

Deporte con dispositivos de posicionamiento global (GPS): Aplicaciones y limitaciones¹

Julen Castellano* y David Casamichana**

SPORT WITH GLOBAL POSITIONING DEVICES (GPS): APLICATIONS AND LIMITATIONS

KEY WORDS: integrated technology, reliability, validity, accuracy, physical activity.

ABSTRACT: In this paper a non-exhaustive review of the applicability and the limitations of GPS devices in sport have been detailed. The work explains the key aspects that technicians and researchers in this setting should keep in mind about the features of this kind of system while they maximize their advantages. The issues addressed are the following: operation, limitations, alternatives in the types of variables that they can register, opportunities to sync with video files or to see 2D representation of the players motion in the field (for more detailed analysis), and the possibility to use in 'real time'. Furthermore, the GPS technology is taking its first steps to provide information not only about the physical or energy demands from the athletes, but also about collective behaviour that players and teams use in their activity (match, small-side games, etc.). Knowing their limitations and maximizing their applications, users would be able to obtain big benefits from the GPS devices in order to apply them in training and match analysis of performance. This technology can help coaches and athletes in the development of their jobs or activities with accuracy, immediacy and informational wealth.

En el presente documento se hace una revisión no exhaustiva sobre la aplicabilidad y limitaciones de los dispositivos GPS en el ámbito deportivo. En el trabajo se detallan aspectos claves que técnicos e investigadores deberían considerar para valorar los límites de su aplicabilidad al tiempo que maximizar su uso. Las temáticas que se abordan pueden concretarse en las siguientes: funcionamiento, limitaciones, diferentes usos motivados por la variedad en la tipología de variables que registra, oportunidades de sincronización con el vídeo o con la representación 2D del movimiento de los jugadores en el espacio (para posteriores análisis más pormenorizados), así como la disponibilidad de la información en 'tiempo real'. Además, la tecnología GPS está dando sus primeros pasos para aportar información no solo de las demandas físicas o energéticas de los deportistas, sino también de las conductas colectivas que jugadores y equipos despliegan en sus actividades (partidos, juegos reducidos, etc). Valoradas las limitaciones y maximizadas sus aplicaciones los usuarios podrán beneficiarse de los dispositivos GPS cuando se apliquen al análisis del rendimiento en la competición (si se permite) y el entrenamiento. Esta tecnología puede ayudar a entrenadores y atletas en el desarrollo de sus trabajos o actividades con precisión, inmediatez y riqueza informacional.

Desde hace décadas, la monitorización de los movimientos desarrollados por los deportistas durante el entrenamiento o la competición esta siendo un tema de interés para los científicos del deporte (Carling, Bloomfield, Nelsen y Reilly, 2008; Castellano y Casamichana, 2014; Liebermann, Katz, Hughes, Bartlett, McClements y Franks, 2002). El seguimiento realizado posibilita conocer los requerimientos físicos a los que son sometidos los jugadores (Barbero-Álvarez, Soto y Granda, 2005; Reilly y Thomas, 1976; Rienzi, Drust, Reilly, Carter y Martin, 2000), permitiendo intervenir de una forma específica en el entrenamiento y evaluar el rendimiento durante las competiciones (Barros et al., 2007).

En este sentido, diversas tecnologías se han utilizado para el registro del movimiento de los deportistas (Casamichana, 2011). Laboriosas técnicas de registro manual (Reilly y Thomas, 1976), han ido evolucionando hacia grabaciones magnetofónicas (Mayhew y Wenger, 1985; O'Donoghue, Boyd, y Bleakley, 2001), tabletas digitales (Dufour, 1993; Partridge, Mosher y Franks, 1993) o *softwares* específicos (Bloomfield, Polman, y O'Donoghue, 2007; Rienzi et al., 2000), llegando a los sistemas más modernos como las técnicas de registro semiautomático a través de vídeo o *videotracking*. Entre estos últimos, los más

Correspondencia: Julen Castellano Paulis. Universidad del País Vasco, UPV/EHU. Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Departamento de Educación Física y Deportiva. Portal de Lasarte, 71. 01007, Vitoria-Gasteiz. E-mail: julen.castellano@ehu.es

¹ Este trabajo forma parte de la investigación "Evaluación del proceso de entrenamiento y la competición en el fútbol de formación", que ha sido subvencionado por la universidad del País Vasco (UPV/EHU), durante el periodo 2012-14 [Código 13523].

* Universidad del País Vasco.

** Escuela Universitaria de Fisioterapia y Logopedia Gimbernat-Cantabria (EUG) adscrita a la Universidad de Cantabria. Torrelavega, España.

Fecha de recepción: 14 de Noviembre de 2012. Fecha de aceptación: 10 de Marzo de 2014.

conocidos, los sistemas *AMISCO* francés (Castellano, Blanco-Villaseñor y Álvarez, 2011), *ProZone* inglés (Di Salvo, Gregson, Atkinson, Tordoff y Drust, 2009), y los menos, como el *TRACAB* sueco (<http://www.tracab.com/>) o el *Verusco* de Nueva Zelanda (<http://www.verusco.com/>). Actualmente existen alternativas que permiten el registro de manera totalmente automática, es decir, sin intervención humana como el *Venetrack* que es un sistema de *videotracking* (Redwood-Brown, Cranton y Sunderland, 2012), los sistemas basados en radiofrecuencia (Frencken, Lemmink y Delleman, 2010) o los sistemas de posicionamiento global (*Global Positioning System* o GPS), siendo estos últimos uno de los más extendidos en la actualidad con una gran producción científica (Dobson y Keogh, 2007).

Precisamente, debido al gran desarrollo experimentado en los últimos años (Pino, Padilla, Pérez, Moreno y De la Cruz, 2008) merecen especial atención los sistemas de posicionamiento global (GPS), que en este trabajo serán analizados, poniendo sobre la mesa cuestiones que tienen que ver con su funcionamiento, las posibles aplicaciones en el ámbito deportivo, sus ventajas y limitaciones. Con esta aportación, de manera no exhaustiva, se pretende dar una amplia visión sobre la utilización actual de los dispositivos GPS, así como las tendencias de futuro.

Funcionamiento básico del sistema GPS

Los dispositivos GPS completan un sistema de radionavegación vía satélite desarrollado y gestionado por el departamento de defensa de los EEUU, creado originalmente con fines militares. El proyecto que se inició en el año 1973, terminó de complementarse en marzo de 1994 y está totalmente operativo desde julio de 1995, permite determinar en tiempo real por triangulación, la ubicación (coordenadas espaciales) las 24 horas del día, en cualquier lugar de la tierra y bajo cualquier condición atmosférica, tanto de puntos estáticos como en movimiento con un índice de error de pocos metros (Krenn, Mag, Titze, Pekka, Jones y Ogilvie, 2011; Sánchez-Medina y Pérez-Caballero, 2006). Este sofisticado sistema, que hoy se utiliza con regularidad, es posible gracias al descubrimiento de la resonancia magnética que permitió a su vez la creación de relojes atómicos de elevada precisión y que son la base de esta tecnología (Rigden, 2000).

