

ANALISIS BIOMECANICO BIDIMENSIONAL

Navarro E.

**Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte –INEF-
Universidad Politécnica de Madrid**

Introducción

Uno de los objetivos de la biomecánica deportiva es el análisis de la técnica deportiva en 3D. Para ello, se utilizan principalmente sistemas de fotogrametría video basados, en la mayoría de los casos, en el algoritmo conocido como DLT (Direct Linear Transformation). Este procedimiento ha demostrado ser muy preciso y fácil de implementar por lo que ha sido utilizado masivamente en el Análisis Biomecánico. En algunas ocasiones, el tipo de movimiento y los requerimientos del trabajo hacen que el investigador esté interesado exclusivamente en el movimiento en el plano. En estos casos el principal objetivo suele ser el estudio de las variables cinemáticas (posiciones, distancias, velocidades, aceleraciones) solo en dos de las tres dimensiones del espacio. Existen tres situaciones claramente diferenciadas donde es factible aplicar un Análisis Biomecánico Bidimensional: 1) Cuando se analiza la técnica deportiva en movimientos desarrollados principalmente en un plano como un salto de longitud, la carrera, el pedaleo, etc. 2) cuando se investiga sobre deportes cíclicos y 3) cuando se estudia el movimiento en deportes de equipo.

A continuación mostraremos estos los tres tipos de Análisis Biomecánico Bidimensional, describiendo en primer lugar la metodología utilizada y a continuación presentando los resultados de algún estudio real ya publicado.

Análisis de Técnica Deportiva en 2D. Caso 1: Análisis Biomecánico de la Carrera en Triatlón (Cala, 2007, 2009, 2010).

Para el análisis de actividades deportivas donde se considera que el movimiento se realiza en un mismo plano, normalmente se han utilizado técnicas derivadas del empleo del método de Escala Lineal y sus variaciones para obtener las coordenadas reales a partir de las coordenadas de una imagen de video. Las ventajas que proporciona esta técnica son su facilidad de uso y el empleo de un tratamiento matemático relativamente sencillo para el cálculo de las coordenadas reales a partir de las imágenes capturadas.

Si se utiliza el método de Escala Lineal, la cámara debe situarse horizontal al suelo y totalmente perpendicular al plano de movimiento objeto de análisis. Posteriormente, se emplea un objeto de dimensiones conocidas que se coloca en el mismo plano y sirve para convertir las coordenadas de la imagen en coordenadas espaciales. Asimismo, es necesario el incluir factores de escala verticales y horizontales de forma separada.

En algunas ocasiones no es posible situar el eje óptico de la cámara perpendicular al plano de movimiento. En esas circunstancias, los ángulos que definen la orientación de la cámara pan, roll e inclinación deben ser calculados.

El algoritmo de la "Transformación Lineal Directa" DLT (Abdel-Aziz & Karara, 1971), es una técnica de reconstrucción de coordenadas muy utilizada en análisis en 3 dimensiones de actividades deportivas. Una de las ventajas que posee esta técnica radica en la libre colocación de las cámaras con una alta precisión de los datos obtenidos. En el caso del análisis en el plano (DLT-2D) no es necesario que el eje óptico de la

cámara esté perpendicular al plano de movimiento. En este caso para calibrar las cámaras es necesario situar en el plano cuatro o más puntos de coordenadas conocidas.

Brewin & Kerwin (2003), analizaron los errores que se obtenían empleando una escala lineal y usando DLT-2D. Los resultados mostraron que sólo en los casos en los que el ángulo de inclinación de la cámara era cercano a 0° (-1° - $+2^\circ$) la diferencia entre ambas técnicas era mínima. En cambio, en el caso de la escala lineal, el error aumentaba al aumentar el grado de inclinación de la cámara.

El principal objetivo de la presente investigación ha sido definir el perfil de rendimiento técnico de la carrera durante la competición en triatlón desde un punto de vista biomecánico. Para ello, se necesitaba desarrollar y validar una técnica experimental que fuera lo suficientemente precisa (validez interna), con una alta fiabilidad y con una gran validez externa (ecológica) debido a que el trabajo se realizaba durante una competición oficial.

