Motricidad. European Journal of Human Movement, 2013: **31**, 111-133

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL GOLPEO EN TENIS. UNA APROXIMACIÓN DESDE LA BIOMECÁNICA

Bermejo, J.

Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte

RESUMEN

La estructura mecánica del golpeo en tenis (técnica individual, técnica óptima, técnica del campeón, o técnica estándar) se construye a partir de los resultados procedentes de estudios biomecánicos de tipo cinemático y cinético. Sin embargo, la base estructural del movimiento (técnica elemental) se construye a partir de unos principios y leyes relacionados con: el reglamento interno (reglas), el reglamento externo (física universal), los principios del movimiento (mecánica), y las propiedades de los objetos (biomecánica aplicada). El presente artículo revisa estos aspectos y aporta información sobre los elementos intrínsecos asociados a la ejecución técnica del golpeo en tenis y a la evolución en el desarrollo de los puntos. Estos elementos versan sobre: a) las características de la pista, b) las características de la raqueta, c) las características de la pelota, y d) las características de las acciones del deportista. Para ello, se realizó una búsqueda bibliográfica por diferentes bases de datos de revistas nacionales e internacionales, congresos, y libros. El resultado es un único documento en el que se agrupan los fundamentos biomecánicos del tenis. Este documento puede servir de referencia a los estudiantes de biomecánica, entrenadores, y deportistas.
Palabras clave: biomecánica, técnica, rendimiento, tenis

ABSTRACT

Mechanical structure of tennis shot (individual technique, optimal technique, champion technique, or standard technique) is built from results proceedings of biomechanical research, both kinematic and kinetic studies. However, movement basic structure (basic technique) is built from principles and laws related with: internal regulations (rules), external regulations (universal physics), principles of motion (mechanics), and properties of materials (applied biomechanics). This article reviews these topics and provides information about intrinsic elements related with technique of tennis shooting and evolution of tennis rally points. All these elements are related with characteristics of: a) tennis court, b) tennis racket, c) tennis ball, and d) athlete movements. To do this, a review of national and international journal databases was made, included articles, conferences, and books. A single document that groups the fundamentals of tennis is the result. This document may be used by students, coaches, and athletes.
Key Words: biomechanics, technique, performance, tennis

Correspondencia:
Javier Bermejo Frutos
Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte
Calle Progreso 36 B, 30500 Molina de Segura, Murcia
javier_bermejo_frutos@hotmail.com
Fecha de recepción: *22/10/2013*
Fecha de aceptación: *10/12/2013*

Introducción

El tenis es un deporte muy extendido (Kraemer et al., 1995; Muntañola, 1996). De todos los factores de rendimiento (técnicos, tácticos, físicos, psicológicos, antropométricos, coordinativos, relacionadas con los materiales), la técnica es el elemento más importante (Elliott, 2006; Reid & Whiteside, 2012) y el más estudiado (Ruperto, Sánchez, & Leo, 2008). Se debe a que determina el nivel de eficacia (correcto desde el punto de vista biomecánico) con que se expresan las capacidades físicas en competición (Knudson & Morrison, 2002) y una buena técnica es un parámetro pronosticador del rendimiento (Baiget, Iglesias, & Rodríguez, 2008; Baiget, Iglesias, Vallejo, & Rodríguez, 2011; Smekal et al., 2000; Vergauwen, Madou, & Behets, 2004; Vergauwen, Spaepen, Lefevre, & Hespel, 1998). Este factor técnico se estudia a través de la biomecánica, pudiendo diagnosticar el estado de rendimiento e intervenir sobre la condición física y la prevención de lesiones (Knudson, 2007).

La técnica fundamental del tenis se basa en un patrón motor de golpeo con implemento, en el que se produce la colisión de dos objetos en movimiento (raqueta y pelota) con diferentes características morfológicas y mecánicas (Reid, Campbell, & Elliott, 2012), entre dos o cuatro jugadores, intentando emplazar la pelota en un lugar donde se dificulte su devolución (Lees, 2003), y con adaptaciones relacionadas con la cantidad de fuerza, velocidad y sentido del giro de la pelota, y trayectoria (Roetert, Kovacs, Knudson, & Groppel, 2009) a las diversas situaciones del juego (Knudson, 2008). Estas situaciones de juego son (Susta & O´Connell, 2009): saque, remate, golpeo a una mano (derecha y revés), y golpeo a dos manos (derecha y revés). Se trata de acciones que se ejecutan a elevada velocidad y en un corto espacio de tiempo (Billat, 2002; Noffal, 1999; Sarabia, Juan, Hernández, Urbán, & Moya, 2010), que requieren un componente de precisión debido a las limitaciones impuestas por las medidas de la pista (Weineck, 2005). Estas características hacen que el tenis se defina como un movimiento deportivo complejo (Bahamonde & Knudson, 1998).