El sistema GPS se divide en tres segmentos: espacial, control y usuario. Los segmentos espaciales y control son gestionados por EEUU (aunque esperamos que de aquí a algunos años el sistema europeo GALILEO pueda estar en funcionamiento, lo que mejorará substancialmente las prestaciones de los dispositivos). El segmento espacial está formado por 27 satélites emisores de las señales. El segmento control está constituido por un conjunto de estaciones de elevada precisión situadas estratégicamente en la tierra, incluyendo una estación principal o maestra y varias antenas terrestres. Finalmente, el segmento usuario corresponde a los receptores GPS que han sido diseñados para recibir y decodificar las señales transmitidas por los satélites. Los satélites transmiten señales a los receptores GPS para determinar la ubicación, velocidad y dirección de los dispositivos (Schutz y Herren, 2000).

La tecnología GPS consiste, fundamentalmente, en un sistema de medición de tiempos, cuyo punto de referencia es el cálculo del tiempo de retardo entre la emisión de las señales a través de los satélites y la llegada de dicha señal a los dispositivos receptores GPS. Un receptor GPS debe recibir la señal de al menos tres satélites para localizar la posición (Larsson, 2003). Utilizando esta información, un dispositivo de estas

características puede calcular y registrar información referente a la velocidad y la distancia recorrida principalmente (Reid, Duffield, Dawson, Baker y Crespo, 2008). Cada satélite está equipado de un reloj atómico, que se sincroniza con el receptor GPS. Entonces el satélite envía información horaria (a la velocidad de la luz) referente de la hora exacta al receptor GPS. Comparando el tiempo dado por los satélites y el tiempo del receptor GPS, se calcula el tiempo del recorrido realizado por la señal. Posteriormente se estima la distancia recorrida por la señal, ya que se conoce el tiempo de trayecto y la velocidad a la cual es realizado dicho trayecto (Larsson, 2003).

Aplicaciones en el ámbito del deporte

Posteriormente al uso militar se extendió su aplicación a otros ámbitos como a la aviación, la marina, seguimiento de animales (Von Hünerbein, Hamann, Rüter y Wiltshko, 2000), uso recreacional (Larsson, 2003; Witte y Wilson, 2004), estudios de la locomoción (Terrier, Ladetto, Merminod y Schutz, 2001; Terrier y Schutz, 2003) y actualmente, al control de atletas en deportes y actividades físicas realizadas al aire libre. Ya están disponibles comercialmente dispositivos que utilizan la tecnología GPS para excursionistas, cicloturistas y corredores. Aunque originariamente fueron adaptados para deportistas que cubrían largas distancias durante el entrenamiento, posteriormente, debido al avance experimentado y *softwares* específicos, se han ido incorporando a otras disciplinas, destacándose su aplicación en los deportes colectivos (Dobson y Keogh, 2007). La utilización de la tecnología GPS (Aughey, 2011) se ha extendido al deporte de competición, puesto que puede proporcionar información precisa sobre las demandas del juego y jugador en los deportes de equipo (Jennings, Cormack, Coutts, Boyd y Aughey, 2010b).

Habitualmente, los dispositivos receptores portátiles GPS se introducen en una pequeña mochila almohadillada (arnés) incorporada a la espalda del jugador, justo debajo del cuello. Este arnés es ajustado de manera que no se mueva y no provoque ningún malestar durante su uso. Además, estos dispositivos permiten registrar datos referentes al tiempo, posición, altitud y dirección, además de registrar la frecuencia cardíaca cuando el jugador está en posesión de una banda torácica. En consecuencia, el espectro de información registrado por los dispositivos es muy amplio y son convertidas en multitud de variables de diferente índole, tales como: distancia recorrida (en metros y expresada en términos relativos a la distancia total recorrida) o duración de carrera (en segundos o en términos relativos al total), distancia o tiempo de desplazamiento a diferentes rangos de velocidad de carrera, velocidad instantánea, media y máxima, *work/rest ratio*, frecuencia de carreras a diferentes intensidades, saltos, acciones de alta intensidad repetidas (Buchheit, Mendez-Villabueva, Simpson y Bourdoun, 2010b), por poner algunos ejemplos. Todas ellas, variables que tienen que ver con el espacio, el tiempo, y sus derivaciones.

Hace algunos años con la implementación del acelerómetro en los dispositivos GPS se ha abierto una nueva dimensión en la monitorización y cuantificación de la carga (Casamichana, Castellano, Calleja-González y San Román, 2011), a partir, sobre todo, de indicadores globales como el *player load* (Casamichana, Castellano, Calleja, San Román y Castagna, 2012) o el total *body load* (Gómez-Piriz, Jiménez-Reyes y Ruíz-Ruiz, 2011), parámetros diseñados por las marcas comercializadoras del producto. Aunque todavía están también en vías de desarrollo

(Hauswirth, Le Meur, Couturier, Bernard y Brisswalter, 2009), la información aportada por los acelerómetros (y giroscopios) podría tener la ventaja de dar valores sobre impactos y cargas características de los deportes intermitentes de alta intensidad, con aceleraciones y cambios de dirección constantes (Varley, Aughey y Pedrana, 2011) que parecen subestimarse (Varley, Elias y Aughey, 2012). Los indicadores de carga global como el *metabolic power* (Gaudino, Iala, Alberti, Hawkinsm Strudwick y Gregson, 2014) resultantes de ellos quizás puedan representar de una manera más fidedigna y, por tanto válida, las demandas físicas de la competición o el entrenamiento (Casamichana et al., 2012).

Conocedores de las variables que puede llegar a aportar los GPS, el uso primario y más común de estos dispositivos en el mundo del deporte (especialmente en deportes de situación) ha sido describir los desplazamientos que realizan los deportistas durante la competición, extendiéndose el uso de esta tecnología a multitud de deportes como el fútbol (Barbero-Álvarez, Barbero-Álvarez, Gómez y Castagna, 2009; Barbero-Álvarez, Barbero-Álvarez y Granda, 2007; Barbero-Álvarez, Barbero-Álvarez, Granda y Gómez, 2009; Barbero-Álvarez, Gómez, Barbero-Álvarez, Granda y Castagna, 2008; Buchheit, Mendez-Villanueva, Simpson y Bourdoun, 2010a; Harley, Barnes, Portas, Lovell, Barret, Paul y Weston, 2010), fútbol sala (Barbero-Álvarez y Castagna, 2007), fútbol playa (Castellano y Casamichana, 2010), fútbol-7 (Casamichana, San Román-Quintana, Castellano y González-Calleja, 2012), fútbol australiano (Aughey, 2010; Brewer, Dawson, Heasman, Stewart y Cormack, 2010; Coutts, Quinn, Hocking, Castagna y Rampinini, 2010; Wisbey, Montgomery, Pyne y Rattray, 2010), rugby (Coughlan, Green, Pook, Toolan y O'Connor, 2011; Cunniffe, Proctor, Baker y Davies, 2009; MacLellan, Lovell y Gass, 2010), hockey (Gabbett, 2010), cricket (Petersen, Pyne, Dawson, Portus y Kellet, 2010; Petersen, Pyne, Portus y Dawson, 2011) y tenis (Reid et al., 2008), en un intento de analizar el perfil físico del deportista durante la competición, detectar la fatiga durante partidos, evaluar la capacidad física del deportista o monitorizar diferentes tareas de entrenamiento (Aughey, 2011).