La muestra la formaron un total de 64 deportistas: 32 triatletas participantes en la Copa del Mundo de Triatlón de Madrid-2008 (16 hombres y 16 mujeres) y 32 triatletas participantes en el Clasificatorio del Campeonato de España Elite (16 hombres y 16 mujeres). El análisis de la técnica de carrera de los deportistas se realizó mediante un sistema fotogramétrico en 2d que permitió calcular las coordenadas (x,y) de los centros articulares con un error de 1.66% en el eje x y de un 2.10% en el eje y. Las imágenes fueron obtenidas por una cámara que filmaba el movimiento en un plano sagital del triatleta. Algoritmos basados en la DLT (Abdel-Aziz & Karara, 1971) permitieron conocer las coordenadas reales a partir de las coordenadas digitalizadas en el plano y posteriormente las distintas variables analizadas. La utilización de esta técnica permitió calcular sin interferencia con el atleta, variables como la velocidad de carrera, longitud y frecuencia de zanca, oscilación vertical de la cadera, posición de la cadera respecto al apoyo y los ángulos de las rodillas y los tobillos.

Los resultados obtenidos en el presente estudio de investigación han avalado la utilización de la fotogrametría-video en 2d para el análisis de la técnica de carrera durante la competición en triatlón. Su aplicación en una competición de máximo nivel internacional ha posibilitado conocer el perfil técnico que presentan los triatletas a lo largo del segmento de carrera a pie. Del mismo modo, se ha podido demostrar como los estudios realizados en laboratorio no reflejan la realidad competitiva de un triatlón de máximo nivel. Un mayor detalle sobre los resultados de este estudio puede encontrarse en Cala (2007, 2009, 2010).

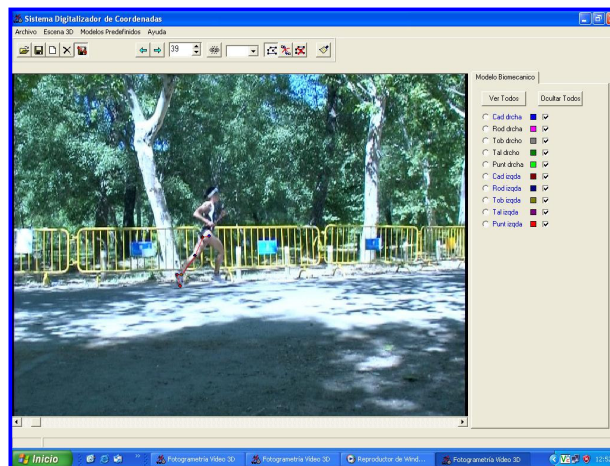


Figura 1. Digitalización de imágenes en un estudio bidimensional

Análisis Biomecánico 2D en deportes cíclicos. Caso 2: Análisis de la Competición en Natación (Veiga, 2007⁽¹⁾, 2007⁽²⁾, 2010⁽³⁾).

Los estudios centrados en el análisis de la competición en natación se inician en los años 70 con los trabajos de varios autores que estudian las variables cíclicas de nado (frecuencia de ciclo y longitud de ciclo) y su relación con la velocidad de nado. A partir de estos trabajos, otros autores como Hay y Guimaraes (1983) comienzan a dividir la prueba en diferentes partes, de forma que se pueda analizar el tiempo empleado en cubrir cada uno de esos parciales.

Hay y Guimaraes (J. G. M. Hay & Guimaraes, 1983) propusieron un modelo de análisis compuesto de tres partes: el tiempo de salida, el tiempo de nado y el tiempo de viraje. Según esta propuesta, cualquier prueba en natación está conformada por tres partes independientes desde el punto de vista motriz lo cual supone un gran avance en la labor de organizativa de los entrenadores.

