

Article

Dispositivos y Técnicas Para la Medición del Rendimiento del Salto Vertical: ¿Qué Opciones Tenemos?

Guillermo Peña García-Orea, Juan R. Heredia Elvar, Aurelio Arenas Dalla-Vecchia, Carlos Pérez-Caballero y Julián Aguilera Campillos

1. INTRODUCCIÓN

El rendimiento en el salto vertical es un indicador muy válido de la capacidad de aplicar fuerza en la unidad de tiempo (RFD) con las extremidades inferiores y, por tanto, está directamente relacionado con la aptitud neuromuscular y capacidad funcional de la persona. Un sujeto que muestre una buena “saltabilidad” es muy probable que también muestre un buen rendimiento en otras capacidades realizadas a alta velocidad, como acelerar y desacelerar en carrera o realizar cambios de dirección, entre otras. Cualquier cambio favorable de la capacidad de salto vertical estará reflejando una mejora del rendimiento neuromuscular de las extremidades inferiores muy significativo. Es por esto que la medición del rendimiento de la capacidad de salto vertical se recomienda habitualmente para la valoración de la aptitud neuromuscular y funcionalidad de poblaciones deportistas, no deportistas (mayores, niños, adultos, etc.), la detección de talentos, y la discriminación entre niveles deportivos [1].

Además, se ha podido comprobar que la pérdida de la capacidad de salto vertical (altura o velocidad máxima alcanzada) es un excelente indicador del grado de fatiga neuromuscular generada pre-post esfuerzo [2, 3, 4]. Por tanto, la pérdida de altura en el salto vertical con contra-movimiento es equivalente a la pérdida de velocidad media, máxima y de despegue, por lo que la fatiga neuromuscular se puede medir mediante dicha pérdida porcentual pre-post [5]. Incluso, la pérdida de velocidad máxima o altura en el salto puede ser utilizado como un estimador de la pérdida de velocidad en la carrera (esprint) y de la fatiga al hacer este tipo de esfuerzos [6].

2. Criterios o indicadores del rendimiento del salto vertical y técnicas para su estimación.

Una de las ventajas de utilizar el salto vertical como indicador de rendimiento y fatiga neuromuscular es la aparente sencillez de la realización del mismo por la inmensa mayoría de sujetos sanos, la “facilidad” de ser medido con inmediatez, y no interferir en el propio entrenamiento de la sesión. El problema es determinar cuál es el mejor criterio y procedimiento para medir su rendimiento.

Teóricamente, el rendimiento del salto vertical corresponde a la diferencia entre la posición del centro de masas del sujeto en posición erguida (bipedestación) con respecto al punto más alto alcanzado por el mismo en el salto, es decir, lo que habitualmente se refiere como la “altura del salto”. Algunos investigadores han definido la altura de salto como el desplazamiento vertical alcanzado por el centro de masas desde el despegue hasta el vértice de la trayectoria de vuelo [7]. El área de la piel localizada a nivel vertebral L4-L5 es considerada representativa del centro de masas corporal durante la postura erguida [8], si bien es complejo localizar este punto y monitorizar su recorrido durante el salto -por eso la mayoría de instrumentos de medida toman otros puntos de referencia, como los talones, la cadera, o la barra-. En cualquier caso, tradicionalmente y de forma mayoritaria se ha venido utilizando la estimación de la *altura alcanzada en el salto vertical* como indicador o criterio de rendimiento, para lo cual se pueden utilizar distintas ecuaciones matemáticas para hallarla:

- Altura (h) del salto a partir del “tiempo de vuelo”:

$$h_{tv} = \frac{1}{2}g \left(\frac{t_v}{2}\right)^2 = \frac{g(t_v)^2}{8}$$

Donde t_v es el tiempo medido desde que los pies del saltador despegan del suelo hasta que vuelven a estar en contacto con él al acabar el salto, g es la aceleración debida a la gravedad (9.81 m/s).

- Altura (h) del salto a partir de la “velocidad máxima”:

$$h_{vm\acute{a}x} = \frac{(v_{m\acute{a}x})^2}{2g}$$

Donde $v_{m\acute{a}x}$ es la velocidad del saltador en el instante previo al despegue.

- Altura (h) del salto “por desplazamiento” de un punto:

$$h_{despl} = h_{m\acute{a}x} - h_0$$

Donde h_0 es la posición de referencia inicial (bipedestación) y $h_{m\acute{a}x}$ es el punto de altura máxima alcanzada.

Es importante considerar cuál de estos procedimientos es tomado para la determinación de la altura del salto vertical, ya que los resultados obtenidos según se utilice el tiempo de vuelo estimado, la velocidad máxima, o el desplazamiento de un punto desde una posición de referencia, hará que los resultados obtenidos puedan ser diferentes. Tenemos que tener en cuenta que la determinación de la altura del salto vertical es siempre una medida doblemente indirecta derivada de otros parámetros indirectos, como la velocidad máxima y/o el tiempo de vuelo. Este hecho hace replantearse algunas cuestiones a la hora de establecer una metodología de valoración como teórico “gold-standard”.

Los distintos instrumentos de medida que permiten determinar la altura del salto vertical utilizan habitualmente alguna de esas ecuaciones antes mencionadas, pero cada una de ellas presenta ventajas e inconvenientes. Las inexactitudes que presentan las tres técnicas tienen raíz en un problema común, el cual radica en la naturaleza del elemento que se desplaza: el cuerpo humano no es un sistema rígido, sino articulado, deformable, donde su centro de masas cambia constantemente su posición. Si por el contrario el cuerpo humano fuera un sistema rígido, las tres fórmulas proporcionarían idénticos resultados (altura alcanzada en el salto), sin embargo, esto no es así. Los valores de tiempo de vuelo, velocidad máxima y altura desplazada que experimenta cada uno de los puntos del cuerpo humano pueden diferir significativamente, lo que hace imposible conocer dónde está el centro de masas para aplicar cada una de las tres fórmulas.