La prohibición del uso de los dispositivos GPS en partidos oficiales de competición en algunos deportes (como es el caso del fútbol), ha provocado que su aplicación se haya extendido, sobre todo, en el proceso de entrenamiento (Hill-Haas, Dawson, Impellizzeri y Coutts, 2011). La monitorización de los jugadores en el entrenamiento permite conocer en qué medida el entrenamiento replica las demandas impuestas a los jugadores durante la competición (Casamichana y Castellano, 2011a). En este sentido, algunos autores han desarrollado investigaciones en este área en deportes colectivos como el fútbol australiano (Dawson, Hopkinson, Appleby, Stewart y Roberts, 2004), rugby (Hartwig, Naughton y Searl, 2011), hockey (Gabbett, 2010), cricket (Petersen, Pyne, Dawson, Kellet y Portus, 2011) o fútbol (Casamichana y Castellano, 2011a), observándose en general que durante los entrenamientos no se reproducen las demandas de alta intensidad de los partidos (Casamichana y Castellano, 2011a; Dawson et al., 2004; Hartwig et al., 2011).

De manera específica, multitud de trabajos han centrado su atención en la evaluación de las demandas físicas de los jugadores mediante la utilización de la tecnología GPS durante diferentes situaciones de juegos reducidos (JR), a los que se les ha modificado las dimensiones del terreno de juego, número de jugadores, duraciones, orientación del espacio, número de toques

permitidos por jugador (Hill-Haas et al., 2011; Little, 2009), entre otros.

Por otra parte, también se han utilizado los dispositivos GPS para ver la respuesta endocrina, inmunológica y daño muscular durante el partido (Thorpe y Sunderland, 2011), el efecto del nivel de capacidad física (Castagna, Impellizzeri, Cecchini, Rampinini y Álvarez, 2009; Castagna, Manzi, Impellizzeri, Weston y Barbero-Álvarez, 2010), el estrés térmico (Ozgunen et al., 2010) o la aplicación de diversos métodos de recuperación (Buchheit, Horobeanu, Mendez-Villanueva, Simpson y Bourdon, 2011; Rowsell, Coutts, Reaburn y Hill-Haas, 2011) sobre el rendimiento en competición.

Pero no son las demandas físicas las únicas beneficiadas de esta tecnología. La opción que ofrecen las aplicaciones informáticas que gestionan la información de los dispositivos GPS hacen viable al usuario los datos 'en bruto' que se han registrado, eso sí es *ex post facto*, aunque sigue en desarrollo el intento de hacerlo en tiempo real (Pino et al., 2008). Esta accesibilidad permite a los investigadores valorar aspectos tácticos del juego. En los deportes de interacción (Gréhaigne, Godbout y Zerai, 2011), las relaciones que se establecen entre los jugadores de un equipo con relación a los rivales toman protagonismo y son últimamente objeto de estudio. Así, ahora resulta posible conocer cómo se desarrolla el juego desde la perspectiva táctico-estratégica, es decir, considerando las relaciones interpersonales de los jugadores que conforman un equipo entendido este como un organismo superior o *superorganism* (Duarte, Araujo, Correia y Davids, 2012). Sampaio y Maçãs (2012) han aplicado los dispositivos GPS para el análisis del comportamiento dinámico en tareas de 5 vs. 5 con porteros analizando los valores de entropía interna en el seno del equipo en relación a la experiencia del jugador. Sigue la línea de otras propuestas observacionales (Castellano, Hernández Mendo, Morales-Sánchez y Anguera, 2007; Passos, Davids, Araujo, Paz, Minguéns y Mendes, 2011), radiofrecuencia (Frencken, De Poel y Lemmink, 2011) o *videotracking* (Frencken, De Poel, Visscher y Lemmink, 2012) que aunque utilizan diferentes técnicas de registro, proponen analizar la relación entre jugadores, equipos e interacción (Duarte et al., 2012) a partir de variables como: las superficies de juego que abarcan los equipos (*surface area*), *centroide* o centro geométrico del equipo (*Team centre*), lo compacto del equipo (*stretch index*), profundidad y anchura del equipo (*Team length and width*).

Fiabilidad, validez, precisión y otras limitaciones

Aunque estos sistemas de posicionamiento global han demostrado ser un método válido para determinar la posición de un sujeto durante estudios biológicos y biomecánicos (Schutz y Chambaz, 1997; Schutz y Herren, 2000; Terrier, Ladetto, Merminod y Schutz, 2000; Terrier y Schutz, 2003; Witte y Wilson, 2004), incluso se han encontrado resultados consistentes comparando pruebas realizadas en diferentes momentos del día, no afectando a los resultados la diferente configuración de los satélites (MacLeod, Morris, Nevill, y Sunderland, 2009; Petersen, Pyne, Portus y Dawson, 2009). Sin embargo, todavía cuenta con algunas limitaciones para su uso, fundamentalmente respecto a su fiabilidad, que debe ser optimizada. Algunas fuentes de error podrían ser las efemérides, errores de sincronización de los relojes, retardos en la recepción de la señal al propagarse por la troposfera e ionosfera, interferencias de la señal (error multicampo), errores relacionados con el propio receptor,

visibilidad de los satélites o la disponibilidad selectiva (Abad, 2005; Misra y Enge, 2006; Mohino, 2006) entre otras. En cualquier caso, los receptores GPS también incluyen el número de satélites que han estado operativos en cada registro de señal, lo que hace sencillo la eliminación de aquellos datos que no den las garantías necesarias de precisión. Un dispositivo de uso civil puede asegurar una precisión aproximada de 15-20 m en el plano horizontal y 27 en el plano vertical (Sánchez-Medina y Pérez-Caballero, 2006), y aunque si se necesita una mayor precisión en los cálculos se puede considerar la utilización del GPS diferencial o los sistemas de corrección diferencial en tiempo real (EGNOS para Europa), que permiten precisiones de 2 m (Larsson, 2003).

En referencia a esta cuestión, diferentes estudios han analizado la validez y fiabilidad de receptores GPS durante la locomoción humana en un ámbito recreativo (Schutz y Chambaz, 1997; Shutz y Herren, 2000; Townshend, Worringham, y Stewart, 2008). También lo han aplicado en contextos más específicos de los deportes colectivos (Castellano, Fernández, Castillo, y Casamichana, 2010; Coutts y Duffield 2010; Edgecomb y Norton, 2006; Portas, Harley, Barnes y Rush, 2010), donde se estimaron diferentes resultados debido a la utilización de diversos dispositivos GPS, frecuencias de muestreo, algoritmos utilizados, valoración de diferentes aspectos (velocidad media, máxima, posiciones, desplazamientos) o diferentes protocolos a realizar como trayectorias rectas, curvilíneas, cambios de dirección, diferentes velocidades, etc. (Macleod et al., 2009), pero en general obteniéndose en la mayoría de los casos resultados satisfactorios.

