

Videoanálisis y técnica Monte Carlo para calcular la cota máxima de la fuerza de una patada

Video-analysis and Monte Carlo technique to calculate the maximum force of a kick

Dr. Vicente Torres-Zúñiga¹✉

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Medicina, Licenciatura en Ciencia Forense.

RESUMEN

En este estudio, se analizó la videograbación casual de un testigo, donde un luchador profesional patea a un adversario y, complementando con información pública, se estimó la fuerza de las piernas al dar el golpe. Sin embargo, siendo los datos obtenidos de una fuente secundaria, las ecuaciones deterministas por sí solas son inadecuadas para calcular la incertidumbre asociada, por lo que se utilizó un proceso de cálculo aleatorio. Programando las peores condiciones tolerables, se obtuvo una gran coherencia (es decir, correlación: $R^2 = 0.991$, y una diferencia de error de 10 %) entre la simulación numérica y un modelo estadístico y además se determinó la fuerza promedio de las piernas y su desviación estándar: 98 ± 27 N (error porcentual: 28 %), de modo que la fuerza máxima de las piernas (y de baja probabilidad) es de $3\sigma = 182$ N. Así, considerando la masa neta, la fuerza máxima del movimiento es 758 N. Esta información se contrastó, sin contradicción, con la literatura sobre deportes de contacto. Se muestra a detalle que una adecuada acotación de números aleatorios en una ecuación determinística permite enmendar la falta de información en casos videograbados, de modo que se puede optimizar la estimación del intervalo de incertidumbre cuando los datos de medición son poco confiables.

PALABRAS CLAVE: ciencia forense; golpe; método Monte Carlo; videoanálisis.

ABSTRACT

In this study, a casual video recording of a witness, where a professional wrestler kicks an opponent, was analyzed and supplemented with public information, the strength of the legs when striking was estimated. However, being the data obtained from a secondary source, the deterministic equations by themselves are inadequate to calculate the associated uncertainty, so it was used a random calculation process. Programming the worst tolerable conditions, an excellent coherence (i.e., correlation: $R^2 = 0.991$ and an error difference of 10%) between the numerical simulation and a statistical model were obtained. Also, the average strength of the legs and its standard deviation: 98 ± 27 N (percentage error: 28%) was determined. So the maximum force of the legs (and of low probability) is $3\sigma = 182$ N. Thus, considering the net mass, the maximum force of the movement is 758 N. This information was contrasted, without contradiction, with the literature on contact sports. It is shown in detail that an adequate dimensioning of random numbers in a deterministic equation makes it possible to correct the lack of information in videotaped cases; so that the estimation of the uncertainty interval can be optimized when the measurement data is unreliable.

KEYWORDS: forensic science; wrestling; Monte Carlo method; video analysis.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Vicente Torres Zúñiga.

INSTITUCIÓN: Facultad de Medicina, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, C. P. 04510, Ciudad de México.

CORREO ELECTRÓNICO: vicentz@gmail.com

Fecha de recepción: 8 de abril de 2022. **Fecha de aceptación:** 17 de junio de 2022. **Fecha de publicación:** xx de junio de 2022.



I. INTRODUCCIÓN

La tendencia es clara: cada día se tiene más acceso a grabaciones captadas por testigos casuales, es decir, filmes que no son producto de un experimento o una acción controlada en un laboratorio. Muchos de esos vídeos despiertan preguntas del ámbito de la física, por lo cual son adecuados para presentarse a los alumnos. En la literatura especializada hay ejemplos notables de la utilización de vídeos casuales para desarrollar un tema de física [1], [2], [3]. Con todo, apenas se ha explorado las ventajas que presentan estos vídeos en la didáctica de la física, pues permiten construir puentes entre los conceptos teóricos, las habilidades de investigación y casos reales de interés para los estudiantes. Uno de los problemas que ha limitado su uso en las aulas es que estas películas son el producto de una fuente secundaria, por lo que se carece de información primaria y trascendental para realizar una medición, p. ej. datos relacionados con testigos métricos, velocidad entre fotogramas, masas de los objetos en la película y otros valores deben ser recabados a través de otros medios, de modo que, en general, el resultado se circunscribe en una estimación con alta incertidumbre.

Así, estos vídeos son adecuados para realizar análisis Monte Carlo, pues ante la falta de certeza, la valoración probabilística de escenarios es propicia para alcanzar conclusiones. Por lo general, los planes de estudio de física, ingeniería y química tratan el tema Monte Carlo para resolver problemas relacionados con la interacción materia-radiación [4]. Sin embargo, aquí se plantea que también pueden ser útiles para el desarrollo de un tema de mecánica clásica.

En particular, en este estudio se analizó un vídeo casual y el método Monte Carlo para obtener la máxima fuerza de un luchador profesional al ejecutar una patada. Los deportes de contacto son un tópico recurrente y atractivo para consolidar conocimientos de física mecánica y ciencias de la salud [5], [6], [7]. Sin embargo, poco se ha publicado sobre el desempeño en los movimientos de los luchadores profesionales, pese a su gran popularidad internacional en especial en México, Japón y los Estados Unidos [8]. Finalmente, el vídeo analizado cuenta con una componente de polémica, pues se observa que la patada se ejecutó sobre un luchador que al poco tiempo pierde el conocimiento y luego la vida. De este modo, hasta donde se sabe, este es el primer reporte de un análisis de la fuerza asociada a una patada entre luchadores, en condiciones fuera del laboratorio, combinando el es-

tudio de imágenes y método Monte Carlo, todo asistido por herramientas de software libre.