Para fijar la técnica (ya sea la «técnica individual», utilizada por un deportista; la «técnica estándar», descrita por los manuales; o la «técnica óptima», adaptada a las características individuales), la primera tarea es definir los conceptos a partir de los cuales se construye la técnica elemental (base estructural del movimiento). Se debe a que existen una serie de principios y leyes que son generalizables a todos los deportistas y que se asocian a la estructura fundamental del movimiento (Elliott, 2001; Whiting & Zernicke, 1998). Estos principios hacen referencia a: las reglas internas del juego (reglamento), las reglas externas del universo (física universal), los principios del movimiento (mecánica), y las propiedades de los objetos con los que interacciona el deportista (biomecánica aplicada).

A partir de la definición de los principios asociados a la estructura fundamental del movimiento, se pueden fijar estrategias motrices (creación de un nuevo patrón motor u optimización de uno asimilado) que permitan dar respuesta eficaz a los problemas deportivos que se plantean (Labrada, Coz, & Pérez, 2010). Por ejemplo, la forma de golpear la pelota para ejecutar una dejada en la red. Hochmuth (1981) afirmaba: «*la biomecánica no impone técnicas sino procedimientos biomecánicos para solucionar problemas motrices*». Esta es la base que justifica la creación de este documento en el que se analizan los conceptos, leyes, y principios que determinan la estructura mecánica del golpeo en tenis. Conceptos, leyes, y principios que están vinculados a la pista, la raqueta, la pelota, y los movimientos del deportista.

MÉTODO

Se realizó una revisión de diferentes revistas de ámbito nacional e internacional especializadas en biomecánica o que abordan este aspecto dentro en su temática. Esta revisión se basó en la búsqueda a través de las bases de datos Pubmed, Ebso, Researchgate, y Dialnet, así como la búsqueda en las bases de datos de las propias revistas. Las palabras clave utilizadas en la búsqueda fueron: «technique», «biomechanics», «physics», «tennis» y sus homólogas en español. Se consultó también la base de datos correspondiente a los congresos celebrados por la «International Society of Biomechanics in Sports» (ISBS) y se tomó información de algunos libros de tenis y biomecánica. El número de referencias que finalmente sirvieron para elaborar el documento fue de 124. Estos documentos se corresponden con 78 artículos de revistas impresas, 2 artículos de revistas online, 19 comunicaciones de congreso, 14 libros, y 11 capítulos de libro.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la revisión realizada, estructurada en cuatro apartados: consideraciones sobre la pista de juego, consideraciones sobre la raqueta, consideraciones sobre la pelota, y consideraciones sobre la mecánica del movimiento.

1. *Consideraciones sobre la pista de juego*

La mayoría de los golpeos en tenis se realizan priorizando el componente de potencia sobre el componente de precisión. En este sentido, el vector horizontal de la velocidad de desplazamiento de la pelota se define más importante que el vector vertical. Se debe a que cuanto más rápido se desplace la pelota mayor es la dificultad en su devolución, debido a las limitaciones atencionales del deportista asociadas a la temporalidad en la que ocurre el movimiento (Alderson & Elliott, 2006;

Glencross & Cibich, 1977; Haake, Rose, & Kotze, 2000). Sin embargo, por muy fuerte que se golpee la pelota, una vez que abandona la raqueta y contacta con la pista (requisito del reglamento) comienza a perder velocidad. Esta disminución de velocidad está determinada, entre otras cosas, por el tipo de material de la pista (Cross, 2003a). Otros aspectos que determinan la pérdida de velocidad son el coeficiente de restitución, la cantidad y sentido del giro en la pelota, el ángulo de incidencia de la pelota en la pista, o la resistencia aerodinámica, pero estos temas se tratan más adelante.

Existen diversos materiales o superficies sobre los que se desarrolla el juego (Wong & Wang, 2001): madera (no se utiliza), sintéticas (moqueta), arcilla (tierra batida), hierba, y hormigón (fundamentalmente para fines recreativos). Dichas superficies cambian en función del tipo de torneo (Dunn, Goodwill, Wheat, & Haake, 2011) y producen un desarrollo de los puntos diferente: más lento o más rápido (el término correcto es menos lento, porque se hace referencia a que la pelota pierde velocidad). Esta característica de pérdida de velocidad (en mayor o menor medida) cuando la pelota contacta con la superficie de juego la otorga el coeficiente de fricción (Brody, 1984). El coeficiente de fricción expresa el nivel o la intensidad del rozamiento entre la pista y la pelota (es un fenómeno a nivel de microscopio entre dos materiales y no una característica propia de los materiales) y se representa con un valor numérico sin unidad de medida (se trata de una magnitud adimensional que expresa una relación matemática). Cuanto mayor es el coeficiente de fricción, mayor es la oposición al deslizamiento y la pérdida de velocidad horizontal se producirá en mayor medida.