Para realizar la comparación entre diferentes trabajos debemos de tener presente el modelo de dispositivo que se utiliza (Castellano et al., 2010; Coutts y Duffield, 2010; Petersen et al., 2009), debido a los algoritmos asociados a cada uno de ellos (Macleod et al., 2009). La mayoría de estudios desarrollados en el ámbito del rendimiento deportivo en deportes de equipo han utilizado dispositivos que operan con una frecuencia de muestreo de 1 Hz (Barbero-Álvarez, Coutts, Granda, Barbero-Álvarez, y Castagna, 2010; Coutts y Duffield, 2010; Gray, Jenkins, Andrews, Taaffé y Glover, 2010; MacLeod et al., 2009), otros han comparado unidades de GPS de 1 y 5 Hz (Castellano et al., 2010; Jennings, Cormack, Coutts, Boyd y Aughey, 2010a; Petersen et al., 2009; Portas et al., 2010), o analizado únicamente dispositivos GPS de 5 Hz (Casamichana y Castellano, 2011b; Johnston, Gibson, Twist, Gabbett, Macnay y Macfarlane, 2012) o de 10 Hz (Castellano, Casamichana, Calleja-González, San Román y Ostojic, 2011), y escasos han sido los trabajos que han comparado dispositivos de 5 y 10 Hz (Johnston, Watsford, Pine, Spurrs y Sporri, 2013; Varley, Fairweather y Aughey, 2011). A groso modo, parece que una mayor frecuencia de muestreo podría aumentar la precisión de los datos aportados por estos aparatos (Castellano et al., 2011; Duffield, Reid, Baker y Spratford, 2010). En los GPS analizados por Castellano y sus colegas (2011) que tuvieron una frecuencia de muestreo de 10 Hz obtuvieron mejores resultados en carreras de 30 m (error típico, ET = 0.2 m; coeficiente de variación, CV = 0.7 %, sesgo = 6.5 % y error estándar de medida, SEE = 5.1 %) que los obtenidos en trabajos anteriores (Duffield et al., 2010; Petersen et al., 2009) cuando analizaron los dispositivos con una frecuencia de muestreo de 1 y 5 Hz. Recientemente un nuevo estudio (Johnston, Watsford, Kelly, Pine y Spurrs, 2013) ha valorado la fiabilidad, precisión y validez de los nuevos dispositivos que operan con frecuencias de muestreo de 15 Hz (GPSport) con los ya existentes de 10 Hz, sin encontrarse mejoras.

Cabe destacar también, que la mayoría de los estudios que han analizado la validez y fiabilidad de estas unidades, lo han hecho en situaciones estandarizadas o descontextualizadas del juego real (Barbero-Álvarez et al., 2009; Castellano et al., 2011; Coutts y Duffield, 2010) y solo unos pocos han respetado los elementos internos específicos propios de la competición (Castellano et al., 2010; Randers et al., 2010), es decir, recogiendo los datos en partidos amistosos diseñados *ad hoc*.

Además, pocos estudios han llevado a cabo la comparación de los datos obtenidos a partir de los GPS y otras técnicas de registro. Así por ejemplo, Edgecomb y Norton (2006) compararon los resultados obtenidos a través de seguimiento por ordenador (*computer-based tracking*) y dispositivos GPS (SPI10, GPSports); los jugadores realizaron 28 repeticiones a distintas velocidades en circuitos de diferente longitud y diseño geométrico (desde 125 m hasta 1386 m, con un promedio de 283 m). Ambos sistemas fueron comparados con distancias reales medidas con cinta métrica. Se utilizó la prueba *t* de Student para determinar las diferencias entre las distancias del GPS y distancias reales, y el error relativo a la técnica de medición (TEM%) para calcular la fiabilidad de cada una de las técnicas de medición. Las distancias obtenidas a través de los dispositivos GPS y las distancias reales fueron altamente correlacionadas ($r = .99$), aunque hubo diferencias significativas entre la distancia registrada por los GPS y las reales ($t = 5.27$, $df=58$, $p < .001$). En los 59 ensayos el error medio del sistema GPS fue 4.8 ± 7.2 %. La repetición por triplicado de las distancias recorridas por parte de un jugador en una serie de circuitos demuestra una moderada-alta fiabilidad (TEM del 5.5 %), siendo la correlación entre las medidas obtenidas por triplicado altamente significativa ($r = .99$). Los autores (Edgecomb y Norton, 2006) concluyen que tanto la tecnología GPS como el sistema de seguimiento basados en ordenadores implican errores sistemáticos, sobreestimando la distancia recorrida. Sin embargo, dichos errores son relativamente pequeños y predecibles, por lo que se considera que no se debe impedir el uso de cualquiera de estas tecnologías para monitorizar los desplazamientos de los deportistas. Por otro lado, Randers et al. (2010) compararon cuatro sistemas diferentes de análisis durante la realización de un partido amistoso de fútbol. Los sistemas estudiados fueron: monitorización a través de vídeo, sistema de seguimiento semiautomático, y dos dispositivos GPS con diferentes frecuencias de muestreo (1 y 5 Hz). Los resultados obtenidos indican que aunque todos los sistemas detectan de una manera similar la fatiga producida (a través del descenso en la distancia recorrida) durante el partido, existen diferencias entre ellas en la estimación de las distancias recorridas en cada una de las categorías de velocidad. Con los sistemas de *videotracking* y GPS de 5 Hz se registraron mayores distancias totales (alrededor de 1 km) que a través de los dispositivos GPS de 1 Hz y sistema de vídeo. Como puede interpretarse de los diferentes trabajos revisados la estimación de las distancias recorridas o las velocidades son altamente dependientes del sistema de registro utilizado, y estas diferencias deben ser tenidas en cuenta cuando se comparan resultados obtenidos a través de diferentes sistemas.

Además de lo señalado anteriormente, se debe tener en cuenta que estos dispositivos presentan una serie de debilidades cuando se comparan con otras técnicas de monitorización de los desplazamientos de los deportistas entre las que podemos destacar: la necesidad de colocar al jugador un dispositivo (Edgecomb y Norton, 2006), lo cual limita su uso en la competición y además, únicamente obtendremos resultados de

los jugadores monitorizados dentro de nuestro equipo y nunca información acerca de los jugadores del equipo rival (si es que no se prestan a llevar los dispositivos), y la imposibilidad de realizar registros en actividades cubiertas o la limitación para realizar registros en zonas urbanas, rodeadas con altos edificios, los cuales pueden interferir en la señal de los satélites (Dobson y Keogh, 2007). El coste económico es una cuestión que también debería sopesarse, ya que a pesar de ser más económicos que otros sistemas de registro como el *videotracking*, no están al alcance de cualquier bolsillo. Otra de las limitaciones de los dispositivos es que a pesar de utilizar baterías recargables, la duración de éstas no deja de ser más o menos corta, de entre 5 a 10 horas, lo que podría presentar alguna limitación para alguna actividad de larga duración. Por último, cabe señalar con respecto a la temporalidad que estos sistemas no pueden aplicarse a eventos ya ocurridos, a diferencia de otros dispositivos de registro como el del video análisis (Bloomfield et al., 2007).

Valor añadido: información en tiempo real y sincronización con el vídeo

La inmediatez de la información a partir de los datos registrados lo hace de fácil uso y accesible. Además, algunos dispositivos permiten obtener información en tiempo real y a pesar de no requerir del vídeo, los datos obtenidos pueden sincronizarse con el mismo para completar los análisis.