La organización del artículo es la siguiente: primero se trata un poco sobre la aplicación del concepto de incertidumbre en investigaciones forenses; después se describen las características y fuente del objeto de estudio (el vídeo); luego se detalla cómo se analizaron las imágenes; a continuación se plantea el contexto físico-matemático para obtener la medida y su incertidumbre asociada por cálculo diferencial. También se muestra cómo implantar la técnica Monte Carlo, presentando la validez del modelo estadístico y su implicación en el significado de la medida (detallando los alcances de las técnicas utilizadas); a continuación se presenta una interpretación de tal medición al compararla con la fuerza asociada a patadas en otro deporte de contacto y, finalmente, se exponen las conclusiones y prospectiva de este trabajo.

II. METODOLOGÍA

A. IMPORTANCIA DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN LA CIENCIA FORENSE

Una reconstrucción forense verosímil requiere la articulación de argumentos científicos, donde se muestra la causalidad de los sucesos. Pero la conclusión final siempre estará limitada por un error de cierta magnitud, que es robustecido por las suposiciones, alcances de los instrumentos de medición y las técnicas empleadas en los análisis. Es decir, se obtiene la incertidumbre final de la propagación de errores. Hoy en día, este tópico es objeto de mucha atención entre los profesionales de la ciencia aplicada en los tribunales [9].

En aquellas periciales donde se utilizan o determinan parámetros físicos, tales como fuerza, velocidad, o distancia, suele obtenerse la incertidumbre por medio de técnicas de cálculo diferencial [10]. Tal proceder supone una confianza en los datos medios, que implica el control en la variabilidad de los parámetros, o sea, disminución de la contribución aleatoria [10]. Sin embargo, por las características del objeto de estudio forense esta situación es difícil de obtener: la variabilidad, la ausencia o la degradación de la fuente de los datos es frecuente, dificultando conseguir medidas asociadas a cotas factibles.

Cuando la incertidumbre es obtenida únicamente por medios deterministas (p. ej., cálculo diferencial), se espera que los datos de entrada sean confiables y no especu-

laciones. En este caso, la distribución de la incertidumbre es constante, es decir, todos los valores contenidos entre los extremos de la incertidumbre cuentan con la misma probabilidad de suceder. Para su valoración, en general solo es suficiente conocer la incertidumbre relativa: incertidumbre dividida entre el valor de la medición.

Sin embargo, cuando uno o varios datos de entrada son conjeturas, se requiere establecer un intervalo lógico y utilizar la mejor información documentada. Entonces, la combinación de casos mostrará respuestas más frecuentes que otras, a las que se asocian mayor verosimilitud y probabilidad de suceder. Las respuestas menos frecuentes serán posibles, pero con baja probabilidad de suceder. De acuerdo con el teorema del límite central, esta función de distribución se aproximará a la distribución normal, la cual permite valorar la relación entre una medición y un intervalo de probabilidad de la incertidumbre asociada. Esa es la esencia y utilidad del método Monte Carlo en la ciencia forense.

Esta contribución se apoya en una técnica Monte Carlo para encontrar la cota máxima de la fuerza neta de las piernas cuando un luchador profesional patea a su rival, quien después de unos minutos de caer sobre las cuerdas, fallece a causa de una lesión cervical [11], [12]. Este caso forense atrajo la atención de los medios de comunicación y redes sociales, surgiendo preguntas sobre la intensidad con la que estos deportistas se golpean y sufren lesiones. Este es un tema biomecánico poco estudiado, pese a la importancia cultural que muestra la lucha libre en México y otros países [8]. Mediante un teléfono celular, un aficionado fijó el momento de la patada, por lo que un videoanálisis permitió obtener una medida preliminar de la fuerza del golpe y el método Monte Carlo contribuyó para conseguir la cota máxima posible.

B. EL VIDEO Y SU ANÁLISIS

La noche del 21 de marzo de 2015, en el Auditorio Municipal de Tijuana, México, el luchador llamado *Rey Misterio* realizó un movimiento habitual de este deporte-espectáculo, conocido como “patada de canguro”, consistente en un salto de frente y que conecta las piernas sobre su rival en turno, en este caso Pedro Aguayo Ramírez, llamado el *Hijo del Perro Aguayo* [12]. Al ser impactado cayó sobre las cuerdas, al poco tiempo perdió la vida como resultado de una lesión cervical. Aunque *Rey Misterio* fue liberado de cargos, el deportista fue vituperado en los medios públicos [12]. Un aficionado

videograbó frontalmente el encuentro y lo instaló en el sitio YouTube (Figura 1) [13]. La información de tales imágenes es el objeto de estudio de este artículo. La videograbación es adecuada para realizar un proceso y así obtener la fuerza del golpe. Los pies impactados sobre el hombro producen una traslación pequeña y casi paralela al plano de la escena. Sin embargo, en las imágenes se requiere establecer testigos métricos y correcciones por el movimiento de la cámara.



Figura 1. Fotograma del momento donde el luchador profesional *Rey Misterio* conecta una “patada de canguro” a su rival el *Hijo del Perro Aguayo*. Fuente: video público en la plataforma YouTube.

Así, con el propósito de iniciar el estudio de la escena, se descargó el video a una computadora personal. Para analizar el filme se utilizó el programa de distribución libre Tracker-physics, el cual es multiplataforma, lo que implica que se puede ejecutar desde cualquier sistema operativo [14]. En otras publicaciones se ha utilizado este software por su conveniencia pedagógica y utilización en al área de la física forense. Después de abrir la película en el programa Tracker, se realizaron las siguientes acciones.

1) Preselección de los fotogramas relevantes. El video tiene una duración de 14:13 minutos, por lo que se realizó una selección preliminar de los cuadros de interés, antes de que *Rey* iniciara el salto y un poco después de que *Aguayo* se encontrara en las cuerdas. Se seleccionaron entre los fotogramas marcados como 11 431 a 11 561, que representan 130 imágenes en un tiempo de 5 s.

