

BIOMECÁNICA DEL LANZAMIENTO DE PESO: ESTUDIO DEL MODELO TÉCNICO INDIVIDUAL

SHOT PUT BIOMECHANICS: STUDY OF THE INDIVIDUAL TECHNIQUE MODEL

RESUMEN

Se presenta el análisis biomecánico de 11 lanzamientos válidos del *recordman* español Manuel Martínez en 3 Campeonatos de España consecutivos entre 1996 y 1998, con el objetivo de describir la técnica individual e identificar aquellas variables cinemáticas del lanzamiento que mejor correlacionen con la distancia obtenida. Por otro lado se pretende conocer las posibles vías de mejora en la técnica individual y la dependencia de unas variables con otras mediante estudios de regresiones múltiples.

Se usó la metodología de fotogrametría vídeo 3D en situación real de competición. El registro de las secuencias de los lanzamientos se realizó mediante 2 cámaras sincronizadas a una frecuencia de 50 Hz en el sistema de vídeo PAL/SECAM. Se usó un modelo humano de 26 puntos y se digitalizó también el peso. Antes y después de las competiciones se grabó un marco de calibración cúbico de 2 m de lado. Se realizó una reconstrucción espacial mediante el programa Kinescan 8.0 del IBV que usa algoritmos DLT.

El modelo técnico individual estudiado destaca por no tener fase de transición y por su gran estabilidad (pequeñas variaciones en los 11 lanzamientos estudiados). La distancia del deslizamiento ha sido de 0.75 ± 0.07 m, recorriendo el peso en horizontal 1.43 ± 0.08 m de los 2.26 ± 0.08 m que recorre en todo el lanzamiento, previamente a la liberación. El comportamiento de las extremidades inferiores se realiza según la variante técnica denominada "corta-larga".

En el grupo de variables con mejor R^2 con la distancia del lanzamiento se encuentran las distancias horizontal y vertical recorridas por el peso, el giro de los pies y la variación del ángulo de la rodilla izquierda, en la fase final. De forma aislada ni el ángulo de salida, ni la altura de liberación presentan correlación con la distancia del lanzamiento, pero unidas a la velocidad de salida tienen una R^2 de 0.995.

Palabras clave: biomecánica, cinemática, técnica deportiva, lanzamiento de peso

SUMMARY

This paper describes biomechanical analysis of 11 valid throws of the Spanish record-breaker Manuel Martínez in 3 Spanish Championships from 1996 to 1998. The aim of these studies was to describe the individual technique as much as identify the cinematic variables that more correlated with the distance of throw. Possible technique improvements are investigated as well as dependence between variables with multiple regression.

Two synchronised video cameras at 50 Hz with PAL/SECAM video system were used to film the throws. One camera was placed in rear position and the other in the lateral right (except in the first Championship that it was placed on the left) according to the circle of throw. 26 points human model apart from one point for the shot was used to digitise. One cubic calibration frame (2 m per side) was filmed before and after the competitions. Spatial reconstruction was made using Kinescan 8.0 IBV software, which uses DLT algorithms.

The studied technique model stands out for not having transition phase and for its high stability (few variations in the 11 studied throws). Sliding distance was 0.75 ± 0.07 m, during this phase the shot covers horizontally 1.43 ± 0.08 m over the 2.26 ± 0.08 m that it covers on the hole throw before the release. The lower limbs movement goes on according to the technique so called "short-long".

The variables with best R^2 with the distance thrown are the horizontal and vertical distance covered by the shot, the twist of the feet, and the variation of the left knee angle, all of them in the last phase. From an isolated point of view neither the angle of release nor the height of release show correlation with the distance of throw, but with the velocity of release altogether they show $R^2 = 0.995$.

Key words: biomechanics, kinematics, sport technique, shot put.

Ignacio Grande Rodríguez⁽¹⁾

Marta Meana Riera⁽²⁾

José Luis López Elvira⁽³⁾

Iñigo Tomé Bermejo⁽⁴⁾

Xavier Aguado Jódar⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Alfonso X el Sabio.

⁽²⁾ Universidad Católica de Murcia.

⁽³⁾ Universidad Católica de Murcia.

⁽⁴⁾ Universidad de León.

⁽⁵⁾ Universidad de Castilla la Mancha.

AGRADECIMIENTOS. Este artículo muestra parte de la investigación llevada a cabo desde 1996 hasta 2000 que ha sido apoyada por la Real Federación Española de Atletismo junto con el Responsable Nacional de Lanzamientos Carlos Burón Fresno, además de Organismos Nacionales como la CICYT y el CSD. Esta investigación no hubiera sido posible sin la colaboración de los mejores atletas españoles de lanzamiento de peso.