Con respecto a la posibilidad de obtener la información en tiempo real, a día de hoy es una realidad, aunque todavía con un amplio margen de mejora (Aughey y Fallon, 2010). La información en tiempo real se obtiene de los GPS mediante una antena conectada a un ordenador que permite la transmisión de la ubicación y desplazamientos de los dispositivos que transportan los jugadores (Figura 1). Un único trabajo se ha elaborado atendiendo a la fiabilidad de esta forma de registro (Aughey y Fallon, 2010). Comparando los valores obtenidos de fiabilidad durante dos partidos de fútbol australiano mediante el análisis tradicional a posteriori y el novedoso análisis en tiempo real (Aughey y Fallon,



Figura 1. Antena conectada al ordenador que detecta en tiempo real la ubicación y velocidad de los jugadores.

2010), se han obtenido altas correlaciones entre todas las distancias obtenidas mediante ambas mediciones ($r > .93$), pero con diferencias de hasta un 24 % en la distancia recorrida a sprint.

La disposición de datos en tiempo real abre las puertas no sólo para *describir* en el momento la acción de los jugadores, sino que además, podemos comenzar a dar un paso más, y hacer uso del *conocimiento acumulado* para sabiendo lo que hacen los jugadores (en diferido o en directo) hacer valoraciones *in situ* del rendimiento de futbolistas y equipos para tomar decisiones estratégicas que optimicen los resultados en la competición o el

entrenamiento; en relación a aspectos individuales, colectivos, físicos, técnico-tácticos, estratégicos, etc. Nos referimos a cuestiones como por ejemplo: detectar estados de forma insuficientes o estados de fatiga, desajustes espaciales en el planteamiento del sistema, sugerir caminos preferenciales de acción o alternativas ante una posible propuesta de juego rival, corregir ubicaciones, acordar o ajustar distancias entre líneas, provocar desequilibrios numéricos, y otros muchos que seguro que a entrenadores y preparadores interesa y les ayudaría en el proceso de intervención deportiva.

En cuanto a los *softwares* que permiten la sincronización con el video, suponen también un valor añadido para técnicos e investigadores. La secuencia temporal de los registros de velocidades, desplazamientos, aceleraciones etc., se simultanea con la visión del evento deportivo registrado, lo cual permite contextualizar la demanda energética del jugador con otro tipo de demandas altamente requeridas, sobre todo, en los deportes de interacción (Figura 2).

Esta opción abre la vía para completar la información física aportada por los dispositivos con un análisis estratégico del juego, donde los estados de stress, relajación o fatiga (por poner algunos ejemplos) de los jugadores pueden detallarse e interpretarse en el contexto del equipo e incluso del juego. En este sentido, la opción de disponer el perfil físico del jugador o jugadores al tiempo que su comportamiento táctico en el entrenamiento o competición, codificándose y registrándose las conductas en la propia aplicación informática enriquece, sobre manera, la actuación de jugadores y equipos en los entornos cambiantes de la acción de juego, tal y como ocurre en los deportes colectivos.



Figura 2. Interface del software SPRINT. En la parte izquierda se pueden ver las variables configuradas para cada uno de los jugadores. En la parte superior derecha podemos disponer del video grabado, así como (en la parte derecha abajo) la ubicación sobre el terreno de juego de los jugadores tomada el mapa desde Google Earth.

Conclusiones

A lo largo del documento se han expuesto algunos de los aspectos claves que informan sobre la utilidad de los dispositivos GPS aplicados al ámbito deportivo, a sabiendas de ciertas desventajas y limitaciones con las que podemos encontrarnos en su uso. Siendo conocedores de la información aportada por este sistema de monitorización serán los técnicos y/o investigadores quienes decidirán cómo aplicarlos en su quehacer diario y en qué medida puede ayudarles para planificar, controlar y evaluar aquellos aspectos del entrenamiento y la competición que consideren. Describir las demandas físicas, cuantificar las cargas de entrenamiento, individualizar los entrenamientos o detectar estados de fatiga o riesgos de lesión, entre otros, aplicados a optimizar el rendimiento deportivo en general, son algunas de las alternativas de aplicación que presenta este tipo de tecnología.

De manera emergente, cabe destacar su novedoso uso en el intento de hacer visible lo invisible del comportamiento colectivo de los jugadores en el seno de un equipo y en la interacción del juego. Un camino por explorar.

Justificando por lo expuesto en el texto podemos concluir también, que estos dispositivos son una herramienta comparable (en algunos casos mejores) a otras técnicas de monitorización de la carga externa utilizadas hasta la actualidad (Petersen et al., 2009), aunque todavía presenta ciertas limitaciones, sobre todo en cuanto a la fiabilidad y validez en la medición de carreras de alta intensidad y/o distancias reducidas. Sin embargo, dichos aparatos presentan una gran practicidad debido a su reducido tamaño y peso, coste no muy elevado y ahorro de tiempo que supone la posibilidad del análisis automático de múltiples jugadores y con un *feedback* inmediato o casi; aunque disponer de datos en tiempo real con un grado de fiabilidad aceptable está

por llegar. La inclusión de variables que no hacen referencia exclusiva a la locomoción, como son por ejemplo: giros, saltos, cambios de dirección o impactos (gracias a los giroscopios y acelerómetros que incorporan), son un valor añadido frente a otras alternativas para la cuantificación de la carga externa de los deportistas.

Finalmente, en cuanto a los *softwares* implementados por las casas comerciales, se puede concluir que cada vez son más potentes y flexibles, haciendo que en el tratamiento de la información se puedan manejar un elevadísimo número de

variables y niveles de éstas, configurables a posteriori. El volumen de información generado está 'obligando' a filtrar y optimizar los datos, incorporando indicadores globales que recojan el máximo de información de la manera más sencilla posible. Estos indicadores facilitan la programación, control y seguimiento de la demanda física (y táctica) de los deportistas. Análisis del movimiento a partir de los GPS, acompañado de variables fisiológicas (como la frecuencia cardiaca) y el video puede ser los ingredientes adecuados para un abordaje holístico del análisis del rendimiento en jugadores y equipos.

DEPORTE CON DISPOSITIVOS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS): APLICACIONES Y LIMITACIONES

PALABRAS CLAVE: Tecnología integrada, Fiabilidad, Validez, Precisión, Actividad física.

RESUMEN: En el presente documento se hace una revisión no exhaustiva sobre la aplicabilidad y limitaciones de los dispositivos GPS en el ámbito deportivo. En el trabajo se detallan aspectos claves que técnicos e investigadores deberían considerar para valorar los límites de su aplicabilidad al tiempo que maximizar su uso. Las temáticas que se abordan pueden concretarse en los siguientes: funcionamiento, limitaciones, diferentes usos motivados por la variedad en la tipología de variables que registra, oportunidades de sincronización con el vídeo o con la representación 2D del movimiento de los jugadores en el espacio (para posteriores análisis más pormenorizados), así como la disponibilidad de la información en 'tiempo real'. Además, la tecnología GPS está dando sus primeros pasos para aportar información no solo de las demandas físicas o energéticas de los deportistas, sino también de las conductas colectivas que jugadores y equipos despliegan en sus actividades (partido, juegos reducidos, etc). Valoradas las limitaciones y valoradas sus aplicaciones los usuarios podrán beneficiarse de los dispositivos GPS cuando se apliquen al análisis del rendimiento en la competición y el entrenamiento. Esta tecnología puede ayudar a entrenadores y atletas en el desarrollo de sus trabajos o actividades con precisión, inmediatez y riqueza informacional.

DESPORTO COM DISPOSITIVOS DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)

PALAVRAS-CHAVE: Tecnología integrada, Fidelidade, Validade, Precisão, Actividade física.