2) Instalación del eje coordinado. El salto completo de *Rey Misterio* es casi paralelo al plano de la cámara, por lo que se instaló el eje coordinado de modo que coincidiera con el plano que describe el salto, con origen sobre la lona del cuadrilátero y del lado derecho de la escena, donde la horizontal (eje-x) es paralela a la cuerda intermedia del cuadrilátero, de modo que se asegura la orientación correcta del sistema (Figura 2).

3) Colocación del testigo métrico. Por reglamento, la distancia entre las cuerdas opuestas al cuadrilátero es de 6 m [15]. Este fue el testigo métrico y se colocó al nivel de los hombros de ambos luchadores; situarlo en una posición delantera o posterior conduciría a un error de perspectiva. A modo de comprobación de la conveniencia de la posición y dimensión del testigo, como se muestra en la Figura 2, se midió la estatura de *Rey Misterio* (quien se encontraba en posición erguida) obteniendo un valor de 1.67 m (99 % de su estatura reportada por la WWE, una compañía de lucha libre profesional donde ha trabajado el luchador) [16].

4) Corrección del movimiento de la cámara. Se utilizaron puntos de calibración para corregir las rotaciones y traslaciones de las imágenes en el plano de la escena. Aunque son imperceptibles los efectos de acercamiento/alejamiento, este proceder también permite su corrección. Los puntos de calibración consisten en señalar dos puntos físicamente fijos que se presenten en las imágenes y las coordenadas relativas entre ellos posibilitan rectificar la posición del eje coordenado y el testigo métrico. Aquí, los puntos seleccionados fueron: A) la intersección visual entre el esquinero de la tercera cuerda y el poste superior derecho y B) la esquina donde se intersecan las líneas del poste inferior y la reja de contención a la derecha de la imagen (Figura 2).

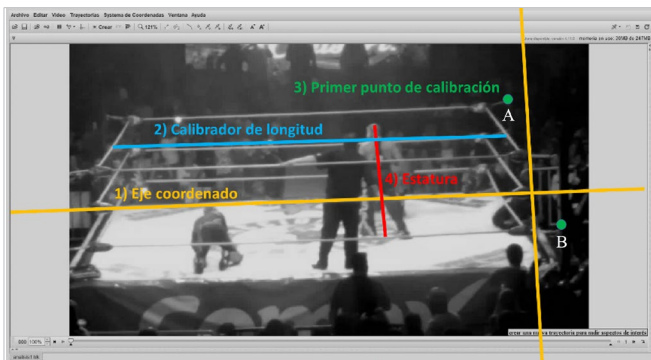


Figura 2. Captura de pantalla del vídeo estudiado en el programa Tracker. Se marcó con colores: 1) el eje coordenado, 2) el calibrador de longitud, 3) el primer y segundo punto de calibración y 4) la estatura del luchador *Rey Misterio*.

5) Demarcación de la distancia y tiempo de contacto. Utilizando la herramienta de *zoom*, marcamos manualmente las coordenadas donde los pies de *Rey Misterio* contactan con el hombro de su rival; entonces, la distancia de contacto fue de 0.05 m en un tiempo de 0.1 s. Esta información es significativa para estimar la fuerza neta en la colisión.

C. CÁLCULO DE LA FUERZA ASOCIADA AL IMPACTO

En la colisión de un objeto puntal, la fuerza es representada como una función impulsiva $F(t)$. Es decir, la fuerza varía en un intervalo temporal (en que sucede el contacto) desde un valor cero a un máximo único y finalmente regresa a cero cuando se pierde el contacto, pero tal comportamiento puede sustituirse numéricamente por una fuerza neta y constante en ese lapso. Por la resolución y la frecuencia de registro del vídeo estudiado, esta simplificación es adecuada. Por tanto, suponiendo que la velocidad inicial es cero, la fuerza neta del impacto F se puede obtener multiplicando la masa de las piernas m por la distancia de contacto entre los cuerpos L , dividiendo entre el cuadrado del tiempo de contacto t :

$$F = \frac{mL}{t^2} \quad (1)$$

En esas fechas, de acuerdo con compañías que contrataron al luchador, la masa de *Rey Misterio* era de 79 kg, aunque, como se observa en el vídeo, únicamente las piernas son impulsadas para golpear el cuerpo de su rival. Los brazos, el torso y la cabeza, entre otras partes, no participan en el impacto. De acuerdo a la literatura de antropología, las piernas representan ~24.43% de la masa corporal total [17]. Con la magnitud de la masa recificada, la distancia y el tiempo de contacto se puede estimar la fuerza neta del impacto.

D. ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE ERRORES POR CÁLCULO DETERMINISTA

Si la fuerza neta en el impacto es obtenida por la Ecuación (1), de acuerdo con la teoría de propagación de incertidumbres [10], el error relativo del cálculo de la fuerza es la suma de las contriciones relativas de las componentes, es decir:

$$\frac{\partial F}{|F|} = \frac{\partial m}{|\Delta m|} + \frac{\partial L}{|L|} + 2 \frac{\partial t}{|t|} \quad (2)$$

donde ∂x representa la incertidumbre asociada al parámetro x . Aquí, el desplazamiento de los píxeles L_p es transformado en desplazamiento métrico L mediante una función lineal que utiliza la calibración entre píxeles C_p y el testigo métrico en el vídeo C , obteniéndose:

$$\frac{\partial F}{|F|} = \frac{\partial m}{|\Delta m|} + \frac{\partial L_p}{|L_p|} + \frac{\partial C_p}{|C_p|} + \frac{\partial C}{|C|} + 2 \frac{\partial t}{|t|} \quad (3)$$

En el caso estudiado, si la fuente de medición fuera primaria, se utilizarían balanzas convencionales (con incertidumbres típicas de ± 0.5 kg), y flexómetros estándar (± 0.005 m). Entonces, sus contribuciones en la propagación de errores serían menores del 1 %, pero considerando que el vídeo se constituye a 30 fps (± 0.0165 s), el tiempo es la principal fuente de error, aportando un 33 % a la fuerza neta medida. Entonces, se calculó que la fuerza es 136 ± 46 N (incertidumbre relativa de 33.7 %), lo que implica que la máxima fuerza posible es 182 N.