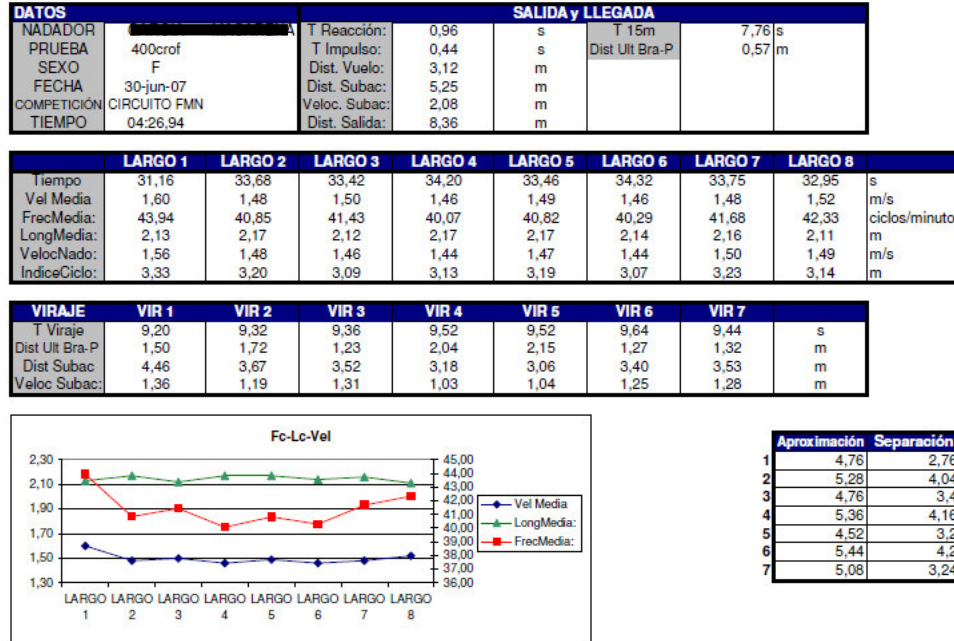
Algunos de los estudios que se han desarrollado siguiendo la línea marcada por Hay utilizan la digitalización de las imágenes para marcar la posición exacta del nadador en determinados momentos de la prueba. Sin embargo, las dificultades metodológicas relativas a la medición de variables espacio-temporales en el agua, provocó que para el estudio de tiempo de salida, tiempo de nado y tipo de viraje, la mayoría de estudios hayan utilizado distancias prefijadas y comunes a todos los nadadores. Estas distancias prefijadas, aún permitiendo una mejor comparación entre nadadores no parecen diferenciar tan exactamente los elementos técnicos de salida, nado y viraje.

A pesar de la gran implantación del modelo de Análisis de la Competición, en los últimos años el número de publicaciones sobre esta temática en revistas internacionales de impacto parece descender, lo que sugiere un cierto estancamiento del modelo. Ante esta situación, ya hay voces que reclaman y proponen nuevos modelos de análisis de la competición que puedan aportar nuevos datos de ayuda al entrenador y al nadador.

Frente al método de las distancias prefijadas, en la presente investigación se propone la utilización la fotogrametría 2D mediante el algoritmo DLT-2D. La gran ventaja de este método es que permite el cálculo de la posición nadador ciclo a ciclo y por tanto facilita la obtención de las longitudes y las frecuencias de ciclo de todas las brazadas. Otra gran ventaja es que se obtienen las distancias reales de salida y de viraje. Posiblemente una de las grandes utilidades de esta nueva técnica es el estudio de la salida y los virajes.

Las imágenes se registran con 3 cámaras (en el caso de una piscina de 50 metros) colocadas en las gradas de la piscina. Las cámaras se calibran tomando 4 o más punto de coordenadas conocidas en el plano de la lámina de agua. Las imágenes se digitalizan manualmente y los píxeles se transforman a metros mediante mencionado algoritmo DLT-2D. Finalmente, se calculan las variables del estudio. Los datos finales aportan dos tipos de resultados: 1) en forma de informes individualizados del rendimiento del nadador (Figura 2) y 2) en forma de publicaciones científicas (Navarro, 2006; Veiga, 2007; Cala, 2007; Veiga, 2010).