El procedimiento para la determinación de la altura del salto vertical mediante el *tiempo de vuelo* presenta diversas limitaciones e inconvenientes que considerar, pese a ser el procedimiento válido más veces utilizado en la literatura científica para describir el rendimiento del salto mediante distintos instrumentos (plataformas de contacto, plataformas de infrarrojos, video-análisis, acelerometría, etc.). Este método asume que la posición vertical del centro de masas del sujeto es la misma en el instante del aterrizaje que en el instante del despegue, de modo que el tiempo hasta el vértice de vuelo es igual al tiempo de descenso -el centro de masas del sujeto se sitúa en el punto más alto justo en la mitad de la fase de vuelo, ya que teóricamente un objeto uniformemente acelerado verticalmente realiza la misma trayectoria ascendente y descendente, y tarda el mismo tiempo al subir que al bajar-. Pero esta suposición puede dar lugar a que las alturas de salto estimadas oculten errores de medida si el sujeto altera la postura durante el aterrizaje: flexionar las rodillas, caderas o tobillos ligeramente durante el salto aumentarían el tiempo de vuelo “artificialmente”, y consecuentemente incrementaría la altura del salto estimada [1, 9, 10]. De hecho, es habitual que la configuración del cuerpo no sea la misma en el despegue que en el aterrizaje, con una diferencia de aproximadamente de 1-4 cm con las manos en la cadera [33]. Todos estos aspectos hacen que se cuestione la validez del cálculo de la altura del salto mediante el *tiempo de vuelo*.

Por otro lado, el *tiempo de vuelo* que se obtiene mediante una plataforma de contacto o mediante una barrera óptica (infrarrojos), se refiere al tiempo de vuelo de la punta de las zapatillas del saltador, que, con toda seguridad, es diferente del tiempo de vuelo del centro de masas o de cualquier otra parte del cuerpo, si se pudiera medir. Incluso, utilizando plataformas de salto de distinto tipo (contacto vs infrarrojos) podemos esperar distintas alturas del salto estimadas por el tiempo de vuelo de 2.0 ± 0.8 cm. [11]. De forma parecida, si medimos la *velocidad máxima* del salto mediante un transductor lineal anclando el cable a la barra situada sobre los hombros del saltador, con toda seguridad, se tendrá distinto resultado que si se enganchara en la cintura y, por tanto, se obtendrá distinta altura del salto vertical. Más aún, para un mismo saltador la barra puede alcanzar mayor altura si se despegara de los hombros en algún instante.

Igualmente, si utilizamos un sistema de seguimiento de la [posición por infrarrojos](#) para la estimación de la altura del salto (es decir, por desplazamiento de un punto desde una posición de referencia inicial hasta la altura máxima), los resultados del desplazamiento vertical que obtendremos serán distintos según el punto del cuerpo que escojamos para situar el marcador que sigue la cámara. Como este sistema también puede determinar la velocidad del marcador, podremos

observar, si el marcador reflectante lo situamos cerca del centro de masas, que la velocidad máxima en el despegue será mayor que si lo situamos en la punta del pie, o si lo situamos a la altura del hombro y, por tanto, la altura máxima deducida de la velocidad máxima también será diferente en los tres casos (datos pendientes de publicar).

En conclusión, hasta aquí, podemos decir que el análisis de las variables cinemáticas de un cuerpo humano no es tan simple como el de un cuerpo rígido. La propia definición de la altura de un salto no es sencilla, pues siendo razonable referirla al centro de masas del cuerpo del saltador, dicho centro de masas no se puede determinar pues es diferente en cada instante, dependiendo de la postura del sujeto; incluso dicho centro de masas podría estar fuera del cuerpo del saltador. Para complicar más las cosas, el centro de masas para cada individuo se encontrará en distintas zonas de su anatomía, según su estructura y distribución de las partes de su cuerpo.

Es por ello, que algunos investigadores consideren que *la variable e indicador más fiable y sensible, y que mejor expresa/explica el rendimiento en el salto vertical, sea la velocidad máxima que se alcanza -y no la altura del salto-* [5, 12], es decir, la velocidad alcanzada justo al final de la fase concéntrica, pero milisegundos antes del despegue. Esto significa que una mayor velocidad máxima en el salto necesariamente supone una mejora en el rendimiento. Si bien la velocidad de desplazamiento del centro de masas será diferente entre sujetos, en todos los casos la altura alcanzada dependerá directamente de la velocidad de despegue (justo en el instante del comienzo de la fase aérea), que a su vez presenta una relación casi perfecta con la velocidad máxima que puede alcanzar el sujeto unos pocos milisegundos antes de despegar del suelo, aunque ambas, así como la propia altura del salto, dependen obviamente de la fuerza aplicada en la fase concéntrica del salto [5]. Además, utilizar la velocidad máxima como criterio o indicador de rendimiento del salto vertical -y no el tiempo de vuelo y la altura del salto- tiene la ventaja de no poder ser distorsionada por alteraciones de la técnica del salto, es decir, verse afectada por aspectos de la propia ejecución y/o postura corporal, y por tanto, permite discriminar y expresar en mejor medida las variables que determinan el verdadero rendimiento del salto [5].

Anteriormente, otros investigadores han considerado la *velocidad de despegue* del centro de masas del sujeto (justo en el instante de perder contacto con el suelo) como la variable más descriptiva y determinante del rendimiento del salto vertical [13], si bien en realidad dicha velocidad está directamente relacionada con la velocidad máxima de la fase concéntrica, la cual es mucho más sencilla de determinar y medir con precisión que la de despegue [14].