CORRESPONDENCIA:

Xavier Aguado Jódar. Facultad de Ciencias del Deporte. Universidad de Castilla La Mancha. Campus Tecnológico. "Antigua Fábrica de Armas". Avda. Carlos III, s/n. 45071 Toledo. e-mail: xavier.aguado@uclm.es

Aceptado:
20.02.02

1. INTRODUCCIÓN

La **técnica deportiva** es determinante del rendimiento en los lanzamientos atléticos. El denominado modelo técnico individual conjuga las características de la técnica ideal con las de un determinado atleta de cara a conseguir el máximo rendimiento. La Biomecánica ayuda a atletas y entrenadores en la búsqueda y consolidación del modelo técnico individual⁽¹⁾. En el trabajo que se expone se han estudiado todos los lanzamientos válidos de Manuel Martínez en los Campeonatos de España Absolutos al Aire libre celebrados en Málaga 1996, Salamanca 1997 y San Sebastián 1998. El trabajo analiza su modelo técnico individual buscando tanto su descripción como puntos susceptibles de mejora. Es de destacar que todos los lanzamientos han sido grabados en situación real de competición y que en el Campeonato de Salamanca se incluye un lanzamiento (20,27 m) que fue en su día récord de España). Finalmente destacar que Manuel Martínez además de ser en los últimos años el mejor lanzador español es actualmente el cuarto en el último Campeonato del Mundo de Atletismo, en Edmonton.

Los objetivos del trabajo han sido:

- 1- Optimizar la metodología de análisis cinemático en vídeo 3D aplicada al lanzamiento de peso.
- 2- Analizar y describir la biomecánica del *modelo técnico individual* de Manuel Martínez.
- 3- Determinar las variables cinemáticas que más directamente se relacionan con el rendimiento del lanzador para poder optimizar su técnica.

2. MATERIAL Y MÉTODO

Se utilizó como método de análisis la videogrametría 3D. En el **trabajo de campo** se usaron un camascopio y una cámara de vídeo de circuito cerrado conectada a un magnetoscopio. Las grabaciones fueron sincronizadas mediante cable coaxial. Se grabó a 50 campos/s con una velocidad de obturación de 1/1000 s. Para lograr las mejores grabaciones se buscó una posición ortogonal entre las cámaras, utilizar distancias focales altas, minimizar el número de puntos ocultos y elegir lugares de poco tránsito de jueces y atletas.

La calibración del espacio se realizó con un sistema de referencia cúbico de 2 m de lado determinando sus aristas 8 puntos de control. Con ocho puntos y una buena distribución espacial de los mismo el error sistemático es pequeño y además se evita tener demasiados puntos que digitalizar en el fotograma de calibración^(8,9,15).

En el **trabajo de laboratorio** se usó el programa de fotogrametría *KINESCÁN IBV v 8.0* que utiliza el algoritmo de reconstrucción tridimensional DLT⁽³⁾. El suavizado se realizó con funciones splines de orden 5⁽²⁸⁾ introduciendo como factor de suavizado de cada coordenada de cada punto la máxima desviación estándar, calculada tras digitalizar un mismo lanzamiento en cinco ocasiones. Este proceso se realizó con un lanzamiento de cada campeonato.

Se analizaron los 11 lanzamientos válidos, con distancias comprendidas entre 19.23 y 20.27 m que fue en su momento el récord nacional al Aire Libre (Tabla 1). El proceso de digitalización fue manual, creándose un modelo para el lanzador y el peso definido por 27 puntos, 25 reales y 2 auxiliares (Figura 1).

Se realizó una selección de las variables en función de la literatura y la experiencia lograda tras el análisis de los diferentes campeonatos. Las variables se clasificaron según fueran antes o después de la liberación. Las **variables previas a la liberación** fueron divididas en variables temporales, espaciales, angulares y

VARIABLES TRAS LA LIBERACIÓN

LANZAMIENTOS	V ₀ (m/s)	h ₀ (m)	α ₀ (°)	R (m)
1 ^{er} lanzamiento Málaga'96	13.06	2.38	34	19.32
2 ^o lanzamiento Málaga'96	13.04	2.47	34.9	19.56
4 ^o lanzamiento Málaga'96	13.21	2.44	31.4	19.39
6 ^o lanzamiento Málaga'96	12.92	2.44	35.2	19.23
1 ^{er} lanzamiento Salamanca'97	13.15	2.38	35.1	19.67
2 ^o lanzamiento Salamanca'97	13.12	2.5	33.3	19.60
3 ^{er} lanzamiento Salamanca'97	13.27	2.36	34.1	19.82
4 ^o lanzamiento Salamanca'97	13.22	2.41	34.2	19.81
5 ^o lanzamiento Salamanca'97	13.33	2.21	36.8	19.97
6 ^o lanzamiento Salamanca'97	13.39	2.36	35.2	20.27
1 ^{er} lanzamiento San Sebastián'98	12.98	2.4	36.4	19.43
Media	13.15	2.4	34.6	19.64
SD	± 0.14	± 0.07	± 1.4	± 0.31

TABLA 1.- Valores de las variables tras la liberación en los lanzamientos de Manuel Martínez en los Campeonatos de España al Aire Libre Málaga'96, Salamanca'97 y San Sebastián'98.