Retomando, la Ecuación (3) permite calcular las cotas asociadas a la fuerza neta y es mayor que la incertidumbre, considerando independencia estadística entre parámetros. Además, permite analizar por partes la importancia de los parámetros para obtener la fuerza. Por ejemplo, suponiendo que se controlen los parámetros de esta ecuación, se prefiriera utilizar una masa mayor y un instrumento con mayor precisión para atenuar el efecto de la propagación de incertidumbre. Los errores relativos a la calibración se pueden disminuir seleccionando dentro de las imágenes del vídeo un testigo métrico preciso en longitud, es decir, de varias cifras significativas, y que abarquen una distancia amplia entre píxeles. En comparación con el resto de los parámetros, el tiempo es el doble de susceptible de propagar el error. Para mejorar este parámetro sería conveniente contar con cámaras de mayor velocidad para que disminuya la incertidumbre relativa del tiempo.

Lamentablemente, en muchas investigaciones donde se carece de control en las variables (p. ej., ciencias de la reconstrucción del pasado, tales como paleontología o física forense) tales parámetros son incontrolables. De hecho, presentan algunos problemas en la exactitud y vigencia de la información obtenida, p. ej., en relación con la obtención del valor de la masa por medio de fuentes secundarias: el deportista puede variar de peso desde que fue medido, la medición entre las cuerdas metálicas del cuadrilátero puede diferir en un par de centímetros. Además, la distancia y tiempo de impacto pueden ser medidos de modo ligeramente distinto por otros in-

vestigadores. Finalmente, representa un problema conceptual el hecho de que todos los valores dentro de la cota obtenida por la Ecuación (3) cuentan con la misma indefinición en la probabilidad de suceder, por lo que siempre es preferible reportar un valor extremo que el central y, dependiendo de la causa, puede ser la magnitud mínima en lugar del máximo. De este modo, para este caso se desea conocer la fuerza máxima que pudo desarrollarse en estas llamadas “patadas de canguro”.

El cálculo de la incertidumbre asociada a la media por cálculo determinista es adecuado cuando se hace la medición mediante fuentes primarias y el error aleatorio es pequeño. Pero en varias situaciones de videograbaciones fortuitas se requiere considerar la variabilidad en la medición y por ello se utiliza la técnica Monte Carlo para simular el registro de distintas medidas y observar cómo esta variabilidad afecta al valor promedio.

E. IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA MONTE CARLO

Existen varias propuestas para aplicar el método Monte Carlo. En este trabajo se eligió una aplicación intuitiva y sencilla de programar. El valor de referencia y central x es acotado por $\pm x_n$, valor que será físicamente aceptable pero descomunal y, además, en una etapa del proceso de cálculo este valor se multiplicará aleatoriamente por un valor entre -1 y 1 . En la [Tabla 1](#) se muestra los parámetros utilizados. Entonces, se emplearon como valores centrales los calculados preliminarmente mediante el videoanálisis.

Se consideró que la masa puede variar diez kilogramos, que la distancia de contacto fluctúa centímetros y que el tiempo oscila medio fotograma. Todos estos parámetros de entrada implican valores de salida muy altos (la [Tabla 1](#) resume estas estimaciones). Así, empleando la Ecuación (2), el error porcentual de la fuerza neta será de 106 %. Por esto se emplea líneas arriba la palabra “descomunal”, pero se espera que el proceso aleatorio compense esta cota extrema.

TABLA 1
VALORES PARA ESTIMAR LA FUERZA DE IMPACTO, VALORES DE TOLERANCIA PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA Y SU ERROR PORCENTUAL ASOCIADO

VARIABLE	X	$\pm X_A$	ERROR PORCENTUAL, $100(X_A/X)$
Masa, m (kg)	79	10	13 %
Longitud, L (m)	0.05	0.03	60 %
Tiempo, t (s)	0.1	0.0165	16.5 %

De tal modo, la Ecuación (1) adquiere la siguiente estructura:

$$F_{MC} = MC_N \left[\frac{(m \pm m_a)(L \pm L_a)}{(t \pm t_a)^2} \right] \quad (4)$$

MC_N representa el proceso aleatorio que se repetiría N veces que en este caso equivale a un millón de ciclos ejecutados durante 2.5 s en una computadora convencional (Dell Inspiron 13, serie 7000, 8 GB de memoria, 2.3 GHz). F_{MC} es una distribución estadística de la fuerza; su análisis permite obtener valores representativos y cotas asociadas.