No obstante, son variados y numerosos los instrumentos de medida que siguen utilizando el “tiempo de vuelo” como criterio para determinar la altura del salto, habiendo mostrado ser un procedimiento altamente válido en diferentes estudios [11, 15, 16, 17].

En cualquier caso, lo que es seguro es que la variable determinante del rendimiento en el salto vertical no es la potencia desarrollada, sino la fuerza concéntrica máxima aplicada, ya que una mayor potencia no necesariamente supone un mayor rendimiento en el salto [18]. Así, la potencia desarrollada en un salto vertical nunca es un factor determinante o un predictor del rendimiento [18], sino una resultante o consecuencia de los valores de fuerza y velocidad.

Lo cierto, es que es difícil establecer qué procedimiento es el que mejor determina la altura del salto (tiempo de vuelo, velocidad máxima, desplazamiento de un punto desde posición de referencia) y es posible que no sirva de mucho establecer comparaciones entre los resultados que aportan las distintas técnicas y, en todo caso, lo importante será utilizar siempre el mismo criterio para analizar la evolución del rendimiento del salto de un mismo sujeto. Sin embargo, es presumible considerar que la estimación de la altura del salto vertical mediante el tiempo de vuelo pueda estar sujeta a mayor error que las otras técnicas debido a alteraciones en la ejecución del propio salto, tal y como ha sido comentado, además del posible error acumulado fruto de la derivación de otras variables cinemáticas para su estimación.

3. Instrumentos electrónicos de medida para la determinación del rendimiento del salto vertical.

En la actualidad disponemos de diferentes instrumentos de medida que permiten estimar la altura del salto, teniendo todos ellos distintas características técnicas, ventajas y limitaciones que hemos tratado de resumir (Tabla 1). Si las diferencias entre sus características, criterios y técnicas utilizados para la determinación del rendimiento, y las limitaciones en su empleo no son consideradas y conocidas en profundidad pueden emitirse juicios de valor equivocados, o incluso extraerse conclusiones poco afortunadas de algunos estudios. A continuación, exponemos una descripción de las distintas tecnologías e instrumentos electrónicos más conocidos para la monitorización y determinación de la altura del salto vertical:

- **Plataformas dinamométricas de fuerza.** Son básicamente superficies planas cuadrangulares con 4 transductores/sensores de presión (piezoeléctricos o extensiométricos) conectados a un sistema electrónico de amplificación y registro. Los traductores de presión arrojan un voltaje proporcional a la fuerza aplicada sobre la plataforma ($\text{Volt} \propto \text{Newtons}$), y permiten medir la fuerza de reacción del suelo en los 3 ejes (según la 3ª Ley de Newton). Estos instrumentos son comúnmente considerados como la referencia (“gold-standard”) con la que comparar y validar otros instrumentos de medición del salto vertical (validez concurrente). Las plataformas de

fuerza determinan la altura del salto vertical a partir de la velocidad máxima del centro de masas justo antes del despegue ($h = v_{max}^2/2g$) -según el teorema del impulso mecánico-, o mediante el tiempo de vuelo ($h = g \times t^2/8$) -determinado por el intervalo de tiempo durante el cual cesa la fuerza aplicada contra la plataforma ($F = 0$)-, es decir, en ambos casos mediante una doble integración de la fuerza (aunque mediante el tiempo de vuelo el error generado puede ser mayor si se dan alteraciones técnicas/posturales del salto). La relación entre la altura de vuelo y la velocidad de despegue puede obtenerse aplicando la ley de conservación de energía mecánica en la fase de vuelo del salto. En el salto vertical el efecto de la resistencia del aire es insignificante y por lo tanto en la fase de vuelo el saltador puede ser considerado como un proyectil en vuelo libre [19]. Sin embargo, el coste económico, transporte y montaje de estas plataformas hace que sea el método menos utilizado para medir el salto vertical fuera del laboratorio.

- **Plataformas de contacto.** Son alfombrillas conectadas a un sistema electrónico de cronometraje sensible a la compresión y que se acciona automáticamente en el momento del despegue del sujeto -se abre el circuito- y se cierra el circuito cuando el sujeto vuelve a tocar el dispositivo (aterrizaje). Es decir, la esterilla se conecta a un temporizador digital que se activa cuando desaparece la compresión -momento del despegue del salto- y registra hasta el momento en que el sujeto vuelve a aplicar presión -aterrizaje-. Con estos instrumentos se registra el tiempo de vuelo del salto a partir del cual se deriva la altura equivalente a través de un microprocesador o software. También pueden medir el tiempo de contacto.
- **Plataformas ópticas por infrarrojos.** Son dos varillas que se colocan paralelamente entre sí en el suelo y que están conectadas por infrarrojos (foto-células). Este sistema detecta cualquier interrupción en la comunicación entre las dos varillas, y calcula ese intervalo de tiempo. No obstante, el tiempo de vuelo que se obtiene, y por tanto la altura alcanzada del salto, proviene del tiempo de vuelo desde que la punta de los pies del sujeto cruza el haz infrarrojo hasta que vuelve a cruzarlo en la recepción del salto -pero no del tiempo de vuelo del centro de masas o de cualquier otra parte del cuerpo-. También pueden medir el tiempo de contacto.

Un reciente estudio con una conocida marca de plataformas de salto por infrarrojos pudo encontrar una excelente fiabilidad relativa y absoluta del instrumento (ICC: 0.98-0.99; CV: 1.76-6.47%), sin embargo, presentaba un error sistemático que subestimaba 11-14 cm. la altura del salto vertical (SJ, CMJ, Abalakov) con respecto a una plataforma de fuerza como referencia (- 27-31%) [20], lo que en parte podría explicarse entre otras razones debido a que la plataforma de salto por infrarrojos no puede calcular la altura alcanzada por el centro de masas sino de la punta de los pies. Además, en estas plataformas, las fotocélulas están situadas a una altura de 1 cm de separación del suelo aproximadamente, por lo que el instante de arranque del cronómetro será posterior al del despegue y el instante de parada del cronómetro será anterior al del aterrizaje. La suma de estos dos errores en los tiempos se traduce en que el tiempo de vuelo medido es menor que el real, lo que aumenta el error en la determinación de la altura del salto.