FIGURA 1.- Modelo de 27 puntos usado para la digitalización.

espacio temporales. Dentro de estos grupos se diferenciaron las variables de fase, que dan información de variaciones en espacios de tiempo y las variables de posición que dan información de instantes temporales (Figura 2).

Los **critérios de referencia en los cálculos de las variables** fueron:

1- Se tomó como **eje X** al de la dirección principal del movimiento, siendo su valor creciente hacia delante.

2- Se tomo como **eje Y** al perpendicular y horizontal al X. Positivo y creciente de izquierda a derecha desde una visión posterior.



FIGURA 2.- Subdivisiones de las diferentes variables estudiadas.

3- Se tomó como **eje Z** al vertical, positivo en sentido ascendente.

4- Se tomó el criterio de ángulos crecientes en sentido horario y decrecientes en sentido antihorario.

5- Para referenciar el giro de los pies sobre el suelo se tomó como eje la parte del pie sobre la que se pivota.

6- La **distancia de deslizamiento** se calculó desde el punto de despegue del talón derecho hasta el punto de contacto de la punta del pie derecho. La orientación del deslizamiento se calculó teniendo estos mismos puntos como referencia.

7- La **orientación de los pies** se calculó como el ángulo entre la dirección del pie en sentido talón-punta y la dirección de lanzamiento.

8- El **ángulo pélvico escapular** se calculó entre las proyecciones XY de la cintura pélvica y la escapular.

9- El **ángulo de inclinación del tronco** se calculó entre la proyección XZ del segmento tronco y el eje vertical.

Se realizó un **estudio de reproducibilidad** para cada campeonato mediante ANOVAs con las coordenadas de cinco digitalizaciones de un mismo lanzamiento y se hizo un cálculo de los **errores aleatorios**. Las pruebas estadísticas: ANOVAs, test Shapiro-Wilks W de normalidad, correlaciones lineales simples de Pearson y regresiones múltiples fueron realizadas con el programa *STATISTICA 5.0*. El criterio de significación mínimo requerido fue de $p=0.05$. Para considerar las regresiones se buscó que fueran significativas y que **r** fuera mayor que 0.6 o menor que -0.6.

En los estudios biomecánicos consultados encontramos diferencias tanto en el número de fases como en la determinación de los instantes que las definen. Cada grupo de investigación toma sus propios criterios y la comparación entre resultados es difícil.

En este trabajo se definieron 5 fases. La **Fase Inicial** va desde el punto más bajo del peso al inicio de lanzamiento hasta el primer instante en que los pies están en el aire. La **Fase de desplazamiento** hasta

que la planta entera del pie derecho está en el suelo. La **Fase de Transición** hasta que el pie izquierdo contacta con el suelo; y la **Fase Final** que se divide en la **Primera mitad**, hasta que el peso despega del cuello del lanzador y la **Segunda mitad**, hasta el último instante de contacto del peso con el lanzador.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado se estructurará en función de los tres objetivos planteados en la introducción.

A. Metodología de análisis.

Para optimizar el análisis biomecánico del lanzamiento de peso con videogrametría 3D y dos cámaras es recomendable colocar una en la parte posterior del círculo y la otra al lado derecho, visto desde atrás, para el estilo lineal de lanzadores diestros. Si colocamos la cámara lateral al lado izquierdo, caso del Cto. de España Málaga '96, en la fase final encontramos picos en la gráfica de desviaciones estándar de las coordenadas del codo derecho (Figura 3). En esta fase final la extremidad superior derecha realiza su acción principal que es determinante para el resultado y debemos evitar que los puntos que la definen se encuentren ocultos. Estos picos no se aprecian en las gráficas de desviación en los otros campeonatos donde los picos de error se encuentran en la fase inicial en las que el movimiento de la extremidad superior derecha es menos trascendente.

La metodología de análisis utilizada ha alcanzado en este estudio una alta precisión. Los resultados de

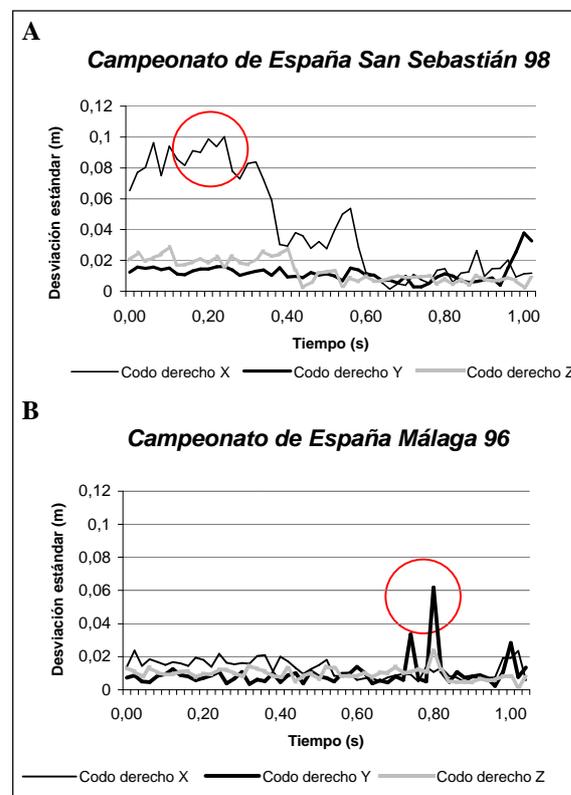


FIGURA 3.- Desviaciones estándar de las coordenadas X, Y y Z del codo derecho colocando la cámara lateral a la derecha del círculo (A) y a la izquierda (B). En la gráfica B se observan picos de altas desviaciones cerca de la liberación, precisamente en los momentos en que conviene tener una mayor precisión en los resultados.