RESUMO: No presente documento faz-se uma revisão não exaustiva sobre a aplicabilidade e as limitações dos dispositivos GPS no âmbito desportivo. De igual modo, são detalhados os aspectos-chave que técnicos e investigadores devem considerar para avaliar os limites da sua aplicabilidade e maximizar o seu uso. As temáticas que se abordam podem concretizar-se no seguinte: funcionamento, limitações, diferentes usos motivados pela variedade na tipologia de variáveis que regista, oportunidades de sincronização com o vídeo ou com a representação 2D do movimento dos jogadores no espaço (para posteriores análises mais pormenorizadas), assim como a disponibilidade de informação em "tempo real". Adicionalmente, a tecnologia GPS está a dar os primeiros passos para fornecer informação não apenas das exigências físicas ou energéticas dos desportistas, mas também dos seus comportamentos colectivos que jogadores e equipas despendem nas suas actividades (jogos, jogos reduzidos, etc.). Avaliadas as limitações e as suas aplicações, os usuários podem beneficiar dos dispositivos GPS quando aplicadas a análises de rendimento em competição e treino. Esta tecnologia pode auxiliar treinadores e atletas no desenvolvimento dos seus trabalhos ou actividades com precisão, rapidez e riqueza informacional.

Referencias

- Abad, P. (2005). *Reducción del número de condición y deficiencia de rango en los sistemas de ecuaciones asociados a las observaciones de satélites*. Tesis Doctoral: Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Aughey, R. (2010). Australian football player work rate: evidence of fatigue and pacing? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 394-405.
- Aughey, R. (2011). Applications of GPS technologies to field sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 295-310.
- Aughey, R. y Fallon, C. (2010). Real-time versus post-game GPS data in team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(3), 348-349.
- Barbero-Álvarez, J. C., Barbero-Álvarez, V., Gómez, M. y Castagna, C. (2009). Análisis cinemático del perfil de actividad en jugadoras infantiles de fútbol mediante tecnología GPS. *Kronos: la revista científica de actividad física y deporte*, VIII(14), 35-42.
- Barbero-Álvarez, J. C., Barbero-Álvarez, V. y Granda, J. (2007). Perfil de actividad durante el juego en futbolistas infantiles. *Apunts: Educación física y deportes*, 90, 33-41.
- Barbero-Álvarez, J. C., Barbero-Álvarez, V., Granda, J. y Gómez, M. (2009). Demandas físicas y fisiológicas del fútbol 7 en categorías inferiores. *Kronos: la revista científica de actividad física y deporte*, VIII(14), 43-48.
- Barbero-Álvarez, J. C. y Castagna, C. (2007). Activity patterns in professional futsal players using global position tracking system. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6(Supl. 10), 208-209.
- Barbero-Álvarez, J. C., Coutts, A., Granda, J., Barbero-Álvarez, V. y Castagna, C. (2010). The validity and reliability of a global positioning satellite system device to assess speed and repeated sprint ability (RSA) in athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2), 232-235.

- Barbero-Álvarez, J. C., Gómez, M., Barbero-Álvarez, V., Granda, J. y Castagna, C. (2008). Heart rate and activity profile for young female soccer players. *Journal of Human Sport and Exercise*, 3(2), 1-11.
- Barbero-Álvarez, J. C., Soto, V. M. y Granda, J. (2005). Diseño, desarrollo y validación de un sistema fotogramétrico para la valoración cinemática de la competición en deportes de equipo. *Motricidad - European Journal of Human Movement*, 13, 145-160.
- Barros, R. M. L., Misuta, M. S., Menezes, R. P., Figueroa, P. J., Moura, F. A., Cunha, S. A., ...Leite, N. J. (2007). Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. *Journal of Sports in Science and Medicine*, 6(2), 233-242.
- Bloomfield, J., Polman, R. y O'Donoghue, P. (2007). Reliability of the Bloomfield Movement Classification. *International Journal of Performance Analysis of Sport*, 7(1), 20-27.
- Brewer, C., Dawson, B., Heasman, J., Stewart, G. y Cormack, S. (2010). Movement pattern comparisons in elite (AFL) and sub-elite (WAFL) Australian football games using GPS. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(6), 618-623.
- Buchheit, M., Horobeanu, C., Méndez-Villanueva, A., Simpson, B. M. y Bourdon, P. C. (2011). Effects of age and spa treatment on match running performance over two consecutive games in highly trained young soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 29(6), 591-598.
- Buchheit, M., Méndez-Villanueva, A., Simpson, B. M. y Bourdon, P. C. (2010a). Match running performance and fitness in youth soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 31(11), 818-825.
- Buchheit, M., Méndez-Villanueva, A., Simpson, B. M. y Bourdon, P. C. (2010b). Repeated-sprint sequences during youth soccer matches. *International Journal of Sports Medicine*, 31(10), 709-716.
- Carling, C., Bloomfield, J., Nelsen, L. y Reilly, T. (2008). The role of motion analysis in elite soccer: contemporary performance measurement techniques and work rate data. *Sports Medicine*, 38(10), 839-862.
- Casamichana, D. (2011). *La tecnología GPS aplicada a la evaluación del entrenamiento y la competición en fútbol*. Tesis Doctoral: Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
- Casamichana, D. y Castellano, J. (2011a). Demandas físicas en jugadores semiprofesionales de fútbol: ¿se entrena igual que se compete? *Cultura, Ciencia y Deporte*, 6(17), 121-127.
- Casamichana, D. y Castellano, J. (2011b). Validez y fiabilidad de dispositivos GPS de 5 Hz en carreras cortas con cambio de dirección. *Retos. Nuevas Tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*, 9(19), 30-33.
- Casamichana, D., Castellano, J., Calleja-González, J. y San Román, J. (2011). *The use of accelerometers to quantify the training load in soccer*. Poster presented at the 7th World Congress on Science & football, Mayo 26-30, Nagoya (Japan).
- Casamichana, D., Castellano, J., Calleja-González, J., San Román, J. y Castagna, C. (2012). Relationship between indicators of training load in soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Doi: 10.1519/JSC.0b013e3182548af1.
- Casamichana, D., San Román-Quintana, J., Castellano, J. y Calleja-González, J. (2012). Demandas físicas y fisiológicas en jugadores absolutos no profesionales durante partidos de fútbol 7: un estudio de caso. *Cultura, Ciencia y Deporte*, 7(29), 115-123.
- Castagna, C., Impellizzeri, F., Cecchini, E., Rampinini, E. y Barbero-Álvarez J. C. (2009). Effects of intermittent-endurance fitness on match performance in young male soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(7), 1954-1959.
- Castagna, C., Manzi, V., Impellizzeri, F., Weston, M. y Barbero-Álvarez J. C. (2010). Relationship between endurance field tests and match performance in young soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3227-3233.
- Castellano, J., Blanco-Villaseñor, A. y Álvarez, D. (2011). Contextual Variables and Time-Motion Analysis in Soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 32(6), 415-421.
- Castellano, J. y Casamichana, D. (2014). Alternativas en la monitorización de las demandas físicas en fútbol: pasado, presente y futuro. *Revista Española de Educación Física y Deporte*, 40(4), 41-58.
- Castellano, J. y Casamichana, D. (2010). Heart rate and motion analysis by GPS in beach soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9(1), 98-103.
- Castellano, J., Casamichana, D., Calleja-González, J., San Román, J. y Ostojic, S. M. (2011). Reliability and accuracy of 10 Hz GPS devices for short-distance exercise. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10(1), 233-234.
- Castellano, J., Fernández, J. C., Castillo, A., y Casamichana, D. (2010). Fiabilidad intra-participante de diferentes modelos de dispositivos GPS implementados en un partido de fútbol 7. *Cultura, Ciencia y Deporte*, 5(14), 83-95.
- Castellano, J., Hernández Mendo, A., Morales-Sánchez, V. y Anguera, M. T. (2007). Optimising a probabilistic model of the development of play in soccer. *Quality & Quantity*, 41(1), 93-104.
- Coughlan, G., Green, B., Pook, P., Toolan, E. y O'Connor, S. (2011). The relationship between physical game demands and injury rehabilitation in international rugby union: a global positioning system analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 45(4), 323.
- Coutts, A. y Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1), 133-135.
- Coutts, A., Quinn, J., Hocking, J., Castagna, C. y Rampinini, E. (2010). Match running performance in elite Australian rules football. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5), 543-548.
- Cunniffe, B., Proctor, W., Baker, J. y Davis, B. (2009). An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using global positioning system tracking software. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(4), 1195-1203.
- Dawson, B., Hopkinson, R., Appleby, B., Stewart, G. y Roberts, C. (2004). Comparison of training activities and game demands in the Australian Football League. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 7(3), 292-301.
- Di Salvo, V., Gregson, W., Atkinson, G., Tordoff, P. y Drust, B. (2009). Analysis of high intensity activity in premier league soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 30(3), 205-212.
- Dobson, B. y Keogh, J. (2007). Methodological issues for the application of time-motion analysis research. *Strength and Conditioning Research*, 29(2), 48-55.
- Duarte, R., Araujo, D., Correia, V. y Davids, K. (2012). Sports Teams as Superorganisms. *Sports Medicine*, 42(8), 633-642.
- Duffield, R., Reid, M., Baker, J. y Spratford, W. (2010). Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of movement patterns in confined spaces for court-based sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5), 523-525.
- Dufour W. (1993). Computer-assisted scouting in soccer. En T. Reilly, J. Clarys, y A. Stibbe (Eds.), *Science and Football II* (pp. 160-166). Londres: E. and F.N. Spon.
- Dwyer, D. B. y Gabbett, T. J. (2012). Global positioning system data analysis: velocity ranges and a new definition of sprinting for field sport athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(3), 818-824.