- **Transductores lineales de velocidad y posición.** Conocidos familiarmente como “encoders”, son instrumentos de medida electromecánicos, ya que la salida del transductor suele ser una señal eléctrica, tal como una tensión (voltaje) o intensidad de corriente eléctrica [5]. La mayoría de estos dispositivos tienen un hilo o cable extensible enganchado a la resistencia externa (barra) que se desplaza, el cual a su vez está conectado a un transductor (sensor) que registra directamente señales proporcionales a la velocidad lineal de desplazamiento del cable - *transductores lineales de velocidad*- o del espacio recorrido -*transductores lineales de posición*- en función del tiempo, derivando el resto de parámetros (fuerza, aceleración, potencia). Todos estos dispositivos requieren que la trayectoria del movimiento sea lineal (perpendicular) para que el registro sea fiable y preciso, ya que no registran el desplazamiento horizontal -lo cual ya es un inconveniente para su utilización en los saltos-. Algunos modelos de transductores han sido utilizados para determinar el rendimiento del salto vertical enganchando el cable a la barra colocada sobre los hombros, y de ese modo, calcular la altura del salto restando los valores de posición de la barra: (valor de la posición máxima, es decir, la posición de máxima altura) - (valor de la posición en el instante en que la velocidad es máxima), asumiendo que el sujeto despegue del suelo cuando la velocidad en la barra ha alcanzado el valor máximo. Asimismo, otros estudios han propuesto utilizar estos dispositivos para predecir la altura del salto vertical lastrado en máquina Smith a partir de la velocidad propulsiva de la barra [21].
- **Transductores “ópticos” de posición por infrarrojos.** Son capaces de medir directamente la posición de un punto en cada instante de tiempo (cada 2 ms) mediante una cámara de infrarrojos, obteniendo por derivación el resto de variables, incluida la altura alcanzada del salto. Esto es posible por la determinación del desplazamiento del sistema desde una posición de referencia inicial -posición de reposo previo a iniciar el salto- hasta la posición alcanzada en el punto de máxima altura: (valor de la posición de máxima altura) - (valor de la posición en la posición de reposo). Naturalmente, el resultado de la altura alcanzada en el salto será distinto en función de la ubicación del punto del cuerpo desde donde medir el desplazamiento (barra, cadera, hombro, etc.). Esta técnica de medición proporciona siempre un resultado mayor que la estimación de la altura mediante el tiempo de vuelo o la velocidad máxima, pues dicha posición de referencia inicial se suele considerar con los pies planos apoyados en el suelo, y por tanto se

empieza a contar la altura del salto antes de que la fuerza de impulsión del saltador haya dejado de actuar (con la flexión plantar máxima del tobillo).

- **Sistemas de análisis del movimiento 3-D (video-análisis).** Determinados dispositivos de captura de vídeo pueden calcular la elevación del centro de masa digitalizando varios puntos de referencia anatómicos. Las cámaras de alta velocidad con una frecuencia de muestreo de hasta 1000 fps (Hz), disponibles con algunos potentes softwares de laboratorio, permiten estimar con precisión la altura del salto vertical a partir de la estimación del tiempo de vuelo (tiempo transcurrido entre los fotogramas de despegue y aterrizaje). En el pasado, esta metodología requería sistemas de análisis del movimiento costosos y complejos de manejar. Recientemente, este tipo de tecnología se ha simplificado y abaratado hasta desarrollar interesantes aplicaciones móviles que se soportan en smartphones con una frecuencia de muestreo de 240 Hz. (consultar próximo apartado tecnologías portátiles wearable).
- **Tecnologías wearables (portátiles sin cables, “ponibles”).** Todas las cuales han conquistado el mercado apoyadas por fuertes campañas publicitarias. Básicamente, encontramos los siguientes tipos de tecnologías wearables para la determinación de la altura del salto vertical:
 - *Acelerómetros (softwares y smartphones apps).* El propio smartphone, o un dispositivo inalámbrico sin cables que cuenta con una pequeña batería, incorpora un acelerómetro triaxial y un giroscopio capaz de detectar la aceleración. Para la transmisión de los datos este dispositivo se sincroniza a través de bluetooth con la aplicación descargada en el dispositivo móvil (smartphone o tablet) o software del ordenador personal. El dispositivo debe ser fijado en el segmento corporal o implemento en movimiento mediante algún tipo de arnés, cinturón o brazalete. Cada app o software utiliza distintos procedimientos para la estimación de la altura del salto a partir del “tiempo de vuelo”, a veces calculando el intervalo de tiempo transcurrido entre el valor máximo de velocidad positiva (antes del despegue) y el valor mínimo de velocidad negativa tras la recepción, y otras a partir del intervalo de tiempo en el que la aceleración vertical es igual o menor a la aceleración de la gravedad ($h = g \times 100 \times [tV_{\min} \text{ tras el pico} - tV_{\max}]^2/8$). Distintas marcas, modelos y estudios científicos han utilizado diferentes procedimientos.
 - *Video-análisis y smartphones apps.* Necesitan de cámaras de alta velocidad, por lo que algunos smartphones de última generación son compatibles (un mínimo de 120 fps es recomendable). A partir de la filmación del salto vertical se selecciona manualmente el fotograma inicial (despegue del suelo) y final (recepción en el suelo), con lo que la app calcula el tiempo entre fotogramas -tiempo de vuelo- para poder derivar la altura del salto a partir de determinadas ecuaciones. Por esta razón, es muy importante identificar correctamente cada uno de los dos fotogramas (despegue y aterrizaje) y contar para ello con la mayor frecuencia de captura de imágenes posible por el smartphone.