reproducibilidad mediante ANOVAs con las coordenadas de cinco digitalizaciones diferentes de un mismo lanzamiento reflejan la semejanza de los conjuntos de datos. Además las desviaciones estándar son muy bajas siendo los puntos con mayor desviación el de la mano izquierda (0.054 m) y el del codo

REPRODUCIBILIDAD EN LA DIGITALIZACIÓN

ANOVAs			DESVIACIONES ESTÁNDAR	
Mejores				
Tobillo izquierdo	F: 0.011	p = 0.999	Tobillo izquierdo	0.015 m
Peso	F: 0.011	p = 0.999	Metatarso izquierdo	0.016 m
Talón izquierdo	F: 0.009	p = 0.999	Centro de hombros	0.017 m
Peores				
Metatarso derecho	F: 0.198	p = 0.896	Mano izquierda	0.054 m
Talón derecho	F: 0.122	p = 0.933	Codo derecho	0.046 m
Rodilla derecha	F: 0.103	p = 0.955	Muñeca izquierda	0.044 m

TABLA 2.- Mejores y peores resultados en la reproducibilidad de los diferentes puntos del modelo tras digitalizar 5 veces un mismo lanzamiento.

derecho (0.046 m) (Tabla 2). Un aspecto importante para conseguir una alta reproducibilidad, tal como se ha realizado en este trabajo, es la dedicación de un solo digitalizador que se instruya en el movimiento a estudiar.

Se obtuvo un nivel de extrapolación medio del 16.5%, que muestra el buen ajuste del sistema de referencias elegido a la disciplina del lanzamiento de peso. Con esta estructura y la disposición periférica de los puntos control se consigue un bajo nivel de extrapolación en el lanzamiento de peso, aspecto importante para evitar errores de reconstrucción ^(7, 9, 12, 29).

B. Descripción del modelo técnico individual.

Destaca la gran estabilidad del modelo técnico individual estudiado y asimismo la **proximidad al modelo técnico ideal** que se describe en la literatura. El movimiento de las extremidades inferiores es el más estable encontrándose variables como el ángulo de la rodilla derecha en la posición inicial, en la posición de despegue y en la posición de fuerza o el ángulo de la rodilla izquierda en la posición de despegue y final entre las que tienen menor desviación estándar (Tabla 3).

También destaca en el *modelo técnico individual* analizado la **ausencia de fase de transición**. Sólo en 2 lanzamientos de los 11 analizados se produce fase de transición. La toma de contacto del pie izquierdo

se produce simultánea o anteriormente al apoyo del talón derecho en el suelo. Con esto se consigue una mayor fluidez del lanzamiento conectando la fase de desplazamiento y fase final sin una *fase pasiva* del movimiento, tal como definen diferentes autores a la fase de transición ^(4, 6, 14, 15, 25).

El comportamiento de las extremidades inferiores tiene un papel determinante para el rendimiento del lanzador. Destaca la utilización de la variante técnica *corta-larga* caracterizada por un deslizamiento corto y una distancia entre los pies grande en la *posición de fuerza* ^(15, 20, 24). Esta variante es definida como una técnica de velocidad ⁽¹⁴⁾. La distancia de deslizamiento de Manuel Martínez ha sido de 0.75 ± 0.07 m mientras que la distancia entre las puntas de los pies fue de 0.97 ± 0.07 m. Con esta variante se consigue una trayectoria final del peso mayor. En la fase final el peso recorrió en horizontal 1.43 ± 0.08 m de 2.26 ± 0.08 m en todo el lanzamiento. De esta forma se consigue un recorrido final mayor, en el que se puede aplicar fuerza sobre el peso durante más tiempo, con lo que se puede alcanzar una velocidad de salida más alta ^(2, 13, 18, 24).

