y el porcentaje de los impactos con energía normalizada mayores que 30000 J/m² y 45000 J/m².

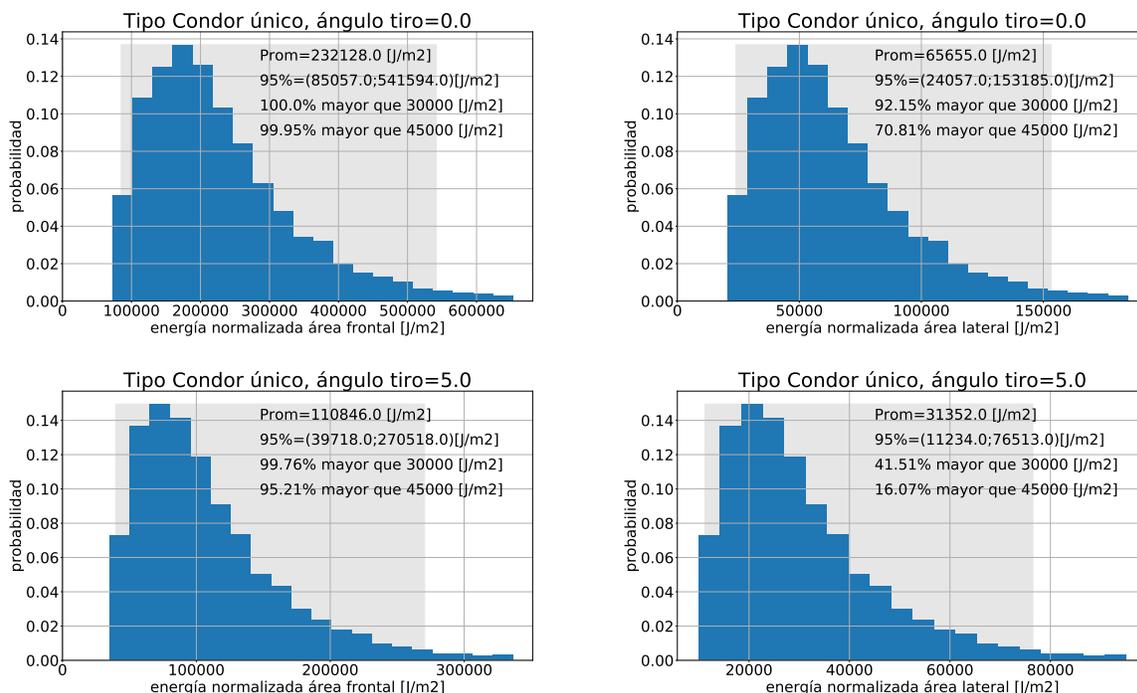


Figura 9. Igual a figura 8 para el caso de proyectiles Condor único.