En el Apéndice A se presenta el código fuente escrito para Octave, que es un software gratuito con versiones multiplataforma. El núcleo de la técnica Monte Carlo consiste en multiplicar el valor de tolerancia por (*rand -rand*), donde *rand* es la función de Octave que genera un número aleatorio entre 0 y 1 en cada ciclo, es decir, se produce un número aleatorio que es restado por otro número aleatorio que puede ser diferente (de la operación se espera un número entre -1 y 1). Este resultado se multiplicó por el valor de tolerancia y se sumó al valor estimado en el videoanálisis. Finalmente, del millón de valores de fuerza neta se hizo una agrupación de 100 parcelas para realizar el análisis estadístico. Este algoritmo fue el óptimo para lograr la mayor precisión entre los datos simulados y el modelo estadístico de distribución normal. Así, la función de ajuste fue la campana de Gauss:

$$F_{MC} \approx Ae^{\frac{(F - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

donde A es directamente proporcional al máximo de la distribución, F es la fuerza de impacto, μ es el promedio en los datos distribuidos y σ es la desviación estándar.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. EFECTO DE LOS PARÁMETROS ALEATORIOS

La Figura 3 muestra la acción de las variables por separado. El uso de (*rand -rand*) es evidente, pues se muestran distribuciones lineales monótono-crecientes, luego un valor máximo y finalmente un comportamiento lineal decreciente, formando una función de distribución delimitada. Es decir, una figura con alta simetría alrededor del eje con el valor de la fuerza de 96 y de 97 N para A)

y B), respectivamente. En contraste, para C) es notoria la falta de comportamiento lineal y de simetría sobre el eje vertical, por lo que su distribución muestra una morfología que asemeja a una aleta de tiburón (o algún tipo de función de impulso), con máximo en 97 N, como consecuencia del efecto de la función no lineal $1/t^2$, de modo que el incremento en la tolerancia en el parámetro temporal causa una mayor discrepancia con el modelo estadístico gaussiano, pues esta función presenta simetría axial.

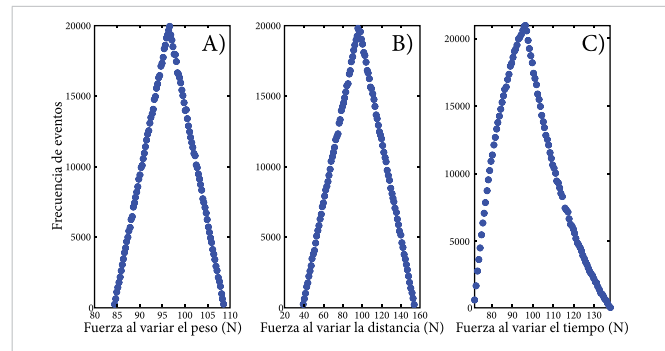


Figura 3. Frecuencia de eventos en función de la fuerza con un parámetro variable. El resto de parámetros se mantiene constante. Observe que los dos primeros casos son más simétricos que el tercero.

B. EVALUACIÓN DEL MODELO

Se encontró que el modelo gaussiano se ajusta adecuadamente a los datos simulados. Cuenta con una correlación de $R^2 = 0.991$ (Figura 4 A), la cual es aceptable. De hecho, como muestra la Figura 4 B, el apareamiento del modelo y los datos simulados puede ajustarse con una línea recta, obteniendo una pendiente $m = 0.986$ (el valor ideal es 1.000) y el parámetro independiente $b = 0.003$ (el valor ideal es 0.000) y una correlación por el ajuste lineal de 0.985, suficientemente cercana a la unidad, el valor ideal. Completando, se obtuvo una diferencia máxima de 10 % entre cada punto del modelo y los datos simulados (Figura 4 C), disminuyendo notablemente la diferencia (menor al 4 %) entre puntos para valores altos de la fuerza. En otras palabras, es aceptable utilizar el modelo gaussiano para representar la tendencia de los datos simulados.

C. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO

Aunque originalmente se inició con una cota de error neto de 106 %, el proceso Monte Carlo permitió obtener una desviación estándar de 29 %, alrededor de 98 N. Pero en este caso, el interés se centró en calcular la fuer-

za máxima y probable, por lo que se puede utilizar hasta $3\sigma = 182$ N, coincidiendo con el valor de incertidumbre por la Ecuación (2). Esta fuerza es congruente dado que es menor al límite impuesto por la cota de tolerancia de 207 N, es decir, el modelo utilizado es una función continua, pero no puede adquirir valores de fuerza infinitos. De hecho, la fuerza estimada es acotada por los valores de la tolerancia. Valores de la fuerza más allá del intervalo de tolerancia, son incongruentes (Figura 5).

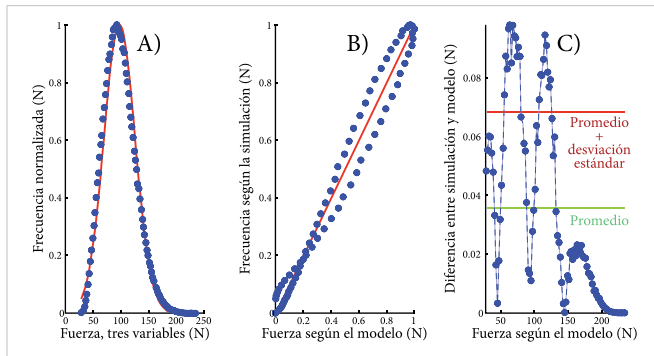


Figura 4. A) Modelo gaussiano ajustado a los datos simulados, B) ajuste entre modelo y los datos simulados a una línea recta, C) diferencia entre modelo y datos simulados (línea verde promedio, línea roja cota de una sigma).

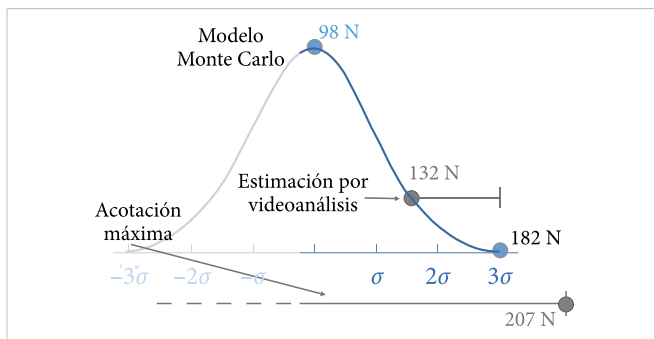


Figura 5. Infografía donde se muestran los límites de la simulación, el valor de 3σ (máxima fuerza asociada), la medición determinista y el promedio de la fuerza obtenida por Monte Carlo.