El peso recorre en las tres primeras fases 0.39 ± 0.05 m en sentido vertical mientras que en la fase final el peso asciende 1.01 ± 0.06 m. En las primeras fases el aumento de la altura se debe al erguimiento del tronco ya que el peso permanece pegado al cuello del lanzador, por lo que para no incrementar su altura

ESTABILIDAD DEL MODELO	
VARIABLES MAS ESTABLES	VARIABLES MENOS ESTABLES
<ul style="list-style-type: none"> . Distancia de lanzamiento. . Distancia de vuelo. . Velocidad de salida. . Ángulo de la rodilla derecha en la posición inicial. . Ángulo de la rodilla derecha en la posición de despegue. . Ángulo de la rodilla derecha en la posición de fuerza. . Ángulo de la rodilla izquierda en la posición de despegue. . Ángulo de la rodilla izquierda en la posición final. . Ángulo del codo derecho en la posición final. . Velocidad del peso en la posición final. . Orientación del pie derecho en la posición inicial. 	<ul style="list-style-type: none"> . Ángulo de desviación lateral. . Duración entre el despegue del pie izquierdo y la liberación. . Distancia transversal recorrida por el peso en la fase inicial. . Distancia transversal recorrida por el peso en la fase de desplazamiento. . Giro pélvico escapular en la fase de desplazamiento. . Variación del ángulo de la rodilla izquierda en la segunda mitad de la fase final. . Variación del codo derecho en la fase de desplazamiento. . Ángulo de inclinación del tronco en la posición final.

TABLA 3.- Variables más estables y menos estables del modelo técnico de lanzamiento de Manuel Martínez.

será recomendable mantener el tronco inclinado hacia atrás, cerca del muslo derecho ^(11, 15, 22).

Como se puede apreciar en las primeras fases, se intenta realizar un corto desplazamiento del peso, tanto horizontal como verticalmente. Con ello se consigue una **trayectoria final mayor**, en la que aplicar durante más tiempo fuerza directamente al artefacto y alcanzar la mayor velocidad de salida posible.

Uno de los aspectos que se consideran claves para el lanzamiento es el **ángulo pélvico escapular**. Para alcanzar su máxima apertura es importante realizar un correcto lanzamiento de la extremidad inferior izquierda en la fase inicial. En este periodo aumenta el ángulo pélvico escapular ($34.1 \pm 9.9^\circ$). Para lograr un elevado ángulo en esta fase es importante también mantener la cintura escapular perpendicular respecto a la dirección de lanzamiento ^(2, 17, 21, 26).

En la *fase inicial* también se realiza el giro más importante del pie derecho ($51.3 \pm 6.4^\circ$) que representa el 68.31% del giro total que realiza este segmento hasta su apoyo en la *posición de fuerza*. Estos datos concuerdan con la postura de Winch ⁽²⁷⁾ que indica que el giro del pie derecho debe iniciarse **antes de que pierda contacto con el suelo** frente a Grigalka ⁽¹⁶⁾ que afirma que el giro debe comenzar durante la fase de desplazamiento.

C. Variables determinantes del rendimiento.

La orientación de los pies en la posición de fuerza va a determinar en gran medida el resultado del lanzamiento. El giro final del pie derecho e izquierdo se encuentran en el grupo de variables con mayor R^2 respecto a la distancia de lanzamiento (R) (Tabla 4) y la velocidad de salida (V_0) (Tabla 5). En la posición de fuerza el pie derecho debe alcanzar una posición próxima a los 90° respecto a la dirección de lanzamiento y el izquierdo debe apuntar en este sentido. Manuel Martínez logra un ángulo de $100.9 \pm 5.2^\circ$ con el pie derecho y $35.8 \pm 5^\circ$ con el izquierdo (Figura 4). Cuanto más grandes son estos ángulos más se deben girar los pies en la fase final, lo cual repercute de forma negativa en el resultado del lanzamiento.

Un aspecto importante de cara a lograr un óptimo lanzamiento es la acción de bloqueo que debe realizar

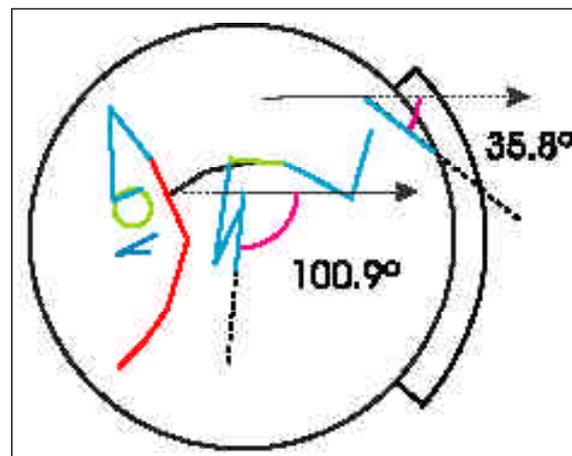


FIGURA 4.- Orientación de los pies derecho e izquierdo respecto a la dirección del lanzamiento en la posición de fuerza (visión cenital).

la extremidad inferior izquierda en la primera mitad de la fase final ^(5, 6, 10). La flexión de la rodilla izquierda debe ser mínima en esta fase para producir el giro de la cintura pélvica teniendo en el lado izquierdo el eje de giro. Un desplazamiento de la cadera izquierda perjudicaría directamente la transmisión de la cantidad de movimiento angular de la cintura pélvica a la escapular.