Tabla 1. Dispositivos electrónicos para la determinación de la altura del salto vertical.

Tipo de dispositivo	Plataformas de fuerza	Plataformas de contacto Plataformas ópticas (por infrarrojos)	Transductores ópticos de posición (por infrarrojos)	Acelerómetros (softwares y apps)	Vídeo-análisis (smartphones apps)
Medición directa (según modelos)	Fuerza (Volt _∞ N) Tiempo (t)	Tiempo de vuelo (tv) Tiempo de contacto (tc)	Distancia/espacio (e) Tiempo (tv)	Aceleración 3 ejes (a) Tiempo (t)	Tiempo (t) entre fotogramas -selección manual-
Medición indirecta (según modelos)	Velocidad máxima (centro de masas) Tiempo de vuelo (tv)	Altura del salto (h)	Velocidad máxima	Velocidad vertical máxima Aceleración vertical	Tiempo de vuelo (t)
Medición doble indirecta (según modelos)	Altura del salto (h)	-	Altura del salto (h)	Tiempo de vuelo Altura del salto (h)	Altura del salto (h)
Frecuencia de muestreo (según modelos)	500-1000 Hz.	200-1000 Hz.	500 Hz	200-1000 Hz.	120-240 fps (Hz)
Ventajas (según modelos)	Fiabilidad de la medida (h) Registro en tiempo real	Software de adquisición y análisis de datos Registro en tiempo real	Fiabilidad de la medida (h) Software de adquisición y análisis de datos Posibilidad de estudiar cambios de posición de cualquier punto corporal Registro en tiempo real Se puede medir el salto sobre cualquier tipo de superficie	Asequibilidad Portabilidad, practicidad, manejabilidad No requiere calibración Registro en tiempo real Se puede medir el salto sobre cualquier tipo de superficie	Asequibilidad Portabilidad, practicidad, manejabilidad
Inconvenientes y limitaciones (según modelos)	Asequibilidad Montaje (plataforma, pc, interface) Calibración Portabilidad Manejabilidad	Fiabilidad de la medida (h) Error sistemático de la medida (h) Asequibilidad Montaje y conexión (pc, interface, transductor) Calibrado Superficie del suelo totalmente horizontal (plataformas por infrarrojos)	Calibrado Conexión a corriente eléctrica Montaje y conexión (pc, interfaz, cámara, reflectante)	Fiabilidad de las medidas indirectas (h) Ubicación y fijación del sensor Autonomía de la batería Inclusión de la masa corporal del sujeto	Registro no es en tiempo real Posición de la cámara/móvil Smartphone de alta gama (cámara superlenta)
Marcas comerciales (ejemplos)	AMTI OR6-5-1 Bertec SG-9 Kistler Quattro Jump Dinascan IsoNet	Plataformas de contacto: Ergotester Globus Just Jump System Smart Jump Axo jump Plataformas por infrarrojos: Opto Jump Ergo Jump plus Sport Jump System	Velowin	Myotest Keimove™ Gyko system Push-Band (iOS)	My Jump (iOS)

4. Tecnologías wearables para la determinación de la altura del salto: acelerómetros y vídeo-análisis.

Con respecto a las tecnologías portátiles sin cables o “wearables”, de indudable atractivo, simplicidad y popularidad, han surgido diversos estudios científicos en los últimos años sobre la fiabilidad y validez concurrente de tales dispositivos basados en la acelerometría [1, 17, 22-28] y vídeo-análisis [29, 30] para la determinación de la altura del salto vertical a partir del *tiempo de vuelo*. Realizando un análisis de tales estudios debemos destacar las siguientes consideraciones y conclusiones.

A nivel general:

- Recordemos que el criterio de “tiempo de vuelo” para estimar el rendimiento/altura del salto puede suponer la

principal fuente de error de medida. ¿En qué instante comienza y finaliza verdaderamente el tiempo de vuelo según cada instrumento de medida (despegue y aterrizaje)? ¿Qué frecuencia de muestreo utiliza cada instrumento para determinar los instantes de principio y fin del tiempo de vuelo? ¿Qué factores de ejecución del salto afectan a la estimación del tiempo de vuelo? Son sólo algunas preguntas que muestran la complejidad e interferencia de múltiples variables que afectan la medición del rendimiento del salto mediante este criterio ya comentado. La detección del instante justo del despegue y aterrizaje es un aspecto clave para poder validar estos instrumentos con respecto a la altura del salto, el tiempo de vuelo y la velocidad vertical de despegue [28].

- Los protocolos del salto utilizados en los estudios pueden afectar a los datos registrados de los propios saltos (calentamiento, número de saltos/registros, posición/ángulo de los segmentos durante la ejecución, etc.). Por esta razón, los protocolos de valoración deben estar estrictamente estandarizados para minimizar la variabilidad de la medida y favorecer la estabilidad de los resultados. Para obtener medidas fiables del salto con contra-movimiento, los sujetos deben familiarizarse suficientemente con la técnica del salto y permitir que realicen numerosas repeticiones hasta estabilizar el rendimiento -más de tres intentos/saltos después del calentamiento- [1].
- No existe un tratamiento ni unos valores estadísticos consensuados como los más apropiados para la interpretación del análisis de la fiabilidad relativa de un instrumento (error de la medida, coeficiente de fiabilidad, coeficiente de variación), pero sí hay formas para que los diseños de investigación puedan mejorarla: familiarización con la técnica del ejercicio evaluado (sesiones previas de familiarización), número de ensayos/repeticiones de los saltos (>3 ensayos), y una muestra de población amplia y específica (N= >40 sujetos) [1]. Debido a estas limitaciones de diseño de muchos de los estudios, no podemos determinar con absoluta seguridad si los diferentes dispositivos evaluados para la medición del rendimiento del salto son lo suficientemente sensibles para detectar cambios reales en la altura del salto después de participar en un programa de entrenamiento (2-6 cm en la altura del CMJ).
- En conjunto, estos instrumentos muestran una aceptable reproductibilidad y fiabilidad de la medida del salto vertical sin carga (CVs “bajos”: <6%; CCIIs “medio-altos”: ≥ 0.8 ; Error sistemático de la medida-SEM: 1-5 cm). Aunque no existen normas preestablecidas para medidas de fiabilidad de los estudios de validación concurrente, se ha sugerido que los valores de ICC por encima de 0.75 pueden considerarse fiables, y que este índice debería ser de al menos 0.90 para la mayoría de las aplicaciones clínicas [31].