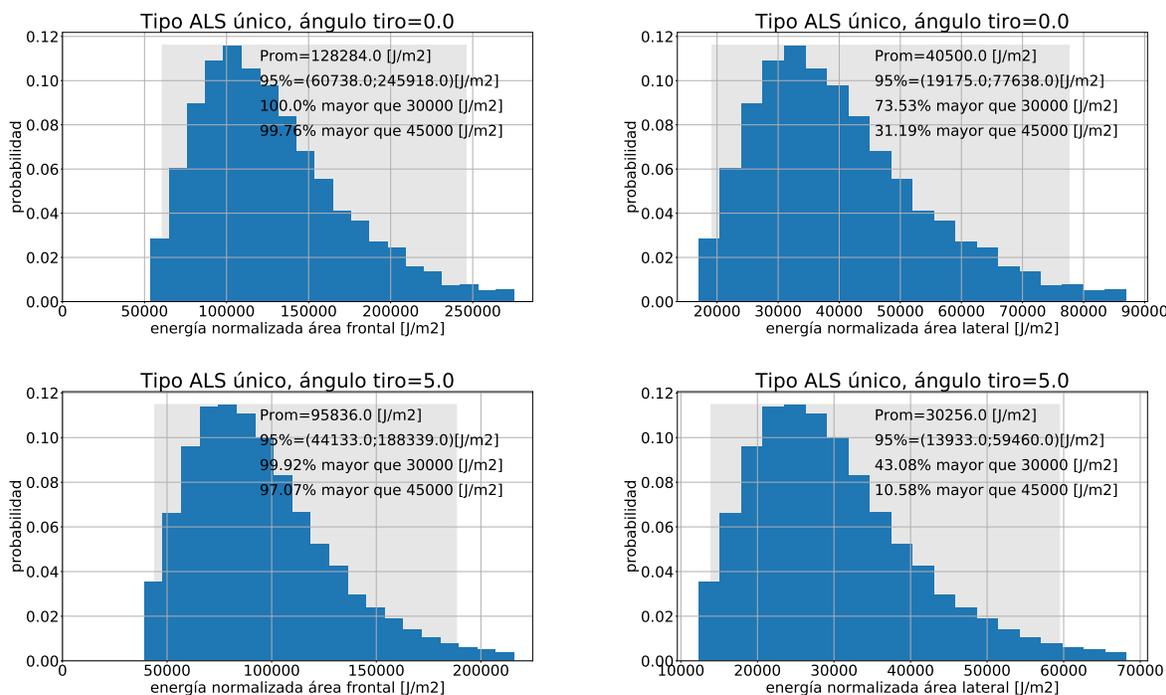


Figura 10. Igual a figura 8 para el caso de proyectiles ALS único.

Tipo de proyectil	Condor triple			Condor único		ALS único	
Ángulo nominal de lanzamiento	0°	5°	10°	0°	5°	0°	5°
Porcentaje de impactos entre 1 y 2 m	0.86 %	11.89 %	5.9 %	5.68 %	12.22 %	4.51 %	17.6 %
Porcentaje de disparos que impactan entre 1 y 2 m y generan rotura (choque frontal)	0.68 %	1.63 %	0.00 %	5.57 %	12.10 %	4.50 %	17.43 %
Porcentaje de disparos que impactan entre 1 y 2 m y generan rotura (choque lateral)	0.65 %	1.45 %	0.00 %	4.65 %	3.84 %	2.57 %	5.29 %

Cuadro V. Porcentaje de disparos que a los 51 m de distancia pasan a una altura entre 1 y 2 metros y porcentaje de disparos que pasan a una altura entre 1 y 2 metros que pueden provocar ruptura ocular de acuerdo a la literatura. Se presentan resultados para los diferentes tipos de proyectil y ángulo de tiro, considerando las dos geometrías de impacto: frontal y lateral.