Otro aspecto muy estudiado en el lanzamiento de peso ha sido **la trayectoria que debería seguir el artefacto** para optimizar las fuerzas aplicadas sobre él. El peso no sigue una línea recta desde el inicio del lanzamiento hasta la liberación. En la trayectoria vista desde el lateral aparece un aplanamiento durante la parte final de la fase de desplazamiento y transición, que no hay que tomarlo como un error técnico, siempre que no se produzca un descenso acusado de la altura del peso (Figura 5). Por otro lado, desde una vista superior se observa, en la primera mitad de la fase final, una curva en la trayectoria debida al giro de la línea de hombros (Figura 5). Esta trayectoria coincide con las que determina Zatsiorsky y cols ⁽³⁰⁾ en lanzadores de alto nivel.

Las acciones realizadas por el lanzador en la fase final son determinantes para la distancia conseguida. En el grupo de mayor R^2 con la distancia de lanzamiento se encuentran variables tales como la distancia horizontal y vertical recorrida por el peso en la segunda mitad de la fase final, el giro final de los pies y la variación del ángulo de la rodilla izquierda en la primera y segunda mitad de la fase final (Tabla 3). Es

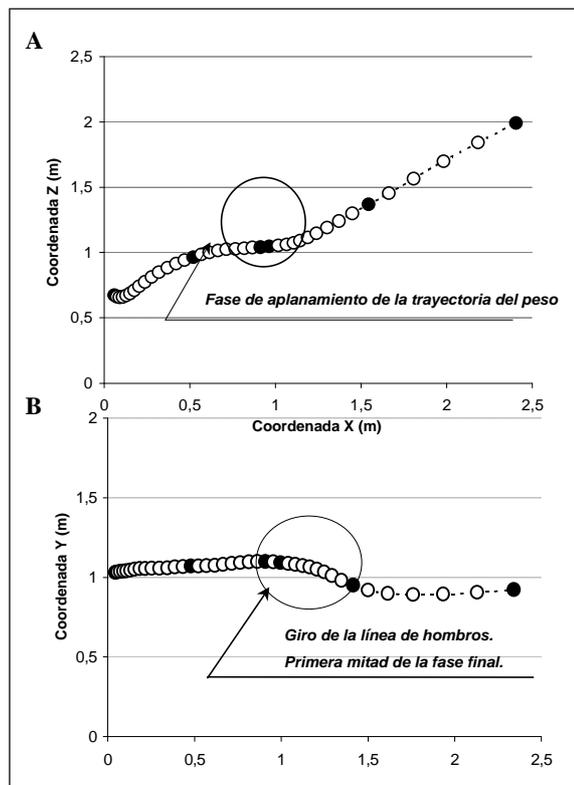


FIGURA 5.- Trayectoria del peso vista desde una visión lateral (A) y cenital (B).

preciso señalar que tanto el recorrido final del peso como el giro final de los pies son el resultado de las acciones precedentes por lo que no sólo se debe centrar la atención del estudio del lanzamiento en estas variables sino también a las que las determinan, como el erguimiento del tronco o el giro de los pies en la fase inicial y desplazamiento.

La **velocidad de salida** (V_0), el **ángulo de salida** (α_0) y la **altura de liberación** (h_0) son las variables que determinan directamente el éxito o fracaso del lanzamiento. De ellas, la que más determina el resultado del lanzamiento es V_0 seguida de α_0 y h_0 . Por sí solas alcanzan un R^2 de 0.995 con la distancia del lanzamiento. Es de destacar que de forma individual ni α_0 ni h_0 presentan correlación significativa con esta distancia. La técnica deportiva hay que entenderla como una estrecha interacción de variables en la que la variación de una determina el cambio de las demás y del resultado.

Manuel Martínez podría estar por encima de los 21 m, como ya ha sucedido este año, con un leve, pero difícil, aumento de V_0 y α_0 . Conjugando una V_0 de

REGRESIONES CON LA DISTANCIA DEL LANZAMIENTO

VARIABLE DEPENDIENTE: DISTANCIA DE LANZAMIENTO	
Grupo de Variables Independientes	R^2
<ul style="list-style-type: none"> V_0 (1.2). α_0 (0.6). h_0 (0.5). Distancia horizontal recorrida por el peso en la segunda mitad de la fase final (-0.1). Distancia vertical recorrida por el peso en la segunda mitad de la fase final (0.15). Giro final del pie izquierdo (-0.08). Giro final del pie derecho (-0.05). Variación del ángulo de la rodilla izquierda en la primera mitad de la fase final (0.02). Variación del ángulo de la rodilla izquierda en la segunda mitad de la fase final (0.03). 	$R^2: 0.999$

TABLA 4.- Grupo de variables que presentan muy buena regresión con la distancia del lanzamiento.

REGRESIONES CON LA VELOCIDAD DE SALIDA

VARIABLE DEPENDIENTE: VELOCIDAD DE SALIDA (V_0)	
Grupo de Variables Independientes	R^2
<ul style="list-style-type: none"> Giro final del pie izquierdo (-4.4). Orientación del deslizamiento (3.31). Inclinación del tronco en la posición final (-0.85). Distancia horizontal recorrida por el peso en la segunda mitad de la fase final (0.65). Distancia vertical recorrida por el peso en la segunda mitad de la fase final (5.13). Duración de la segunda mitad de la fase final (-5.8). Variación del ángulo del codo derecho en la segunda mitad de la fase final (-0.4). 	$R^2: 0.983$

TABLA 5.- Grupo de variables que presentan muy buena regresión con la velocidad de salida.