Además de influir en la velocidad de rebote de la pelota, el coeficiente de fricción influye en la altura del bote (relación entre ángulo de incidencia, previo al bote, y ángulo de reflexión, posterior al bote). En la práctica, al jugar en pistas donde el desarrollo del punto se produce a menor velocidad o «pistas lentas» (arcilla, hormigón), estas presentan mayor fricción, mayor altura de bote, y menor velocidad. Al jugar en pistas donde el desarrollo del punto se produce a mayor velocidad o «pistas rápidas» (hierba, sintéticas, madera), estas presentan menor fricción, menor altura de bote, y mayor velocidad (O´Donohue & Ingram, 2001). Esto determina el rendimiento de los deportistas, ya que jugadores con mayor dominio de lanzamientos con efecto y juego cerca de la red se benefician más de pistas lentas y los jugadores con lanzamientos potentes y juego lejos de la red se benefician más de pistas rápidas.

2. *Consideraciones sobre la raqueta*

La raqueta es el arma del tenista, así como lo es el bate en un jugador de béisbol o el palo en un jugador de golf. A lo largo de los años, con los avances en ingenie-

ría, la aparición de nuevos materiales, las mejoras en fabricación, o los estudios de físicos y biomecánicos, se ha hecho posible que se convierta en un implemento cada más tecnológico (Knudson, 2008). Las principales características que presenta la raqueta actual en relación a la antigua raqueta de madera, acero, o aluminio son: ligereza (el grafito reduce el peso entorno a un 30% y permite mayor velocidad en su movimiento), mayor resistencia a la deformación (Knudson, 2008), menor rigidez (menor disipación de energía en el impacto con la pelota) (Ashley, 1993), adopción de un cuerpo más largo y ancho (mayor superficie de golpeo) (Brody, 1979), consecución de una mayor velocidad de salida de la pelota (Elliott, Blanksby, & Ellis, 1980), y mayor control sobre su movimiento (Brody, Cross, & Lindsay, 2002). Estos cambios han supuesto una evolución en la mecánica de golpeo, en el rendimiento, y en las estadísticas del juego (Bower & Cross, 2005; Hazte, 1994; Knudson & White, 1989; Sheridan, 2006).

Se trata un sistema mecánico con el que interacciona un sistema biológico (el deportista) para transferir energía a la pelota (knudson, 2008). La energía que se le transfiere a la pelota se expresa en forma de velocidad y rotación en alguno de sus ejes. La velocidad se produce por el choque entre dos superficies elásticas (el cordaje y la pelota) y está determinada por: el coeficiente de restitución, el área de cordaje que golpea la pelota, la distribución del peso, las fuerzas de agarre, y otros aspectos (por ejemplo, rigidez o longitud). La rotación se produce por el deslizamiento o fricción de las cuerdas de la raqueta sobre la pelota y está determinada por: el ángulo de incidencia de la raqueta en el golpeo, la velocidad de deslizamiento, y el sentido de la fricción. Estos aspectos se tratan a continuación.

2.1. *Coeficiente de restitución*

El coeficiente de restitución es un valor numérico que mide la conservación de la energía en un choque entre dos materiales, en este caso entre cuerdas de la raqueta y la pelota, y oscila en un valor entre 0-1. Cuanto más se aproxime a 1 este coeficiente, más elástico es el comportamiento de los materiales que chocan (tras el choque se conserva en mayor o menor medida el momento lineal y la energía cinética que llevaban). De igual manera, cuanto más se aproxime a 0 este coeficiente, más inelástico es el comportamiento de los materiales que chocan y no habrá rebote (se pierde el momento lineal y la energía cinética previa al impacto). Por ejemplo, una bola de bolos que cae desde una altura de 1 metro hacia el suelo de la pista y una pelota de baloncesto que es lanzada desde la misma altura sobre la pista de baloncesto son dos ejemplos de un coeficiente de restitución bajo y alto, respectivamente.

El coeficiente de restitución se puede modificar en la raqueta de tenis a través de ajustes en el encordado (Waite, 1997) y estos ajustes pueden influir directamente

en la efectividad del golpeo (medida en términos de velocidad de la pelota y precisión en el bote) (Bower & Cross, 2005). El encordado tiene el objetivo de absorber la mayor cantidad de energía cinética de la pelota, convertirla en energía potencial (almacenada en la deformación elástica de las cuerdas), y devolverla posteriormente en forma de energía cinética (Brody, 1995). Los parámetros que se pueden cambiar son (Wang & Huang, 2001): el plan de cordado (número de cuerdas verticales y horizontales), la tensión de las cuerdas (medida en kilos), su grosor, la aerodinámica, o la sección del cordaje. Entre estos se destaca la tensión de las cuerdas y su grosor, porque son los parámetros sobre los que el tenista pierde o gana más potencia.