D. COMPARACIÓN DE LA FUERZA MÁXIMA ESTIMADA Y OTROS CASOS DEPORTIVOS

Se realizó una rectificación de la fuerza calculada para contrastarla con otra investigación donde se considera la masa neta de practicantes de artes marciales. En tal estudio se empleó un sistema electromecánico para medir la fuerza de patadas frontales rectas [18]. Así, en el caso estudiado, la fuerza neta máxima de toda la masa en movimiento es de 758 N y en la medición de la literatura se registró que la máxima fuerza entre los participantes oscilaba entre 714 a 1986 N. De tal modo, se

encontró congruencia entre la fuerza máxima calculada por técnica Monte Carlo y la literatura que más se asemeja a este trabajo. Comparaciones con fuerzas desarrolladas en otras disciplinas deportivas pueden ser menos adecuadas, pero se debe considerar que existen pocos reportes sobre el despeño de luchadores profesionales y menos de un movimiento específico, como es la “patada de canguro”.

E. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La mayoría de las asignaturas del área de ciencias, en especial en física, se enfatiza sobre la importancia de obtener la incertidumbre de la medición. La incertidumbre no es un sinónimo de equivocación, es establecer los alcances con los que se cuenta para realizar una afirmación sobre la realidad. De hecho, en algunos casos la medida central puede ser menos importante que los valores y la longitud de la cota. Cotas pequeñas brindan seguridad en la medición, más grandes permiten la posibilidad de que el valor de otras mediciones se encuentre entre sus límites, de modo que determinan un plan de investigación mejorado. Los valores específicos del máximo y mínimo de la cota, aunque lleguen a mostrar pequeña probabilidad, pueden determinar la siguiente acción para establecer el peor y mejor escenario posible. Por ello, la incertidumbre de la medición es muy importante en la ciencia.

El método Monte Carlo es una alternativa para obtener las cotas de incertidumbre, además de su probabilidad asociada. Su funcionamiento se puede explicar mediante una metáfora. Imagínese que se mide la longitud de una mesa con un flexómetro; la incertidumbre de la medida es la mitad del valor mínimo en la escala del instrumento. Así, es fácil obtener el binomio: medida y error asociado. Ahora, supóngase que se carece de un instrumento de medida. Es factible estimar por inspección la longitud de la mesa; si se tuvieran colegas, aportarían su longitud estimada y, posteriormente, una longitud promedio y su desviación estándar. Pues bien, mediante la técnica Monte Carlo se obtienen las estimaciones mediante un proceso aleatorio que permite contar con muestras muy grandes, limitadas por la capacidad de los instrumentos de cómputo y paciencia del programador. Para realizar adecuadamente el proceso, primero debe definirse la tolerancia, donde el valor fluctúe de modo plausible, después plantear la ecuación determinista de trabajo y un método para obtener los números aleatorios. A continuación, después de muchos ciclos, el ordenador calcula el valor de la medida

estimada. Así, se obtiene una distribución que es modelable con una función probabilística y de ella se extraen el valor más probable y su error asociado. En esencia, esto es el método Monte Carlo.

En resumen, cuando se confía en todas las mediciones y sus incertidumbres para calcular una medición derivada y su intervalo de confianza, es innecesario utilizar el método Monte Carlo. Pero, si es poco fiable un solo dato de entrada, como sucede en el quehacer forense, se deben establecer los intervalos de tolerancia que emulan a las incertidumbres instrumentales o experimentales y luego aplicar un muestreo. El valor máximo puede no ser importante para el investigador o el juzgador, pero sí una cifra circundante, definida por el promedio, la desviación estándar y la tendencia de la campana de Gauss. Ese puede ser el caso al sancionar multas de tránsito por exceso de velocidad o en el presente ejemplo al buscar la fuerza máxima probable en las “patadas de canguro”.

IV. CONCLUSIONES

Se utilizó el videoanálisis para estimar la fuerza de una patada. Después de considerar que las fuentes de datos pueden presentar variabilidad, se empleó la técnica Monte Carlo para mejorar el cálculo e interpretación del resultado. A partir de una ecuación determinista, numéricamente se simuló fluctuaciones en los parámetros, de donde se obtuvo una distribución ajustada adecuadamente a una función normal de la que se consiguió un valor promedio y una desviación estándar. La adición del promedio y tres veces sigma corresponde al intervalo que cubre alrededor de 99.7 % de los casos simulados que, aunque es un valor de baja probabilidad, debe considerarse. De modo que se calculó que la máxima fuerza neta ejercida (por tan solo las piernas) fue de 182 N, que coincide con el valor extremo del análisis determinista de la Ecuación (2). Después de comparar la fuerza neta (de todo el cuerpo) con otra disciplina deportiva, resulta que se encuentra en el intervalo de intensidad no peligroso. Por tanto, no se encontraron elementos para afirmar que esta patada causara la lesión que produjo el desvanecimiento y posterior fallecimiento del luchador el *Hijo del Perro Aguayo*.

El enfoque del método Monte Carlo es viable de implementar mediante cualquier ordenador moderno, ayuda a compensar la falta de certeza en datos específicos y, además cuenta con la ventaja de presentar resultados claros, sin embargo, requiere más difusión. Algunas

áreas de la física utilizan poco este enfoque que puede enriquecer ciertos proyectos de estudio, como puede ser el área forense donde las videograbaciones de testigos casuales abundan y las mediciones directas de la fuente puede ser difíciles de obtener. Por ello, académicamente es menester aplicar esta propuesta en otras situaciones y realizar más pruebas sobre la confiabilidad de la técnica Monte Carlo, especialmente comparándola con experimentos, p. ej., videograbar colisiones lineales entre dos cuerpos o que los estudiantes conjeturen la masa y utilicen el principio de conservación de momento para observar la congruencia entre las fuerzas calculadas; después, emplear el método Monte Carlo para obtener campanas de Gauss que revelen la distribución de los valores posibles y, finalmente, comparar las respuestas con el resultado del valor exacto de la masa.