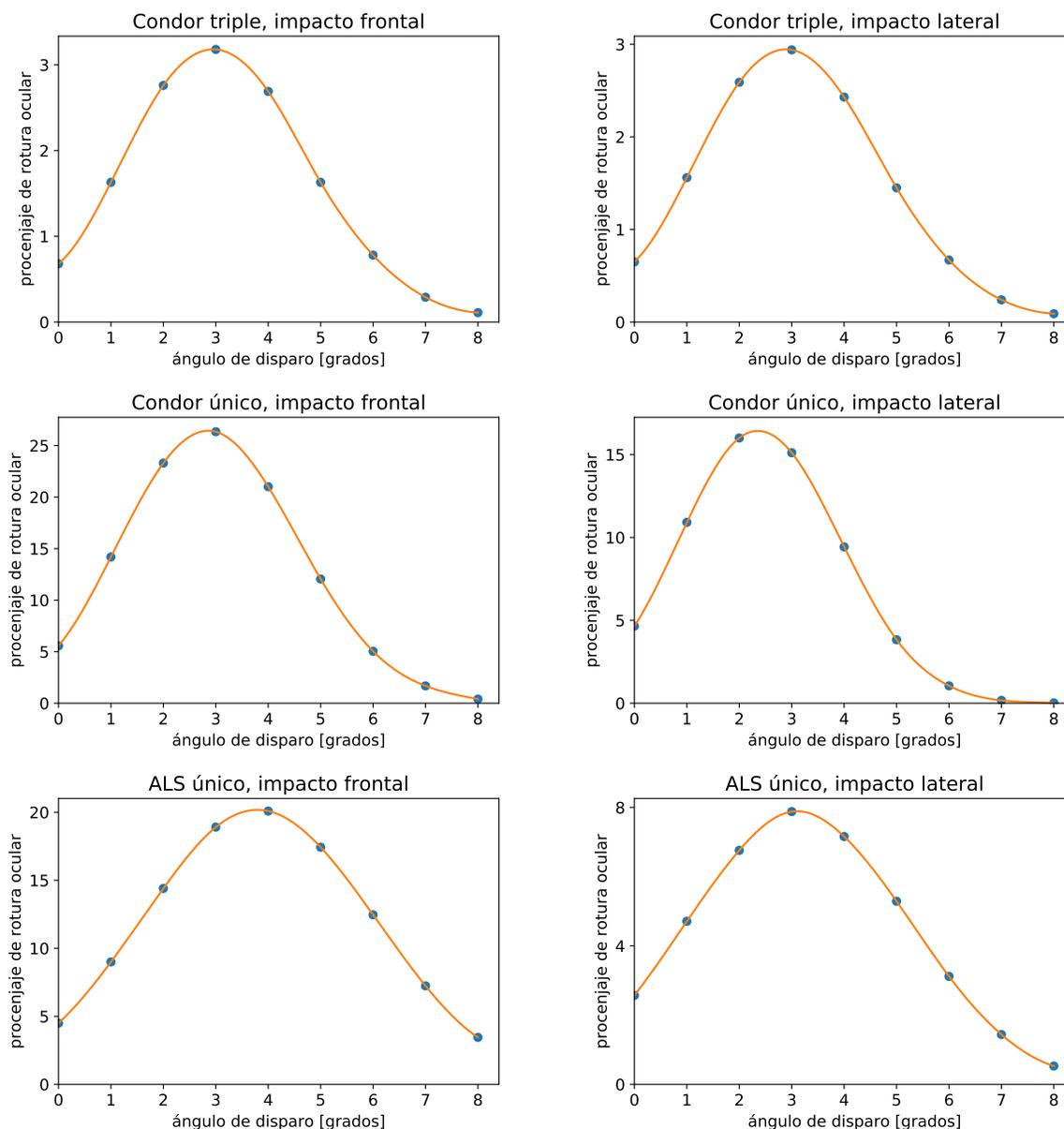


Figura 11. Porcentaje de disparos que a los 51 m de distancia pasan a una altura entre 1 y 2 metros que pueden provocar ruptura ocular de acuerdo a la literatura en función del ángulo de disparo. Se presentan resultados para los diferentes tipos de proyectil, considerando las dos geometrías de impacto: frontal y lateral.

VII. CONCLUSIONES

Las mediciones directas y los resultados inferidos muestran que:

- Para todos los proyectiles, resulta muy improbable que impacten a una persona entre a una altura entre 1 y 2 metros si son disparados a 25° y 45° , pues pasan muy por encima de una persona ubicada a 51 m de distancia (figuras 5, 6 y 7). Las probabilidades de impacto se vuelven apreciables sólo si se dispara entre 0° y 10° para el caso de proyectiles Condor triples, y entre 0° y 5° si se usan proyectiles únicos (Condor y ALS).
- Para los proyectiles Condor triple, el porcentaje de disparos que simultáneamente son capaces de llegar entre 1 y 2 metros con energías normalizadas grandes (suficientes para generar rotura ocular de acuerdo a la literatura) es muy bajo: 0.7 % a 0° , 3.0 % a 3° , 1.6 % a 5° , y despreciable para 10° o más (ver cuadro V y figura 11).
- En el caso de proyectiles únicos (Condor o ALS) lanzados con un ángulo en el rango de 0° a 5° , en los casos de impacto, la energía normalizada es grande. Si el choque es frontal, más del 95 % de los impactos tienen energías superiores a los 45000 J y podrían provocar rotura ocular de acuerdo a la literatura. Si el choque es lateral, las energías son menores debido al mayor área y los resultados dependen más del ángulo de tiro y el tipo de proyectil, variando entre 10 % y 79 % de los impactos que tienen energías superiores a los 45000 J (ver figuras 9 y 10).

-
- [1] Rohini J Haar, Vincent Iacopino, Nikhil Ranadive, Madhavi Dandu, Sheri D Weiser, “Death, injury and disability from kinetic impact projectiles in crowd-control settings: a systematic review”, *BMJ Open* Vol. 7, e018154 (2017). doi: 10.1136/bmjopen-2017-018154
 - [2] Stefan M. Duma, Tracy P. Ng, Eric A. Kennedy, Joel D. Stitzel, Ian P. Herring, Ferenc Kuhn, “Determination of Significant Parameters for Eye Injury Risk from Projectiles”, *The Journal of Trauma Injury, Infection, and Critical Care*, Vol. 59, pp. 960-964 (2005).
 - [3] E.A. Kennedy, T.P. Ng, C. McNally, J.D. Stitzel, S.M. Duma, “Risk functions for human and porcine eye rupture based on projectile characteristics of blunt objects”, *Stapp Car Crash Journal*, Vol. 50, pp. 651-671 (2006).
 - [4] Vanessa Alphonse and Andrew Kemper, “Literature Review of Eye Injuries and Eye Injury Risk from Blunt Objects”, *Brain Injuries and Biomechanics Symposium*, Washington DC, April 3, 2013 (<http://hdl.handle.net/10919/23814>).
 - [5] Joseph Cormier, Sarah Manoogian, Jill Bisplinghoff, Steve Rowson, Anthony Santago, Craig McNally, Stefan Duma, John Bolte IV, “The Tolerance of the Nasal Bone to Blunt Impact”, *Ann. Adv. Automot. Med.* Vol. 54, 3–14 (2010).