En relación a la tensión de las cuerdas, cuando se utiliza una baja tensión el resultado que se obtiene es una mayor velocidad de rebote a través del incremento en el coeficiente de restitución (Baker & Wilson, 1978; Bower & Sinclair, 1999; Bower & Sinclair, 2007; Cross, 2000; Cross, 2003b; Elliott, 1982), mientras que una elevada tensión facilita el control (Groppel, Shin, Thomas, & Welk, 1987). La pelota puede modificar su trayectoria de salida (hasta 3.º) y su velocidad (1% cuando se cambian 10 libras) en función de la tensión de las cuerdas (Goodwill & Haake, 2004). En relación al grosor de la cuerda, este determina la elasticidad. Cuanto más fina es la cuerda, mayor es la capacidad elástica en el choque con la pelota, y mayor es la potencia en el golpeo (Brody, 1995). Sin embargo, este tipo de cuerdas tiene el inconveniente de que se aflojan con mayor rapidez.

2.2. *Área de cordaje que golpea la pelota*

La pelota se puede golpear con una misma cantidad de velocidad de movimiento (swing), sin embargo, es posible que la velocidad de salida no sea la misma en todos los casos. Esto puede deberse a la zona del cordaje de la raqueta con la que contacta (Henning & Schnabel, 1998). El área total de golpeo de la raqueta es un entramado de cuerdas elásticas configuradas de forma horizontal-vertical y tensionadas en mayor o menor medida. Estas cuerdas, cuando se golpean con un tiempo de contacto de 5 milisegundos (Brody et al., 2002; Groppel et al., 1987), producen vibración (al igual que pueden producir las cuerdas de un piano, un violín, o una guitarra) en frecuencias de 100-200 hercios (oscilaciones por segundo) (Cross, 2003b). Sin embargo, hay partes de las cuerdas que no vibran (nodos). Cuando se golpea el nodo no se produce vibración o es mínima (Brody, 1981) y genera un sonido seco que se asocia a un buen golpeo.

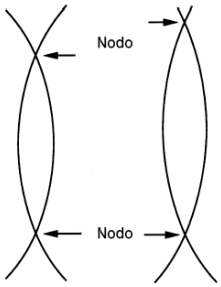

FIGURA 1. Representación simplificada del nodo en las cuerdas de una raqueta de tenis sin sujetar (izquierda) y sujetada con la mano (derecha) (traducido de Cross, 1998)

Además de los nodos, hay otros dos puntos más en la raqueta relacionados con el choque de la pelota (Brody, 1981; Cross, 1998): centro de percusión (menor transferencia de vibración a la mano a través de la empuñadura) y punto de mayor velocidad de rebote de la pelota (coeficiente de restitución). Estos tres puntos (nodo, centro de percusión, y centro de restitución) se simplifican en uno que se denomina «punto dulce» y el resultado al golpear este punto es una reducción en la amplitud de la vibración y un registro de altas frecuencias (Maeda, Okauchi, & Shimada, 2000). Como consecuencia se registra mayor velocidad de rebote (la raqueta absorbe menos energía de la pelota) y menor vibración (Elliott et al., 1980; Henning & Schnabel, 1998), reduciendo el riesgo de lesión en la articulación del codo por transmisión de la onda de choque al tendón (Bahamonde, 2005). Normalmente, este punto es indicado por la empresa fabricante (Cross, 1998) y se puede ubicar en cualquier punto del eje longitudinal, entre la punta (punto más distal) y la garganta (Brody, 1997; Cross, 1997).

FIGURA 2. Representación de los puntos de impacto de una raqueta de tenis

La evolución en la raqueta ha conseguido que se produzca una evolución en el punto dulce, minimizando las probabilidades de obtener un golpeo indeseado. Los aros de las actuales raquetas de grafito son más rígidos (la sección del marco es hueca y para una misma cantidad de masa la sección hueca es más rígida que la sólida) y más grandes que en las raquetas de madera o aluminio (Cross, 2000; Kern & Zimmerman, 1993). Esto en la práctica se traduce en que si se golpea una zona de la raqueta alejada del punto dulce el resultado no es tan malo como golpear a esa distancia del punto dulce en una raqueta antigua (mayor área de punto dulce y coeficiente de restitución elevado). Además, el aro más grande presenta una mayor superficie de fricción para producir los efectos (spin). Todas estas características permiten una mayor progresión en el proceso de aprendizaje.