13.6 m/s, con un α_0 de 36° y una h_0 de 2.44 m se logra pasar de los 21 m. Esto implica trabajar en la mejora de V_0 ya que los valores de las otras dos variables ya han sido alcanzados e incluso superados en los lanzamientos analizados. Sería ideal aumentar V_0 hasta los 13.5-13.6 m/s con un α_0 de $36-37^\circ$ y una h_0 de 2.44 m. Con estos valores las marcas de Manuel Martínez estarían entre los 20.67 m y los 21.21 m, como ha sucedido varias veces esta última temporada.

De cara a una aplicación práctica de los resultados al análisis biomecánico del lanzamiento de peso se observa que en los grupos de mayor R^2 con las principales variables del lanzamiento hay muchas que coinciden, por lo que sería conveniente incluirlas en las planillas de valoración del lanzamiento de peso. Así, hemos variado nuestra hoja de valoración rápida usada en los Campeonatos analizados, adaptándola a estos resultados para futuros análisis. En esta nueva planilla se incluyen un conjunto de varia-

bles complementarias, que son las que definen aspectos claves del lanzamiento, como son: el movimiento final de pies, el deslizamiento, el recorrido final del peso, el ángulo pélvico escapular, el movimiento final de la rodilla izquierda, el movimiento final del codo derecho y el cambio de inclinación del tronco (Figura 6).

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo han sido:

1- La localización idónea de las cámaras en lanzadores diestros, que utilicen la técnica lineal, se consigue colocando una en la parte posterior del círculo y la otra en el lado derecho, visto desde detrás del círculo.

2- Para conseguir una reproducibilidad alta en estudios de videogrametría 3D es recomendable formar y emplear un solo digitalizador durante todo el análisis.

3- En las planillas de análisis biomecánico se deben incluir las variables que determinan la velocidad, ángulo y altura de liberación.

4- El modelo técnico individual estudiado no presenta fase de transición.

5- La estabilidad del modelo técnico estudiado es muy alta, destacando el movimiento de las extremidades inferiores. Las extremidades inferiores realizan la denominada variante técnica: corta-larga. La rodilla izquierda hay que bloquearla en la primera mitad de la fase final y extenderla lo más posible en la segunda mitad de la fase final.

6- El recorrido del peso, tanto en visión lateral como cenital se ajusta al modelo técnico ideal descrito en la literatura. Durante la fase de desplazamiento y transición se produce un aplanamiento de la trayectoria del peso en visión lateral que no debe considerarse un error técnico a no ser que implique un descenso

La imagen muestra una hoja de valoración rápida de un lanzamiento de peso, organizada en secciones para diferentes variables. En la parte superior, se indica el nombre del atleta y el resultado. Las secciones principales son:

- Variables Principales:** Incluye variables como 'Desplazamiento', 'Transición', 'Liberación', 'Codo', 'Rodilla', 'Pie', 'Tronco', 'Pies', 'Peso', 'Rodilla', 'Codo', 'Pie', 'Tronco', 'Pies'.
- Variables Secundarias:** Incluye variables como 'Velocidad', 'Ángulo', 'Altura'.
- Variables Complementarias:** Incluye variables como 'Estabilidad', 'Reproducibilidad', 'Error técnico'.

El formulario está diseñado para ser utilizado por un analista biomecánico para evaluar el rendimiento de un lanzador de peso en diferentes aspectos técnicos.

FIGURA 6.- Hoja de valoración rápida que se propone tras la experiencia adquirida en los diferentes campeonatos analizados.

importante de la altura del peso. La trayectoria del peso vista desde arriba no sigue una línea recta, apareciendo una curva debida al giro de la cintura escapular durante la primera mitad de la fase final. Durante la fase inicial, desplazamiento y transición el tronco permanece inclinado hacia la parte posterior del círculo, lo que permite aumentar la trayectoria final del peso.

7- En la fase inicial se realiza el principal giro del pie derecho y el balanceo de la extremidad inferior izquierda, que produce el incremento más importante del ángulo pélvico escapular. En la posición de fuerza el pie izquierdo debe tener una orientación lo más cercana posible a la dirección de lanzamiento y el pie derecho perpendicular para que el giro final de los pies sea menor.