ANÁLISIS DE LA COMPETICIÓN



LABORATORIO DE BIOMECÁNICA DEPORTIVA
INEF-MADRID

Figura 2. Informe Análisis de la Competición

Análisis Biomecánico 2D en deportes cíclicos. Caso 3: Análisis de la Competición en Atletismo (González, 2009).

Otra aplicación del análisis biomecánico bidimensional es al análisis de las carreras en atletismo. De nuevo hay que mencionar, que la gran mayoría de los estudios realizados se han basado en la medición de tiempos parciales (cada 10m en las pruebas de velocidad y en el primer apoyo tras cada valla en las pruebas de vallas) lo que permite conocer las amplitudes y frecuencias de zancada medias en cada intervalo (Mackala, 2007). Por otro lado se han realizado estudios de análisis biomecánico en 3D y 2D que han analizado variables temporales y espaciales pero solo considerando unas zancadas determinadas o una fase concreta de la carrera.

Se presenta en esta ocasión un trabajo desarrollado sobre las pruebas de velocidad y vallas durante el Campeonato del Mundo de Atletismo en pista cubierta Valencia, 2008. Se trata de un estudio de Análisis Biomecánico Bidimensional mediante fotogrametría video 2D basada en el algoritmo DLT. Las variables determinadas fueron la longitud, frecuencia y velocidad de ciclo así como las distancias a las vallas.

Análisis Biomecánico 2D en deportes de equipo. Caso 4: Análisis Biomecánico de los árbitros de fútbol (Mallo, 2004, 2007, 2008(1), 2008(2), 2009)

Al estudiar el movimiento de los árbitros de fútbol, las variables cinemáticas fundamentales determinantes del rendimiento físico y técnico son: distancia total recorrida, velocidad en cada instante, distancia a las faltas y distancia a la línea del fuera de juego. Son muchos los autores que han estudiado el movimiento sobre el campo realizado por jugadores y árbitros, sin embargo, la mayoría de los procedimientos utilizados se han basado en la categorización del movimiento (andar, trotar, correr etc) y la determinación posterior de la distancia a partir del tiempo medido en las distintas categorías; en definitiva sin obtener la velocidad real del árbitro. D'Ottavio and Castagna (2001) utilizaron dos cámaras de video sobre trípodes con goniómetros para determinar la posición del árbitro sobre el terreno; este método presenta el inconveniente de que solo permite medir la posición de 1 sujeto simultáneamente, lo que impide el estudio de las distancias a las faltas o los fuera de juego. El método que presentamos para este estudio está basado en la grabación del movimiento con cámaras de video y el cálculo de la posición de uno o varios sujetos sobre el plano del campo a partir de procedimientos fotogramétricos.

El presente trabajo ha sido apoyado por el Departamento de Arbitraje de la FIFA en colaboración con el Laboratorio de Biomecánica del INEF de Madrid. Hasta la fecha el proyecto se han desarrollado en 8 eventos de carácter internacional: 2 campeonatos del mundo Sub17 (Finlandia 2003, Egipto 2009), 2 campeonatos del mundo Sub20 (Moscú 2006, Nigeria 2009), 1 campeonato mundial de Clubs (Abu Dhabi 2009), 2 Copas Confederación (Alemania, 2005, South Africa, 2009) y 1 Copa del Mundo (South Africa 2010). El principal objetivo de este estudio ha sido apoyar científicamente al Departamento de Arbitraje de la FIFA colaborando en el proceso de evaluación del rendimiento de los árbitros y árbitros asistentes. Para cumplir con este fin, se han propuesto dos objetivos específicos:

- 1) La Valoración del Rendimiento Técnico durante el desarrollo del torneo (Feedback a Corto Plazo)
- 2) El Estudio del Rendimiento Físico y Técnico (Feedback a Medio: Informe Final).