2.3. *Distribución del peso*

Cambiar la distribución del peso de la raqueta modifica su momento inercia ($I = m \times r^2$) (Wang & Huang, 2001). Esto significa que cuanto mayor es la cantidad y la distancia de la masa respecto a la empuñadura (eje de giro), mayor es el momento inercia, y viceversa. ¿Qué quiere decir esto de mayor o menor momento inercia? ¿Es mejor un momento inercia mayor o menor? El mayor momento inercia se traduce en una mayor demanda energética para realizar el movimiento de la raqueta y un menor retroceso tras el golpeo (existe un movimiento de retroceso en los ejes horizontal al mango, vertical, y perpendicular al encordado), pero produce un incremento de la potencia debido a la mayor inercia de rotación (Brody, 2000). Del mismo modo, las raquetas de menor masa y la masa concentrada cerca de la manija son más fáciles de girar. Por ejemplo, en el lanzamiento de maza de gimnasia rítmica esta puede ser sujetada desde el cuerpo o cerca de la cabeza, o el giro de ballet puede realizarse con los brazos abiertos o pegados al cuerpo. La evolución de las raquetas de tenis es similar a estos ejemplos, la distribución del peso ha evolucionado hacia un mayor momento inercia (el centro de masas se desplaza hacia la punta de la raqueta).

La evolución en el momento inercia de las raquetas se ha logrado por varias razones: utilización de un aro más ancho, construcción de un cuerpo más largo, y fabricación con materiales que son más ligeros y resistentes. Entonces, si el momento inercia está determinado por la masa del objeto ¿por qué la disminución del peso de la raqueta no afecta al aumento del momento inercia? La pérdida de peso en la raqueta no afecta al momento inercia porque el incremento de la distancia de la masa (r) es más importante que el incremento de la masa (m) en la fórmula matemática («r» se eleva al cuadrado y la masa no). Además, esta reducción de la masa se ha compensado con una mayor velocidad de movimiento (implemento más ligero) y un mayor coeficiente de restitución (rigidez del aro). La evolución en las raquetas

se ha basado en una evolución de la estabilidad (cantidad y ubicación del peso) de la misma.

2.4. *Fuerzas de agarre*

Algunas teorías indican que un agarre suficientemente acoplado con la empuñadura produciría un incremento de la masa a través de las fuerzas de la mano y el antebrazo (Knudson & Bahamonde, 2001), obteniendo como resultado un golpeo de mayor potencia. Sin embargo, esta teoría no se sostiene por un motivo fundamental: el bajo tiempo de interacción entre la pelota y las cuerdas de la raqueta, entre 3-5 ms (Brody et al., 2002; Groppel et al., 1987; Kawazoe, 2002). Debido a este corto espacio de tiempo, la pelota abandona las cuerdas antes de que se produzca el retroceso. Este aspecto se refuerza con algunas teorías recientes que concluyen: la fuerza de agarre no es suficientemente significativa como para afectar a la dinámica del golpeo y la raqueta se comporta como si fuera sin restricciones dando lugar a velocidades de la pelota similares cuando se golpea en el centro de la raqueta (Brody, 1987a; Casolo & Ruggieri, 1991; Hatze, 1992, Kawazoe, 1997; Knudson, 1997; Vallatta et al., 1993). A la luz de estos datos, surge una pregunta sin respuesta (en este documento): ¿tiene sentido experimentar nuevas raquetas con sistemas mecánicos de sujeción?

2.5. *Otros aspectos*

Además de los ajustes en el encordado (tensión y elasticidad de las cuerdas), la zona de golpeo del área de cordaje, o la fuerza de agarre, existen otros aspectos que determinan la potencia del golpeo: rigidez y longitud. En relación a la rigidez, las actuales raquetas tienen el marco hueco. Las raquetas con el marco hueco (rígidas) otorgan más potencia al golpeo porque absorben menor cantidad de energía en el choque con la pelota y porque tienen menor deformación del marco (Ashley, 1993). En relación a la longitud, la raqueta se mueve de forma circular con el eje de giro en el hombro y en su movimiento la velocidad lineal aumenta en cada parte a medida que se aleja de la empuñadura (se recorre mayor espacio en el mismo tiempo). Utilizar una raqueta de mayor longitud manteniendo la velocidad de golpeo produce como resultado un golpe más potente, pero menos preciso debido a la dificultad de manejo (Schiebl, 1998). ¿Qué es mejor entonces, una raqueta de mayor longitud o de menor longitud?, depende del deportista, si es capaz de mantener la mecánica de golpeo entonces se beneficiará de raquetas de mayor longitud.