B I B L I O G R A F I A

- 1 AGUADO, X.: "Eficacia y técnica deportiva. Análisis del movimiento humano". 1993. INDE. Barcelona.
- 2 AGUADO, X., IZQUIERDO, M., GONZÁLEZ, J.L., LÓPEZ, J.L., BURÓN, C.: "Análisis biomecánico del lanzamiento de peso: técnica lineal frente a la técnica de rotación". *RED*, 1997; XI, 1: 27-32.
- 3 ABDEL-AZIZ, Y.I., KARARA, H.M.: "Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry". 1971. *Proceedings ASP/VI Symp. On Close-Range photogrammetry*.
- 4 ALVAREZ DEL VILLAR, C., DURÁN, J.P.: "Atletismo Básico". 1982. Editorial Miñón, Valladolid.
- 5 BAERT, J.P.: "Shot Put, General description of motion". *Canadian Track and Field*. Association Canadienne d'athlétisme: 1984; 40-44.
- 6 BRAVO, J.: "Lanzamiento de peso". En "Atletismo (III)". Comité Olímpico Español. Madrid. 1983; 13-101.
- 7 CHALLIS, J.H.: "A Multiphase Calibration Procedure for the Direct Linear Transformation". *Journal of Applied Biomechanics*. 1995; 11: 351-358.
- 8 CHALLIS, J.H., KERWIN, D.G.: "Accuracy assessment and control point configuration when using the DLT for photogrammetry". *Journal of Biomechanics*. 1992; 25, 9: 1053-1058.
- 9 CHEN, L., ARMSTRONG, C.W., RAFTOPOULUS, D.D.: "An investigation on the accuracy of three dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique". *Journal of Biomechanics*. 1994; 27, 4: 493-500.
- 10 CRAMER, J.L.: "Anatomy of Al Feuerbach's Putting Style". *Scholastic Coach*. 1976; 45(8): 20-21, 91.
- 11 DOHERTY, K.: "Al Feuerbach, U.S.A. Master of Shot-Put Technique". *Scholastic Coach*. 1977; 46(8): 28-29
- 12 GAZZANI, F.: "Comparative assessment of two algorithms for calibrating stereophotogrammetric systems". *Journal of Biomechanics*. 1993; 26(12): 1449-1454.
- 13 GRANDE, I., LÓPEZ, J. L., MEANA, M., AGUADO, X.: "Aplicación al entrenamiento especial de la fuerza del estudio cinemático del lanzamiento de peso". *Archivos de Medicina del Deporte*. 1999; XVI (70): 133-141.
- 14 GRANDE, I., LÓPEZ, J. L., MEANA, M., AGUADO, X.: "Biomecánica de los miembros inferiores en la técnica lineal del lanzamiento de peso en los finalistas del Campeonato de España de Atletismo en Sebastián'98". *Archivos de Medicina del Deporte*. 1999; XVI (75): 31-39.
- 15 GRANDE, I.: "Cinemática del modelo técnico individual del lanzamiento de peso". 2001. Tesis Doctoral. Universidad de León. León.
- 16 GRIGALKA, O.: "Sobre la técnica de lanzamiento de peso. Situación actual y perspectiva" capítulo 6 en "Cuadernos de Atletismo nº 6: jabalina y peso". 1987. Real Federación española de Atletismo. Escuela Nacional de Entrenadores, centro de Documentación, Madrid.
- 17 GRIGALKA, O., PAPANOVA, V.: "Shot-put Technique Analysis: Udo Beier". *Soviet Sport Review*. 1980;15(1) 34-36
- 18 HAY, J.G.: "The Biomechanics of Sports Techniques". 1973. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey.
- 19 KNUDSON, L.E.: "A Biomechanical analysis of power vs. Speed techniques in shot put putting". "Techniques in Athletics". The First International Conference, Keinote Symposia. 1990; 588-608.
- 20 LARSEN, B.: "Variations in Shot Put Methods and their Application". *Track and Field Quarterly Review*. 1992; 92(3): 9-11.
- 21 REDDING, J.A.: "General Thoughts on Training and Coaching Throwing Events". *Track and Field Quarterly Review*. 1998; 88(3): 15-20.
- 22 SCHMOLINSKY, G.: "Los lanzamiento", capítulo 5 en "Atletismo". 1981. Editorial Augusto Pila Teleña, Madrid.
- 23 STEPANEK, J.: "Finding of the IAAF biomechanical research concerning shot put". "Techniques in Athletics" The First International Conference, Keinote Symposia. 1990; 625-627.
- 24 TURK, M.: "Building a Technical Model for the Shot Put". *Track Coach*. 1997; 141: 4489-4499.
- 25 VINUESA, M., COLL, J.: "Tratado de atletismo". 1984. Editorial Esteban Sanz, Madrid.
- 26 WARD, L.J. "Know-Fault putting". *Scholastic coach*, 1977; 46(9): 102-103.
- 27 WINCH, M.: "The next revolution in the shot put" en "The Throws". 1980. Jess Jarver. Book Division of Track & Field News. Los Altos, California.
- 28 WOLTING, H.J.: "A Fortran package for generalized, cross-validatory spline smoothing and differentiation". *Adv. Eng. Software*. 1986; 8, 2: 104-113.
- 29 WOOD, G.A., MARSHALL, R.N.: "The accuracy of DLT extrapolation in three dimensional film analysis". *Journal of Biomechanics*. 1986; 19, 9: 781-785.
- 30 ZATSIORSKY, V.M., LANKA, G.E., SHALMANOV, A.A.: "Biomechanical analysis of shot putting technique". *Exercise and Sport Sciences Reviews*. 1981: 353-389.