- Edgecomb, S. J. y Norton, K. I. (2006). Comparison of global positioning and computerbased tracking systems for measuring player movement distance during Australian Football. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 9(1), 25-32.
- Frencken, W. G., De Poel, H. J. y Lemmink, K. A. P. M. (2011). Analysis of game dynamics and related game events in 11 vs 11 soccer. *7th World Congress on Science & Football* (p. 102). Mayo 26-30, Nagoya (Japan).
- Frencken, W. G., Lemmink, K. y Delleman, N. (2010). Soccer-specific accuracy and validity of the local position measurement (LPM) system. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(6), 641-645.
- Frencken, W., De Poel, H., Visscher, C. y Lemmink, K. (2012). Variability of inter-team distances associated with match events in elite-standard soccer. *Journal of Sports Science*. [Pre-publicación electrónica]
- Gabbett, T. J. (2010). GPS analysis of elite women's field hockey training and competition. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(5), 1321-1324.
- Gaudino, P., Iaia, F. M., Alberti, G., Hawkins, R. D., Strudwick, A. J. y Gregson, W. (2014). Systematic bias between running speed and metabolic power data in elite soccer players: Influence of Drill Type. *International Journal of Sports Medicine*. DOI: 10.1055/s-0033-1355418.
- Gómez-Piriz, P. T., Jiménez-Reyes, P. y Ruiz-Ruiz, C. (2011). Relation between total body load and session rating of perceived exertion in professional soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(8), 2100-2103.
- Gray, A. J., Jenkins, D., Andrews, M. H., Taaffe, D. R. y Glover, M. L. (2010). Validity and reliability of GPS for measuring distance travelled in field-based team sports. *Journal of Sports Sciences*, 28(12), 1319-1325.
- Gréhaigne, J-F., Godbout, P. y Zerai, Z. (2011). How the "rapport de forces" evolves in a soccer match: the dynamics of collective decisions in a complex system. *Revista de Psicología del Deporte*, 20(2), 747-765.
- Harley, J. A., Barnes, C. A., Portas, M., Lovell, R., Barret, S., Paul, D. y Weston, M. (2010). Motion analysis of match-play in elite U12 to U16 age-group soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 28(13), 1391-1397.
- Hartwig, T. B., Naughton, G. y Searl, J. (2011). Motion analyses of adolescent rugby union players: a comparison of training and game demands. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4), 966-972.
- Hauswirth, C., Le Meur, Y., Couturier, A., Bernard, T. y Brisswalter, J. (2009). Accuracy and Repeatability of the Polar ® RS800sd to Evaluate Stride Rate and Running Speed. *International Journal of Sports Medicine*, 30, 354-359.
- Hill-Haas, S., Dawson, B., Impellizzeri, F. M., y Coutts, A. (2011). Physiology of small sided games training in football. A systematic review. *Sports Medicine* 41(3), 199-200.
- Jennings, D., Cormack, S., Coutts, A. J., Boyd, L. y Aughey, R. J. (2010a). The validity and reliability of GPS units for measuring distance in team sport specific running patterns. *International Journal of Sports Physiology Performance*, 5(3), 328-341.
- Jennings, D., Cormack, S., Coutts, A. J., Boyd, L. y Aughey, R. J. (2010b). Variability of GPS units for measuring distance in team sport movements. *International Journal of Sports Physiology Performance*, 5(4), 565-569.
- Johnston, R. D., Gibson, N. V., Twist, C., Gabbett, T. J., Macnay, S. A. y Macfarlane, N. G. (2012). Physiological responses to an intensified period of rugby league competition. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Doi: 10.1519/JSC.0b013e31825bb469.
- Johnston, R. J., Watsford, M. L., Kelly, S. J., Pine, M. J. y Spurr, R.W. (2013). The Validity and reliability of 10 Hz and 15 Hz GPS units for assessing athlete movement demands. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Pre-publicación electrónica.
- Johnston, R. J., Watsford, M. L., Pine, M. J., Spurr, R. W. y Spurr, D. (2013). Assessment of 5 Hz and 10 Hz GPS units for measuring athlete movement demands. *International Journal of performance analysis in sport*, 13, 262-274.
- Krenn, P. J., Titze, S., Oja, P., Jones, A., y Ogilvie, D. (2011). Use of global positioning systems to study physical activity and the environment: a systematic review. *American Journal of Preventive Medicine*, 41(5), 508-15.
- Larsson, P. (2003). Global positioning system and sport-specific testing. *Sports Medicine*, 33(15), 1093-1101.
- Liebermann, D. G., Katz, L., Hughes, M. D., Bartlett, R. M., McClements, J. y Franks, I. M. (2002). Advances in the application of information technology to sport performance. *Journal of Sports Sciences*, 20(10), 755-769.
- Little, T. (2009). Optimizing the use of soccer drills for physiological development. *Strength and Conditioning Journal*, 31(3), 67-74.
- MacLellan, C. P., Lovell, D. I. y Gass, G. C. (2010). Creatine kinase and endocrine responses of elite players pre, during and post rugby league match play. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(11), 2908-2912.
- MacLeod, H., Morris, J., Nevill, A. y Sunderland, C. (2009). The validity of a non-differential global positioning system for assessing player movement patterns in field hockey. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 121-128.
- Mayhew, S. y Wenger, H. (1985). Time motion analysis of professional soccer. *Journal of Human Movement Studies*, 11, 49-52.
- Misra, P. y Enge, P. (2006). *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press.
- Mohino, E. (2006). *Análisis y mitigación del error ionosférico en los sistemas globales de navegación por satélite con receptores de una frecuencia*. Tesis Doctoral: Universidad Complutense de Madrid.
- O'Donoghue, P. G., Boyd, M. y Bleakley, E. W. (2001). Time-motion analysis of elite semi-professional and amateur soccer competition. *Journal of Human Movement Studies*, 41, 1-12.
- Özgül, K. T., Kurdak, S. S., Maughan, R. J., Zeren, C., Korkmaz, S., Yazici, Z., ... Shirreffs, S. M. (2010). Effect of hot environmental conditions on physical activity patterns and temperature response of football players. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sport*, 20(Supl.31), 140-147.
- Partridge, D., Mosher, R. E. y Franks I. M. (1993). A computer asisted analysis of technical performance- a comparison of the 1990 World Cup and intercollegiate soccer. En T. Reilly, J. Clarys, y A. Stibbe (Eds.), *Science and Football II* (pp. 221-231). Londres: E. and F. N. Spon.
- Passos, P., Davids, K., Araujo, D., Paz, N., Minguéns, J. y Mendes, J. (2011). Networks as a novel tool for studying team ball sports as complex social systems. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14, 170-176.
- Petersen, C., Pyne, D., Dawson, B., Kellet, A. y Portus, M. (2011). Comparison of training and game demands of national level cricketers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(5), 1306-1311.
- Petersen, C., Pyne, D., Dawson, B., Portus, M. y Kellet, A. (2010). Movement patterns in cricket vary by both position and game format. *Journal of Sports Sciences*, 28(1), 45-52.
- Petersen, C., Pyne, D., Portus, M. y Dawson, B. (2009). Validity and reliability of GPS units to monitor cricket-specific movement patterns. *International Journal Sports Physiology Performance*, 4(3), 381-393.
- Petersen, C., Pyne, D., Portus, M. y Dawson, B. (2011). Comparison of player movement patterns between 1-day and test cricket. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(5), 1368-1373.