3. *Consideraciones sobre la pelota*

Para mejorar el rendimiento en el tenis se pueden realizar varias acciones: mejorar la mecánica de los movimientos, seleccionar y configurar la raqueta para con-

seguir unos golpeos potentes pero que se a su vez se adapte a las características del tenista, o seguir una estrategia determinada en función del tipo de pista en la que se juegue (desde el fondo o juego en la red). Sin embargo, existe un aspecto fundamental del juego que sin el no es posible la práctica, la pelota. Se debe a que se trata de un elemento que comparten los jugadores y que está completamente regulado. En relación a la pelota, existen una serie de aspectos que se deben conocer para mejorar la comprensión del juego: características físicas, aerodinámica del vuelo, y mecánica del bote.

3.1. *Características físicas de la pelota*

La Federación Internacional de Tenis (ITF) es el máximo responsable regulador de este aspecto esencial del juego en cuanto a: dimensiones (6.54-6.85 cm de diámetro), peso (56-59.4 gramos), color (amarillo), y características físicas (hueca con aire comprimido atrapado por una capa de goma y recubierto por felpa en una capa uniforme, costuras libres de puntadas). Además, regula los diferentes tipos de pelota (dinámica y aerodinámica) y su utilización (Mehta, Alam, & Subic, 2008): tipo 1 (máxima velocidad, para pistas lentas de tierra batida), tipo 2 (velocidad media, estándar para pistas duras), y tipo 3 (baja velocidad, para pistas rápidas de césped, y utilizadas en condiciones de altitud).

3.2. *Aerodinámica del vuelo*

La pelota pasa el 99.5% del tiempo en el aire entre los jugadores y sólo una pequeña fracción de segundo en el bote de la pista (4 milisegundos aproximadamente) o en contacto con la raqueta (3-5 milisegundos). Durante el tiempo que pasa en el aire, se produce un movimiento de traslación (de un lado de la pista al otro) y un movimiento de rotación sobre un eje, en un sentido, y con una velocidad de giro (Sakurai, Jinji, Reid, Cuitenho, & Elliott, 2007; Sakurai, Reid, & Elliott, 2013). La trayectoria final que describa la pelota está determinada por las fuerzas aerodinámicas, donde lo más importante es la resistencia del aire (Dunlop, 2000). El desplazamiento de la pelota crea una fricción entre una superficie sólida (capa externa de la pelota) y el aire adyacente, lo que produce una espacie de remolino de aire rotativo que modifica la fuerza que actúa sobre la pelota debido a la corriente (Newton, 1672). A esta fuerza se la conoce como «efecto Magnus», en honor al físico alemán Henrich Gustav Magnus que en 1853 observó por primera vez este aspecto de la aerodinámica.

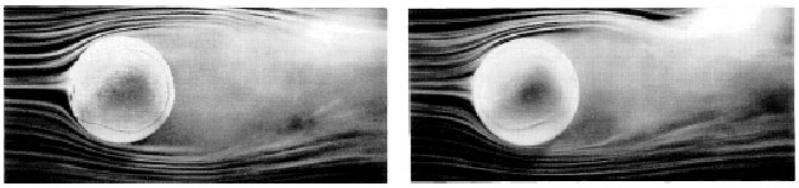

FIGURA 3: Visualización de una pelota de tenis sin rotación (izquierda) y con rotación hacia delante o topspin (derecha) en túnel del viento (Mehta & Pallis, 2001)

El efecto Magnus se aplica a objetos de sección circular que se desplazan por un fluido (agua o aire) y básicamente produce una fuerza de empuje perpendicular al eje de giro y su dirección. Esto es, si el eje de rotación es horizontal entonces la pelota cae más rápido (rotación hacia delante) o más lento (rotación hacia atrás) en función del sentido del giro. El trayecto de la pelota en el aire describe un movimiento de tipo curvo balístico (Vaverka, Cernosek, M., Tesarova, K., & Elfmark, 2005). La física describe el efecto Magnus de la siguiente manera: cuando la pelota se desplaza por el aire se produce un fino vértice el cual intenta rotar a la misma velocidad que la pelota, en la región en la que el vórtice gira hacia la corriente de aire libre que se aproxima, el aire cerca de la superficie de la bola desacelera haciendo que la presión aumente. A la inversa, donde el vórtice gira lejos de la corriente de aire libre que se aproxima, el aire se acelera, haciendo que la presión disminuya. Esta diferencia de presión hace que la pelota cambie su dirección (Alam, Subic, Naser, Rasul, & Khan, 2008). En la práctica, durante el contacto con la raqueta los jugadores pueden controlar el movimiento de la pelota y aplicarle fricción a través del deslizamiento de las cuerdas para que gire durante el vuelo y que eso influya en la trayectoria y en el bote (Chadwick & Haake, 2000): altura de bote, ángulo de incidencia, velocidad de salida del suelo (ver punto siguiente).