REFERENCIAS

- [1] R. Allain, *Physics and video analysis*. Morgan & Claypool Publishers, 2016.
- [2] V. Torres y J. G. Bañuelos, “Modelos físicos y numéricos para la reconstrucción de hechos en ciencia forense: derrumbe de edificios”, *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 11, no. 2, jun. 2017. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6353427.pdf>
- [3] V. Torres-Zúñiga, “Video-análisis por software-libre para obtener la velocidad de un automotor al impactar a un peatón”, *Rev. cienc. forenses Honduras*, vol. 3, no. 1, pp. 10-18, 2017.
- [4] C. L. Guatelli “Transferring advanced physics research tools to education: how to teach simulation tools used in radiation physics research to university students”, en *INTED2010 Proceedings CD*, España, pp. 3546-3556, 2010.
- [5] J. Wąsik, “Kinematics and kinetics of taekwon-do side kick”, *J Hum Kinet*, vol. 30, no. 1, pp. 13-20, 2011, doi: [10.2478/v10078-011-0068-z](https://doi.org/10.2478/v10078-011-0068-z).
- [6] B. Baker, *Science in the Arena: Explanations and Analyses of Performances and Phenomena in Sport*. San Rafael, CA: Morgan & Claypool Publishers, 2019.
- [7] B. W. Nuryadin e I. Hindawan, “Impulse measurement and analysis using a smartphone accelerometer”, *Phys Educ*, vol. 54, no. 1, p. 015024, 2019.

- [8] D. Glenday, “Professional wrestling as culturally embedded spectacles in five core countries: the USA, Canada, Great Britain, Mexico and Japan”, *Revue de recherche en civilisation américaine*, vol. 4, pp. 1-15, 2013.
- [9] S. Wang, X. Wang, P. Ye, Y. Yuan, S. Liu y F. -Y. Wang, “Parallel Crime Scene Analysis Based on ACP Approach”, en *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 244-255, mar. 2018, doi: 10.1109/TCSS.2017.2782008.
- [10] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis*. Sausalito, CA: University Science Books, 1997.
- [11] “¿Qué lesión mató al hijo del Perro Aguayo?”, *Excelsior*, mar. 23, 2015 [En línea]. Disponible: <https://www.excelsior.com.mx/adrenalina/2015/03/23/1015043#:~:text=Tras el fallecimiento de Pedro,al cuello y fractura cervical> (acceso: ag. 15, 2021).
- [12] “¿Quién mató al Hijo de Perro Aguayo?”, *Telemundo52*, mar. 25, 2015 [En línea]. Disponible: <https://www.telemundo52.com/deportes/Quien-mato-al-Hijo-de-Perro-Aguayo-297410321.html> (acceso: feb. 14, 2018).
- [13] E. Vázquez, “la muerte del hijo del perro aguayo”, *YouTube*, mar. 21, 2015. [Archivo de vídeo]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=AmieRklWdaE&t=15s> (acceso: feb. 14, 2018).
- [14] *Tracker physics* (2020), D. Brown, W. Christian, R. M. Hanson. Acceso: ag. 20, 2020. Disponible: <https://physics.org/tracker/>
- [15] Departamento del Distrito Federal. (1994, nov. 4). *Reglamento interior de la Comisión de Lucha libre Profesional del Distrito Federal*. [En línea]. Disponible: https://indeporte.cdmx.gob.mx/storage/app/media/SIPOT/2017/SIPOT-HIPERVINCULOS/121-f-I/art121-1-reg/REGLAMENTO_INTERIOR_DE_LA_COMISION_DE_LUCHA_LIBRE_PROFESIONAL_DEL_DISTRITO_FEDERAL.pdf (acceso: feb.15, 2018).
- [16] “Rey misterio”, *WWE.com*, <http://espanol.wwe.com/superstars/reymysterio> (Acceso: feb. 14. 2018).
- [17] R. Drillis, R. Contini y M. Bluestein, “Body segment parameters; a survey of measurment techniques”, *Artif Limbs*, vol. 8, pp, 44-46, 1964.
- [18] K. R. Ramakrishnan, H. Wang, K. Shankar y A. Fien, “A new method for the measurement and analysis of biomechanical energy delivered by kicking”, *Sports Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 53-62, 2018, doi: 10.1007/s12283-017-0244-z.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha recibido el apoyo económico por la Universidad Nacional Autónoma de México, mediante el proyecto UNAM-PAPIME-PE115519 y carece de conflicto de intereses. Los autores agradecen los comentarios de Mtro. José Guadalupe Bañuelos Muñetón.