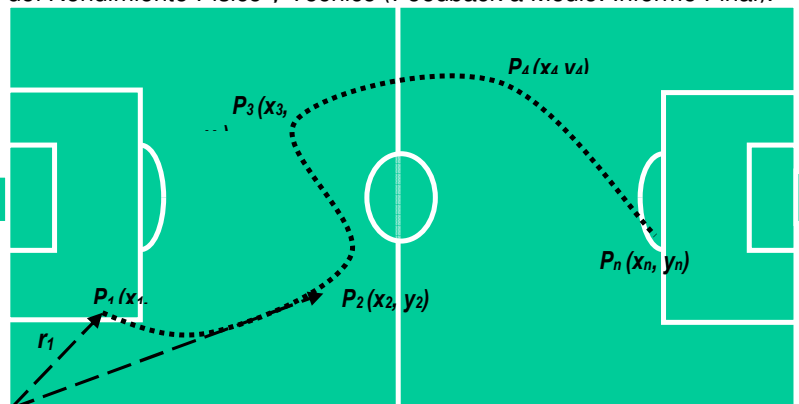


Figura 3 Trayectoria descrita por un árbitro durante sus movimientos en un partido.

Las imágenes del partido fueron registradas mediante 3 cámaras de video digitales situadas en las gradas del estadio. Las imágenes eran capturadas directamente a la memoria de un ordenador. Previamente, se realizaron las medidas de los puntos de control situados en el campo lo que permitió realizar la calibración de cada cámara. La transformación de la posición en pixels de un punto (sobre una imagen no perpendicular) en coordenadas reales se realizó mediante el algoritmo DLT (Direct Linear Transformation (Abdel Aziz y Karara, 1971)). Tanto la validez (RMS) como la fiabilidad (Intervalo de Confianza) fueron sido

calculadas previamente obteniéndose error absoluto máximo de 30 cm. El error relativo en la determinación de la distancia entre dos puntos fue calculado previamente al tratamiento de los datos estando su valor por debajo del 2% de la distancia medida. Las coordenadas (x, y) de las posiciones ocupadas sucesivamente por el sujeto (proyección del centro de masas) a lo largo del partido fueron filtradas e interpoladas mediante funciones spline de quinto orden. La velocidad instantánea se determinó derivando las funciones $x(t)$ e $y(t)$. Con el objetivo de tener una mayor resolución temporal, en el cálculo de las distancias a las faltas y a la línea del fuera de juego, la captura de las imágenes se realizó a 25 Hz. La distancia fue calculada como el módulo del vector entre dos puntos.

Resultados. Con el objetivo de dar un mejor servicio de apoyo a la valoración del rendimiento de los árbitros en los torneos, se entregan dos tipos de resultados o informes: 1) Informe Preliminar después de cada partido (feedback inmediato) y 2) Informe Final (feedback a medio plazo –máximo 3 semanas-).

Informe Preliminar después de cada partido (Feedback inmediato). Al día siguiente después del partido, se entrega un informe al staff técnico del Departamento de Arbitraje de FIFA en la que se analizan las faltas y los fuera de juego con la siguiente información: 1) Distancia del árbitro a la falta 2) Distancia del Asistente a la falta cuando ésta se produce en un punto cercano a su banda 3) Distancia del balón a la barrera y 4) Distancia del asistente y del atacante a la línea del Fuera de Juego. Los resultados son discutidos en la reunión técnica y son entregados a los árbitros.