3.3. *Mecánica del bote*

Cuando se golpea la pelota y se le aplica fricción con las cuerdas se pueden producir dos situaciones básicas en el bote: bola cortada (backspin) o bola liftada (topspin). Bola liftada (golpeo de profundidad): el giro se produce hacia delante y cuanto más rápido sea este giro, más fuerte se puede producir el golpeo con la raqueta, más alta puede ser la trayectoria de paso por la red, y más rápido caerá al suelo en relación a un golpeo sin giro. En esta situación, la altura tras el bote es menor, el ángulo de incidencia es mayor al ángulo de reflexión, y la velocidad de salida es menor en el vector vertical e igual en el vector horizontal. Bola cortada (golpeo para dejada): el giro se produce hacia atrás y cuanto más rápido sea este giro, más lenta se producirá su caída al suelo. En esta situación, la altura tras el bote

es ligeramente menor, el ángulo de incidencia es menor al ángulo de reflexión, y la velocidad de salida es menor en el vector horizontal e igual en el vector vertical (Elliott, Marsh, & Overheu, 1989a, 1989b; Stepanek, 1988). En otras situaciones se puede combinar el giro sobre el eje horizontal con el giro sobre el eje vertical para producir efectos laterales.

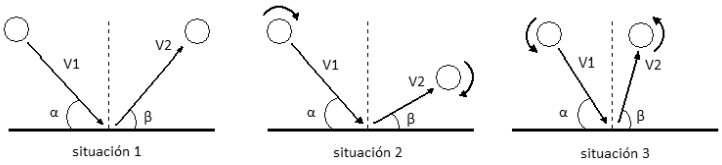

FIGURA 4: Mecánica del bote en una situación de tiro plano (izquierda), golpeo con rotación hacia delante o topspin (centro), y golpeo con rotación hacia atrás o backspin (derecha)

3.4. *Jugar en condiciones de altitud*

Al aumentar la altura sobre el nivel del mar se reduce la presión atmosférica y el aire es menos denso (Ward-Smith, 1983). Esto quiere decir que la pelota se encuentra con menos resistencia a su avance cuando es golpeada (menor cantidad de moléculas de aire). Este hecho produce una mayor diferencia de presión interna de la pelota y externa del entorno, aumentando el coeficiente de restitución, lo que se traduce en una mayor velocidad de desplazamiento y una mayor altura de bote. Sin embargo, la Federación de Tenis interviene en estos casos (altura de 1219 metros sobre el nivel del mar) e introduce bolas en 2001 atendiendo a criterios de igualdad. Estas bolas son denominadas de tipo 3 y tienen un mayor diámetro (6%, entre 6.98-7.30 cm) que las pelotas normales (6.54-6.85 cm) y un mayor coeficiente de restitución (más bote). Con ello se consigue que aunque la densidad es menor, la resistencia de la pelota sigue siendo la misma porque aumenta la superficie de la pelota (área frontal) que choca con las partículas de aire.

4. *Consideraciones sobre la mecánica del movimiento*

Conseguir que la pelota viaje a elevada velocidad es importante en la mayoría de golpeos. Para ello, se debe adquirir gran velocidad en la parte distal del cuerpo (Marshall & Elliott, 2000), donde se produce la interacción con el sistema mecánico (la raqueta). Sin embargo, este objetivo no sólo requiere de determinados patrones de movimiento y demandas de fuerza en la extremidad del brazo (Sun, Liu, & Zhou, 2012), sino que necesita coordinar su acción con el impulso producido por las piernas y el tronco (Akutagawa & Kojima, 2005; Bahamonde, 1997, 2000; Brody, 1987b; Chow, Shim, & Lim, 2003; Girard, Micallef, & Millet, 2007; Iino & Kojima,

2001; Knudson, 2006; Reid, Elliott, & Crespo, 2013; Schönborn, 1999). Se debe a que la acción coordinada de movimientos desde los pies hasta la empuñadura de la raqueta permite que la velocidad de golpeo sea mayor que si el golpeo sólo se realiza utilizando la musculatura del brazo (Bunn, 1972; Elliott, 2003; Elliott, Fleisig, Nicholls, & Escamilla, 2003; Elliott, Marsh, & Blanksby, 1986; Liu, Li, & Fang, 2000; Marshall & Elliott, 2000; Plagenhoef, 1971; Putnam, 1993; Subijana & Navarro, 2007, 2009; Van Gheluwe & Hebbelinck, 1985).