En relación a los estudios sobre sistemas de acelerometría (softwares y smartphones apps):

- La mayoría de estudios que han utilizado una plataforma de fuerza como instrumento con el que comparar y validar la altura del salto concluyen que no son instrumentos intercambiables entre sí, si bien, debido a su elevada fiabilidad relativa (ICC: >0.8) y a un error de la medida sistemático entre ambos instrumentos pueden utilizarse aplicando ecuaciones de regresión para estimar la “verdadera” altura del salto determinada por la plataforma de fuerza [26, 27].
- Varios de estos estudios han encontrado una tendencia/sesgo sistemático a la sobreestimación del tiempo de vuelo y altura del salto concomitante con respecto a una plataforma de fuerza y/o a una plataforma de salto por infrarrojos: >3.66 cm. [25]; >4.38±2.59 cm. [26]; CMJ ±3.2 y SJ ±4.0 cm [27]; >7 cm. [22, 24, 28]. Algunos de estos mismos estudios, no obstante, consideran “aceptable” ese sesgo de la medida de la altura del salto, pero no confirman la validación de tales instrumentos, y tampoco recomiendan la intercambiabilidad entre estos dos sistemas de medida (plataforma de fuerza y acelerómetros).
- Estas diferencias de medida entre acelerómetros y plataformas de fuerza se explican principalmente por asumir un modelo simplificado del cuerpo humano. Considerar que el centro de masas del cuerpo humano se puede medir a través de un cinturón sujeto alrededor de la pelvis es una simplificación que conduce a errores [28]. Por ejemplo, cuando los brazos tiran hacia arriba en el salto, el centro de masas se eleva unos 4 cm, pero la pelvis, y por tanto el acelerómetro, no se mueven [28].
- Algunos estudios han sugerido, para reducir el error debido al proceso de integración de variables, que la frecuencia de muestreo de estos instrumentos debería ser la más alta posible (500 Hz.). Sólo los acelerómetros más profesionales y sofisticados alcanzan esa frecuencia de captura.
- Algunos estudios de validación con acelerómetros han utilizado distintos criterios entre instrumentos de medida para determinar la altura del salto a partir del tiempo de vuelo: el intervalo de tiempo transcurrido entre el valor máximo de velocidad positiva y el valor mínimo de velocidad negativa *versus* intervalo de tiempo durante el cual la fuerza aplicada es igual a cero sobre la plataforma de fuerza [25]. Estas diferencias de criterios para determinar la altura del salto pueden explicar en parte las diferencias encontradas entre instrumentos por algunos de esos estudios.
- Los acelerómetros calculan la distancia alcanzada (altura del salto) usando una doble integración. Sin embargo, este hecho induce un error elevado que necesita ser corregido mediante la aplicación de algoritmos filtrados o nuevos criterios para la determinación del instante del despegue/aterrizaje [28].
- Inevitablemente, cualquier dispositivo acelerómetro registrará la aceleración del punto donde sea anclado (barra, brazo, etc.), además de la propia aceleración lineal adicional del centro de masas del sistema. Por tanto, las diferentes ubicaciones del anclaje del propio dispositivo, por ejemplo, la cadera, la cintura, o la barra, podrían ofrecer datos diferentes sobre la determinación de la altura del salto. Saber cómo afecta sobre la medida del salto

la ubicación del acelerómetro en los distintos lugares o puntos anatómicos requiere estudios comparativos.

- Además, la forma y materiales con que son fijados dichos dispositivos al cuerpo es una importante variable a considerar (cinturones, arneses, brazaletes), ya que cualquier movimiento estaría afectando a la determinación basada en la aceleración del momento exacto del despegue y el aterrizaje y, por lo tanto, distorsionaría el tiempo de vuelo y la altura estimada del salto vertical [27]. Por tanto, el uso de estos dispositivos tiene una limitación importante: requieren una posición muy estable (sin movimientos) antes de la fase de impulso del salto para identificar el inicio del movimiento, y requieren estar perfectamente alineados con la dirección vertical durante la ejecución.
- Por último, no todos los estudios han utilizado acelerómetros con las mismas características técnicas (giroscopios 3D sincronizados con el acelerómetro y acelerómetros triaxiales).