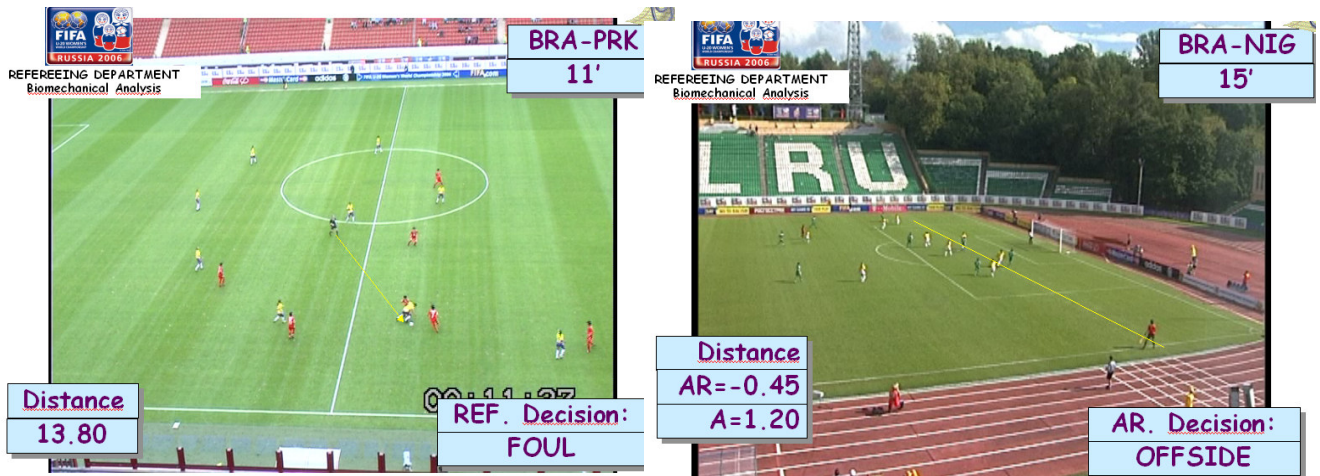


Figura 4 Distancia del árbitro a la falta.

Con el fin de interpretar las situaciones de fuera de juego, el árbitro asistente debe situarse en línea con el penúltimo defensor (línea del fuera de juego). Este gesto técnico es de especial relevancia (Figura 4); en efecto, si el árbitro asistente se encuentra retrasado (distancia negativa) o adelantado (distancia positiva) respecto a la línea real de fuera de juego real, éste percibirá una línea de fuera de juego incorrecta aumentando así la probabilidad de equivocarse.

Informe Final (Feedback medio plazo). Una vez acabado el torneo se realiza un informe detallado del rendimiento técnico y físico de los árbitros; la entrega se realiza a las 2 o semanas dependiendo del número de partidos analizados.

El informe tiene dos partes, en una se presenta un estudio (en forma de ficha) de cada uno de los árbitros y asistentes y en otra el estudio de la muestra de árbitros y asistentes. Las fichas de cada uno de los árbitros contienen la siguiente información:

- 1) Distancia Recorrida: A lo largo de todo el partido, En intervalos de 15 minutos y en intervalos de 5'.

Distance Covered	10258 m
Mean Distance All Referees (n=9)	10218 m
Difference with Mean	+40 m

First Half	5286 m
Second Half	4972 m
Difference	-314 m
Difference (%)	-5.94%

Figura 5 Extracto del Informe de un árbitro de la Copa Confederación 2005.

En la figura 5 se puedan observar los datos correspondientes a un árbitro en un encuentro celebrado en la Copa Confederación de Alemania en el 2005. Este árbitro internacional recorrió un total de 10.258 m, 40 m más que la media de todos los árbitros del torneo. La distancia recorrido en el segundo tiempo fue ligeramente inferior en el segundo tiempo.

- 2) Análisis de la velocidad (time-motion análisis). Distancia total y porcentual recorrida a las distintas velocidades, distancia recorrida en cada tiempo a las distintas velocidades, Porcentaje de tiempo que interviene en las distintas velocidades.

En la Figura 6, correspondiente al mismo árbitro, se observa que casi el 60% de la distancia recorrida la realizó corriendo (velocidad por encima de los 2 m/s). La demanda de esfuerzo a alta intensidad para un árbitro en un partido internacional es muy considerable; en este caso la distancia en sprint fue de 1611 (15.71 % de la distancia total).

Mode of Lomotion	Distance Covered	% Total
Standing Still (0-1 m/s)	2070	20.18%
Walking (1-2 m/s)	2200	21.44%
Jogging (2-3,6 m/s)	2673	26.06%
Cruising (3,6-5 m/s)	1703	16.61%
Sprinting (>5 m/s)	1611	15.71%

Figura 6 Extracto del Informe de un árbitro de la Copa Confederación 2005.

- 3) Ejercicio a alta intensidad. Distancia total y porcentual corriendo rápido y a sprint y Tiempo gastado a alta intensidad en intervalos de 15 minutos.
- 4) Estudio técnico. Trayectoria a lo largo de cada periodo de tiempo, distancia a las faltas.