- Pino, J., Padilla, C., Pérez, J. J., Moreno, M. I. y De la Cruz, E. (2008). Innovaciones tecnológicas en el control del entrenamiento. En J. Castellano (Ed.), *Fútbol e Innovación* (pp. 15-34). Sevilla: Wanceulen.
- Portas, M. D., Harley, J. A., Barnes, C. A. y Rush, C. J. (2010). The validity and reliability of 1-Hz and 5-Hz global positioning systems for linear, multidirectional, and soccer-specific activities. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(4), 448-458.
- Randers, M. B., Mujika, I., Hewitt, A., Santisteban, J., Bischoff, R., Solano, R., ... Mohr, M. (2010a). Application of four different football match analysis systems: a comparative study. *Journal of Sports Sciences*, 28(2), 171-182.
- Redwood-Brown, A., Cranton, W. y Sunderland, C. (2012). Validation of a Real-Time Video Analysis System for soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 33, 635-640.
- Reid, M., Duffield, R., Dawson, B., Baker, J. y Crespo, M. (2008). Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. *British Journal of Sports Medicine*, 42(2), 146-151.
- Reilly, T. y Thomas, V. (1976). A motion analysis of work-rate in different positional roles in professional football match-play. *Journal of Human Movement Studies*, 2, 87-97.
- Rienzi, E., Drust, B., Reilly, T., Carter, J. E. L. y Martin, A. (2000). Investigation of anthropometric and work-rate profiles of elite South American international soccer players. *Journal of Sports and Medical Physical Fitness*, 40(2), 162-169.
- Rigden, J. S. (2000). *Rabi, scientist and citizen*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Rowell, G. J., Coutts, A., Reaburn, P. y Hill-Haas, S. (2011). Effect of post-match cold-water immersion on subsequent match running performance in junior soccer players during tournament play. *Journal of Sports Sciences*, 29(1), 1-6.
- Sampaio J. y Maçãs V. (2012). Measuring Football Tactical Behaviour. *International Journal of Sports Medicine*, 33, 1-7.
- Sánchez-Medina, L. y Pérez-Caballero, C. (2006). Tecnología GPS al servicio del deporte. *Archivos de Medicina del Deporte*, XXIII(112), 143-152.
- Schutz, Y. y Chambaz, A. (1997). Could a satellite-based navigation system (GPS) be used to assess the physical activity of individuals on earth? *European Journal of Clinical Nutrition*, 51, 338-339.
- Schutz, Y. y Herren, R. (2000). Assessment of speed of human locomotion using a differential satellite global positioning system. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(3), 642-646.
- Terrier, P., Ladetto, Q., Merminod, B. y Schutz, Y. (2000). High-precision satellite positioning system as a new tool to study the biomechanics of human locomotion. *Journal of Biomechanics*, 33, 1717-1722.
- Terrier, P., Ladetto, Q., Merminod, B. y Schutz, Y. (2001). Measurement of the mechanical power of walking by satellite positioning system (GPS). *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(11), 1912-1918.
- Terrier, P. y Schutz, Y. (2003). Variability of gait patterns during unconstrained walking assessed by satellite positioning (GPS). *European Journal of Applied Physiology*, 90, 554-561.
- Thorpe, R. y Sunderland, C. (2011). Muscle damage, endocrine and immune marker response to a soccer match. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Doi: 10.1519/JSC.0b013e318241e174.
- Townshend, A. D., Worringham, C. J. y Stewart, I. B. (2008). Assessment of speed and position during human locomotion using nondifferential GPS. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(1), 124-132.
- Varley, M. C., Elias, G. P y Aughey, R. J. (2012). Current match analysis techniques can underestimate intense periods of high-velocity running. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 7(2), 183-185.
- Varley, M. C., Aughey, R. J. y Pedrana, A. (2011). *Accelerations in football: toward a better understanding of high-intensity activity*. 7th World Congress on Science & Football (p. 115). Mayo 26-30, Nagoya (Japan).
- Varley, M. C., Fairweather, I. H. y Aughey, R. J. (2012). Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion. *Journal of Sports Science*, 30(2), 121-127.
- Von Hünerbein, K., Hamann, H. J., Rüter, E. y Wiltshcko, W. (2000). A GPS-based system for recording the flight paths of birds. *Naturwissenschaften*, 87(6), 278-279.
- Wisbey, B., Montgomery, P. G., Pyne, D. B., y Rattray, B. (2010). Quantifying movement demands of AFL football using GPS tracking. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5), 531-536.
- Witte, T. H., y Wilson, A. M. (2004). Accuracy of non differential GPS for the determination of speed over ground. *Journal of Biomechanics*, 37(12), 1891-98.