En relación a los estudios sobre los sistemas de video-análisis mediante smartphone apps:

- Uno estudio de validación de una aplicación móvil comercializada para la determinación de la altura del salto vertical con contra-movimiento concluyó que esta técnica resultó altamente válida y fiable (CCI: 0.996-0.998; CV: 3.4-3.6%) en comparación con las mediciones obtenidas mediante una plataforma de fuerza profesional, considerando el tiempo de vuelo para ambas [29]. Este estudio utilizó a dos observadores independientes para la toma de los registros mediante la app móvil por video-análisis (en concreto, cuando se realizó este estudio se utilizó una cámara con una frecuencia de muestreo de 120 fps). Los resultados obtenidos mostraron, con respecto a la plataforma de fuerza, una desviación media de 8,9 ms en el tiempo de vuelo o 1.2 ± 0.5 cm de la altura del salto. Aunque la aplicación móvil registró valores de altura del salto significativamente más bajos que los registrados por la plataforma de fuerza, mostró un coeficiente de correlación intra-clase entre observadores y una correlación entre ambos instrumentos muy alta.
- Un poco más reciente, otro estudio de validación de la misma app utilizando una plataforma de fuerza [30], pudo comprobar que dicha aplicación tenía una perfecta correlación con la plataforma de fuerza, utilizando el tiempo de vuelo o la velocidad máxima de la plataforma como criterio de rendimiento del salto (ICC= 1.00; ICC= 0,996), aunque la altura del salto estimada por la app estaba ligeramente sobreestimada en comparación con la de la plataforma de fuerza. También, sobre esta misma aplicación móvil, se ha analizado la fiabilidad inter e intra-sesión y validez de las medidas de distintos tipos de saltos verticales en sujetos entrenados con respecto a una plataforma de contacto. El estudio pudo observar una muy alta fiabilidad (CCI: 0.97-0.99; CV: 3.8-7.6%) en mediciones realizadas en distintos momentos (inter-sesión) para la estimación de altura del salto a partir del tiempo de vuelo, utilizando una misma ecuación de predicción para ambos instrumentos de medida (la diferencia entre instrumentos fue de 0,2 cm) [32].
- En este tipo de estudios, la ubicación y/o fijación de la cámara podría ser una variable escasamente controlada. Sujetar la cámara de filmación (Smartphone) con la mano puede suponer que el plano de la imagen grabada no esté paralelo al plano frontal, con el error que esto podría generar de cara a las mediciones. Por otro lado, nos preguntamos si utilizar el zoom de la cámara del dispositivo móvil podría estar alterando de alguna manera la fiabilidad de los datos registrados.
- Posible conflicto de intereses, como los propios autores declaran en algunos de los estudios [29, 32].

5. Conclusiones.

La valoración del rendimiento del salto es un tema muy explorado en la literatura científica y altamente interesante por sus aplicaciones al entrenamiento, control y valoración del rendimiento físico de cualquier población. El rendimiento del salto es la propia altura máxima alcanzada por el salto o la velocidad máxima alcanzada en la fase concéntrica (y que depende de la fuerza máxima aplicada contra el suelo), ya que estas variables están íntimamente relacionadas, por lo que desarrollar instrumentos que las midan con precisión es fundamental.

Sin embargo, el procedimiento o técnica para valorar dicho rendimiento es todavía algo que no está totalmente consensuado entre investigadores. De hecho, es difícil decir cuál es el método que mejor determina la altura del salto y, seguramente, no servirá establecer comparaciones entre los resultados que aportan las distintas técnicas. En todo caso, lo importante es que cada analista utilice siempre el mismo instrumento, criterio y técnica para estudiar la evolución del rendimiento del salto con sus sujetos.

Por esta razón la evolución del rendimiento del salto vertical con el transcurso del entrenamiento requiere ser medida con precisión con los instrumentos más sensibles, y para ello disponemos de numerosos dispositivos electrónicos, cada cual con sus propias características y limitaciones (plataformas de contacto, plataformas ópticas por infrarrojos, transductores ópticos de posición, acelerómetros, etc.). Lo importante, es que estos dispositivos de medición sean lo suficientemente sensibles para detectar cambios reales en el rendimiento de los saltos después de la participación en un programa de entrenamiento. Si el error de medición inter-sesión de un dispositivo es alto, entonces el dispositivo puede no ser lo suficientemente sensible para detectar un cambio real (es decir, el cambio real se pierde dentro del error). Es por ello, que

conocer la fiabilidad de la medida de cualquier instrumento es importante cuando se comparan dos métodos o instrumentos diferentes, así como determinar el sesgo de la medida de cada uno. Cuando se conocen el grado de concordancia de la medida entre dos instrumentos se puede establecer si pueden o no ser validados, y partir de ahí saber si pueden ser intercambiables entre sí para la valoración y control del entrenamiento.