Bibliografía

- Abdel-Aziz, Y.I. y Karara, H.M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry. En *ASP Symposium on close range photogrammetry*, (Editado por American society of photogrammetry.), ASP, Falls Church, 1-18.
- Brewin, M. A., & Kerwin, D. G. (2003). Accuracy of scaling and DLT reconstruction techniques for planar motion analyses. *Journal of Applied Biomechanics*, 19(1), 79-88 Tota No. of Pages: 10.
- Cala, A., Veiga, S. y Navarro, E. (2007). El apoyo biomecánico al entrenamiento puede contribuir a la mejora del rendimiento en natación. *NSW*, Vo (XXVII), nº 4, 7-12.
- Cala, A., Veiga, S., García, A., y Navarro, E. (2009). Previous cycling does not affect running efficiency during a triathlon world cup competition. *Journal of Sport Medicine and Physical Fitness*, 49, 152-159.
- Cala, A., Cejuela, R. y Navarro, E. (2010). Biomechanical analysis of the 10km-run in a triathlon world cup event: differences presented by women gold medal. *Journal of Human Sport and Exercise online*, Vol V, nº 10, 24-32.
- González Frutos, P., Mallo, J., Veiga, S., Navarro, E. (2009) Estudio Biomecánico Zancada a Zancada: 7'52 Récord de España de 60 m vallas Masculino de Jackson Quiñonez. *Atletismo Español (Revista de la Real Federación Española de Atletismo) Nº 625*, 56-59.
- Mallo, J. & Navarro, E (2004) Analysis of the load imposed on under-19 soccer players during typical football training drills. *Journal of Sports Sciences*, 22, 510-511.
- Mallo, J. , Garcia-Aranda, J.M. & Navarro, E, (2007) Activity profile of top-class association football referees in relation to performance in selected physical tests. *Journal of Sports Sciences* 25 (7), 805-813.
- Mallo, J. Y Navarro, E. (2008) Physical load imposed on soccer players during small-sided training games. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* Juni, 48 (2): 166-171.
- Mallo, J. , Navarro, E, Garcia-Aranda, J.M, Bart, G. & Werner, H. (2008) Analysis of the kinematical demands imposed on top-class assistant referees during competitive soccer matches. *Journal of Strength and Conditioning Research* 22 (1): 235-242.
- Mallo, J., Navarro, E., García-Aranda, B. & Helsen, W. (2009) Activity profile of top-class association football referees in relation to fitness test performance and match standard. *Journal of Sports Sciences*, VOL 27(1): 9-17.
- Navarro, E, mallo, J. Cala, A. Y Veiga.S. (2007). Analysis of sport performance by mean a dlt-2d based photogrammetric system. En *XXIV Internacional Symposium on Biomechanics in Sports* (Editado F. Muller, International Society of Biomechanics on Sports), Salzburg, 594-597.
- D´ottavio, S. y Castagna, C. (2001). "Analysis of match activities in elite soccer referees during actual match play". *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15 (2): 167-171.
- Veiga, S.; Cala, A.; Navarro, E. (2006) El Apoyo Biomecánico al Entrenamiento Puede Contribuir a la Mejora del Rendimiento en Natación, *NSW* (Revista de la Asociación Española de Técnicos de Natación), Nº 4, Vol. XXVIII, Octubre-Diciembre 2006.
- Veiga, S., Cala, A., Navarro, E. (2007) Variables Críticas del Viraje de Espalda en Natación: Evolución a lo largo de la Prueba e Influencia del Nivel del Nadador. *Biomecánica, Sociedad Ibérica de Biomecánica y Biomateriales*, Noviembre 2007
- Veiga, S., Cala, A., González Frutos, P., Navarro, E. (2010) The Validity and Reliability of a Procedure for Competition Analysis in Swimming Based on Individual Distance Measurements. *Proceedings of the XIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming*, Oslo 16th-19th June 2010, pp. 182-185.