APÉNDICE A: CÓDIGO EN OCTAVE

```
%% Guion, sin acentos, para utilizar el
método Montercarlo para calcular la fuerza
promedio de la masa de piernas durante la
distancia y el tiempo de neto de contacto
durante el impacto.
%% Autor: Vicente Torres Zúñiga; Fecha: 19-
dic-2017
%
tic % inicia el reloj
clc; clear; close all %% Limpieza de memoria
%
%% DATOS DE ENTRADA
N = 1e6; % Número de ciclos.
%
peso_Rey_Misterio =79; % kilogramos
tolerancia_peso = 10; % kilogramos, casi
13% de error
Masa_piernas = 24.43/100; % Masa porcentual
de las piernas: 24.43% del peso corporal ,
% “Body Segment Parameters, A Survey of
Measurement Techniques”, Drillis, Contini, y
Bluestein.
distancia_contacto = 0.05; %metros
tolerancia_distancia = 0.03; %metros, 0.03
60% de error
%
tiempo_contacto = 0.1; % segundo
tolerancia_tiempo = 0.0165; % segundos,
0.0165 16.5% de error
%
% CALCULOS
error_deriv = (tolerancia_peso/peso_Rey_
Misterio) + ...
```

```
(tolerancia_distancia/distancia_contacto)+  
2*(tolerancia_tiempo/tiempo_contacto);  
% Error asociado por derivadas: "An  
introduction to error analysis", John R.  
Taylor  
% Vector Monte Carlo  
peso = peso_Rey_Misterio + tolerancia_  
peso*(rand(N,1) - rand(N,1)); % funcion rand:  
[0,1]  
distancia = distancia_contacto + tolerancia_  
distancia*(rand(N,1) - rand(N,1));  
tiempo = tiempo_contacto + tolerancia_  
tiempo*(rand(N,1) - rand(N,1));  
%  
% Considerando el efecto de una sola variable  
actuante  
Fuerza_peso = Masa_piernas*peso*distancia_  
contacto./(tiempo_contacto.^2);  
Fuerza_distancia = Masa_piernas*peso_Rey_  
Misterio*distancia./(tiempo_contacto.^2);  
Fuerza_tiempo = Masa_piernas*peso_Rey_  
Misterio*distancia_contacto./(tiempo.^2);  
%  
% Considerando el efecto de las tres  
variables  
Fuerza = Masa_piernas.*peso.*distancia./  
(tiempo.^2);  
%  
[frec, fuerza] = hist(Fuerza, 100); %  
parcelando datos  
%  
%%VISUALIZACIÓN DE LOS EFECTOS DE UNA  
VARIABLE  
subplot (1, 3, 1); [frec_peso, fuerza_peso]  
= hist(Fuerza_peso, 100);  
plot(fuerza_peso, frec_peso, 'ob')  
ylabel("frecuencia de eventos"); xlabel  
("Fuerza al variar el peso (N)");  
%  
subplot (1, 3, 2); [frec_distancia, fuerza_  
distancia] = hist(Fuerza_distancia, 100);  
plot(fuerza_distancia, frec_distancia, 'ob')  
xlabel ("Fuerza al variar la distancia (N)");  
%  
subplot (1, 3, 3); [frec_tiempo, fuerza_  
tiempo] = hist(Fuerza_tiempo, 100);  
plot(fuerza_tiempo, frec_tiempo, 'ob')  
xlabel ("Fuerza al variar el tiempo (N)");  
%  
%%CALCULOS Y VISUALIZACIÓN  
Promedio = mean(Fuerza);  
Desviacion_S = std(Fuerza);  
%  
Modelo = (50*max(frec)/  
(Desviacion_S*sqrt(2*pi)))*exp(-((fuerza -  
Promedio).^2)/(2*Desviacion_S^2)); % modelo  
de función gaussiana.  
Modelo = Modelo/max(Modelo); %normalizacion  
frec = frec/max(frec);  
%  
diferencia = abs(frec - Modelo);  
prom_dif = mean(diferencia);  
std_dif =std(diferencia);  
%  
figure  
subplot (1, 3, 1); plot(fuerza, frec, 'ob',  
fuerza, Modelo, '-r') % grafica de los puntos  
obtenidos  
ylabel ("Frecuencia normalizada (N)"); xlabel  
("Fuerza, tres variables (N)");  
%  
subplot (1, 3, 2); plot(frec, Modelo, 'xb',  
frec, frec, '-r') % en el caso ideal debe  
coincidir con la linea recta identidad  
ylabel("Fuerza segun la simulacion (N)");  
xlabel("Fuerza segun el modelo (N)");  
%  
subplot (1, 3, 3); plot(fuerza, diferencia,  
'-ob', fuerza, prom_dif*ones(size(frec)),  
'-g', fuerza, (prom_dif+std_  
dif)*ones(size(frec)), '-r')  
ylabel("Diferencia entre simulacion y modelo  
(N)"); xlabel("Fuerza segun el modelo (N)");  
%  
%% CALCULOS PARA GENERAR TABLAS DE  
COMPARACION  
Min3 = Promedio - 3*Desviacion_S; %  
intervalo con casi el 99.7% de datos  
Max3 = Promedio + 3*Desviacion_S;  
%  
%Cotas inferior y superior donde funciona el  
algoritmo, es un sinsentido 4 sigma  
Fuerza_minima = Masa_piernas*(peso_Rey_  
Misterio-tolerancia_peso)*(distancia_  
contacto-tolerancia_tiempo)/((tiempo_  
contacto+tolerancia_tiempo)^2); % Fuerza  
minima con las condiciones de tolerancia  
Fuerza_maxima = Masa_piernas*(peso_Rey_
```

```
Misterio+tolerancia_peso)*(distancia_
contacto+tolerancia_tiempo)/((tiempo_
contacto-tolerancia_tiempo)^2); % Fuerza
maxima con las condiciones de tolerancia
%
% Salida de Valores
disp("VALIDEZ DEL MODELO")
disp("Correlacion entre datos simulados y
modelo:")
Correlacion = corr(frec, Modelo) %
correlacion entre los puntos obtenidos y la
gaussiana modelada
disp("Error porcentual neto y el error
porcentual estadístico:")
```

```
[100*error_deriv, 100*Desviacion_S/Promedio]
%
disp("COTAS CALCULADAS")
disp("El promedio y la desviacion estandar
son:")
[Promedio, Desviacion_S]
%
disp("Fuerza min, -3sigma, Promedio, +3sigma
, Fuerza max:")
[Fuerza_minima, Min3, Promedio, Max3,
Fuerza_maxima]
%
toc % se imprime el reloj
% FIN DE GUIÓN
```