REFERENCIAS

1. Nuzzo JL, Anning JH, Scharfenberg JM. (2011). The reliability of three devices used for measuring vertical jump height. *J. Strength Cond Res.* 2011;25(9):2580-2590.
2. Gorostiaga EM, Asiáin X, Izquierdo M, Postigo A, Aguado R, Alonso JM, Ibáñez J. (2010). Vertical jump performance and blood ammonia and lactate levels during typical training sessions in elite 400-m runners. *J Strength Cond Res.* 2010;24(4):1138-49.
3. Sánchez-Medina L, González-Badillo JJ. (2011). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(9):1725-34.
4. Gathercole RJ, Sporer BC, Stellingwerf, T, and Sleivert, GG. (2015). Comparison of the capacity of different jump and sprint field tests to detect neuromuscular fatigue. *J Strength Cond Res.* 2015;29:2522-31.
5. González-Badillo JJ, Sánchez-Medina L, Pareja Blanco F, Rodríguez Rosell D. (2017). La velocidad de ejecución como referencia para la programación, control y evaluación del entrenamiento de la fuerza. *ERGOTECH.*
6. Jiménez Reyes P, Pareja Blanco F, Cuadrado Peñafiel V, Morcillo JA, Párraga JA, González Badillo JJ. (2016). Mechanical, metabolic and perceptual response during sprint training. *J Sports Physiol Perform* 2016;37(10):807-12.
7. Bosco C, Luhtanen P, & Komi PV. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European J Applied Physiol* 1983;50:273-82.
8. Hasan SS, Robin DW, Szurkus DW, Ashmead DH, Peterson SW, and Shiavi RG. (1996). Simultaneous measurement of body center of pressure and center of gravity during upright stance. *Part I: Methods. Gait Posture* 1996;4:1-10.
9. Aragon-Vargas LF. (2000). Evaluation of four vertical jump tests: Methodology, reliability, validity, and accuracy. *Measurement in Physical Education and Exercise Science* 2000;4: 215-28.
10. Musayev E. (2006). Optoelectronic vertical jump height measuring method and device. *Meas* 2006;39(4):312-19.
11. García-López, J, Morante, JC, Ogueta-Alday, A, and Rodríguez- Marroyo, JA. (2013). The type of mat (Contact vs. Photocell) affects vertical jump height estimated from flight time. *J Strength Cond Res* 2013;27:1162-67.
12. Jiménez Reyes, Pareja Blanco F, Rodríguez Rosell D, Marques MC, González Badillo JJ. (2016). Maximal velocity as a discriminating factor in the performance of loaded squat jumps. *Int J Sports Physiol Perfom*, 2016;11(2): 227-34.
13. Reiser RF, Rocheford EC and Armstrong CJ. (2006). Building a better understanding of basic mechanical principles through analysis of the vertical jump. *Strength Cond J* 2006;28:70-80.
14. González-Badillo JJ, & Marques MC. (2010). Relationship between kinematic factors and countermovement jump height in trained track and field athletes. *J Strength Cond Res.* 2010;24(12):3443-47.
15. García-López J, Peleteiro J, Rodríguez-Marroyo JA, Morante JC, Herrero JA, & Villa JG. (2005). The validation of a new method that measures contact and flight times during vertical jump. *Int J Sports Med*, 2005;26(4):294-302.
16. Glatthorn JF, Gouge S, Nussbaumer S, Stauffacher S, Impellizzeri FM, & Maffiuletti NA. (2011). Validity and reliability of optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. *J Strength Cond Res.* 2011;25(2):556-60.
17. Requena B, Requena F, García I, De Villarreal E-S-S, & Pääsuke M. (2012). Reliability and validity of a wireless microelectromechanicals based system (Keimove™) for measuring vertical jumping performance. *J Sports Sci & Med*, 2012;11(1):115-22.
18. González-Badillo JJ. Jornada de entrenamiento de la fuerza aplicada al rendimiento físico y deportivo. (2001). Experto universitario en Entrenamiento Personalizado IICEFS-Isabel I. 2015-16.
19. Linthorne NP. (2001). Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *Am J Phy* 2001;69: 1198-1204.
20. Attia A, Dhahbi W, Chaouachi A, Padulo J, Wong DP, Chamari K. (2017). Measurement errors when estimating the vertical jump height with flight time using photocell devices: the example of Optojump. *Biol Sport.* 2017;34(1):63-70.
21. García-Ramos A, Štirn I, Padiál P, Argüelles-Cienfuegos J, De la Fuente B, Strojnik V and Feriche B. (2015). Predicting Vertical Jump Height from Bar Velocity. *J Sports Sci Med.* 2015;14(2):256-62.
22. Casartelli N, Müller R, & Maffiuletti NA. (2010). Validity and reliability of the myotest accelerometric system for the assessment of vertical jump height. *J Strength Cond Res* 2010;24(11):3186-93.
23. Picerno P, Camomilla V, Capranica L. (2011). Countermovement jump performance assessment using a wearable 3D inertial measurement unit. *J Sports Sci.* 2011;29(2):139-46.
24. Castagna C, Ganzetti M, Ditroilo M, Giovannelli M, Rocchetti A, Manzi V. (2013). Concurrent validity of vertical jump performance assessment systems. *J Strength Cond Res.* 2013;27(3):761-8.
25. Choukou MA, Laffaye G, & Taiar R. (2014). Reliability and validity of an accelerometric system for assessing vertical jumping performance. *Biol Sport* 2014;31(1), 55-62.
26. Mauch M, Praxisklinik Rennbahn AG, Hans-Joachim Rist, Praxisklinik Rennbahn AG, Xaver Kaelin, Praxisklinik Rennbahn AG. (2014). Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie 2014;62(1):57-63.
27. Lesinski M, Muehlbauer T, Granacher U. (2016). Concurrent validity of the Gyko inertial sensor system for the assessment of vertical jump height in female sub-elite youth soccer players. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* 2016;11;8:35.

28. Monnet T, Decatoire A, Lacouture P. (2016). Comparison of algorithms to determine jump height and flight time from body mounted accelerometers. *Sports Engineering*. 2014;17(4):249-259.
29. Balsalobre-Fernández C, Glaister M, Lockey RA. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *J Sports Sci*. 2015;33(15):1574-9.
30. Carlos-Vivas J, Martín-Martínez JP, Hernández-Mocholi MA, Pérez-Gómez J. (2016). Validation of the iPhone app using the force platform to estimate vertical jump height. *J Sports Med Phys Fitness*. 2016 [Epub ahead of print]
31. Thompson CJ, and Bembien MG. (1999). Reliability and comparability of the accelerometer as a measure of muscular power. *Med. Sci. Sports Exerc*. 1999;31:897-902.
32. Gallardo-Fuentes F, Gallardo-Fuentes J, Ramírez-Campillo R, Balsalobre-Fernández C, Martínez C, Caniuqueo A, Cañas R, Banzer W, Loturco I, Nakamura FY, Izquierdo M. (2016). Intersession and Intrasession Reliability and Validity of the My Jump App for Measuring Different Jump Actions in Trained Male and Female Athletes. *J Strength Cond Res*. 2016;30(7):2049-56.
33. Kibele A. (1998). Possibilities and limitations in the biomechanical analysis of countermovement jumps: a methodological study. *J App Biomech*. 1998;14(1):105-17.

Versión Digital