A esta transferencia de velocidad desde los segmentos proximales (pie, pierna, muslo) a los segmentos distales (brazo, antebrazo, mano) se la denomina cadena cinética (Roetert & Groppel, 2001; Subijana & Navarro, 2006) y es de tipo abierta. Es similar al movimiento que se produce en un látigo, desde la empuñadura hasta la punta transmitiendo la energía. En este tipo de cadena cinética abierta, los segmentos proximales tienen que desarrollar mucha fuerza a baja velocidad y los segmentos distales tienen que desarrollar altas velocidades con cargas ligeras. Esto requiere una elevada exigencia mecánica y cualquier fallo de coordinación supone una pérdida de eficacia o riesgo de lesión. La eficacia de la cadena cinética en el golpeo depende de (Herring & Chapman, 1992; Putnam, 1993): la posición de los segmentos en el espacio, el aprovechamiento del ciclo estiramiento-acortamiento (CEA), el principio acción-reacción, y el principio de coordinación de impulsos parciales. Estos elementos clave para el aprovechamiento de la cadena cinética se pueden traducir a factores cuantificables (Elliott, Takahashi, & Noffal, 1997): eje de rotación elevado del brazo, rotación de tronco y cadera sobre la pierna de atrás junto con una abducción horizontal de hombro, fuerza de reacción del suelo, y rotación interna del hombro combinada con la acción de piernas y tronco.

- En relación a la posición de los segmentos en el espacio, al equiparar el brazo del deportista con una palanca con el eje de giro en el hombro, se puede entender como incrementando la longitud de esta palanca (separación de la raqueta respecto al hombro) se puede incrementar la velocidad tangencial manteniendo una misma cantidad de velocidad angular (la cantidad de velocidad lineal se incrementa al alejar la distancia respecto al eje de giro porque se recorre más espacio en el mismo tiempo) (Noffal, 1999).
- En relación al aprovechamiento del CEA, el pre-estiramiento del complejo músculo-tendón de los músculos distales como consecuencia de la aceleración de los músculos proximales permite hacer más fuerza de contracción concéntrica (Walshe, Wilson, & Ettema, 1998), hasta un 22% más (Elliott, Baxter, & Beiser, 1999), en relación a una contracción sin pre-estiramiento (Elliott, 2002a). En este fenómeno fisiológico, la rapidez entre la ejecución de la acción excéntrica (balanceo del brazo hacia atrás) y concéntrica (balan-

ceo del brazo hacia delante) es un requerimiento importante (Elliott, 2006; Elliott et al., 1999; Wilson, Elliott, & Wood, 1991).

- En relación al principio de acción-reacción, el jugador utiliza la reacción del suelo al empuje de las piernas como base para comenzar el golpeo (Roetert, Ellenbecker, & Reid, 2009). Este movimiento se inicia con la flexión de rodillas, que crea hasta el 50-60% de la fuerza en los segmentos proximales (tobillo, rodilla, y cadera) (Kibler, 2009). Se ha demostrado que la restricción en la flexión de rodilla durante el golpeo produce menores fuerzas de reacción del suelo, menores alturas de golpeo, y menor velocidad de desplazamiento de la pelota tras el impacto con la raqueta (Girard et al., 2007; Reid, Elliott, & Alderson, 2008).
- En relación al principio de coordinación de impulsos parciales, la energía cinética resultante en el golpeo de la raqueta es consecuencia de un componente lineal y angular en la velocidad de los segmentos y enlaces adyacentes (Bahamonde, 2000; Elliott, 2002b; Elliott et al., 2003; Gordon & Dapena, 2006; Kreighbaum & Barthels, 1996), dando como resultado el incremento gradual de la velocidad desde los segmentos proximales a los segmentos distales (Van Gheluwe & Hebbelinck, 1985; Elliott et al., 1986; Elliott, 1988; Elliott, Marshall, & Noffal, 1995), y obteniendo una elevada cantidad de velocidad angular, aceleración angular, y potencia de golpeo en la muñeca y la raqueta (Elliott et al., 1986). Se traduce en un valor que representa el 75.1% del momento angular total del golpeo (Bahamonde, 2000).

4.1. *Modelo biomecánico del golpeo en tenis*

El objetivo del golpeo es proyectar la pelota al campo contrario con la máxima precisión, teniendo en cuenta que el incremento de la velocidad de esta aumenta la efectividad (Kreighbaun & Barthels, 1996). Para lograr este objetivo, el deportista realiza tres acciones (Elliott, 2006): armado o preparación (backswing), golpeo o aceleración (forwardswing), y seguimiento del golpeo (follow through). El propósito mecánico de estas acciones es (Girard et al., 2007): producir un adecuado posicionamiento de la raqueta previo al impacto, una adecuada trayectoria en su movimiento, una adecuada altura para el golpeo, y velocidad de movimiento. Los principios biomecánicos fundamentales que determinan el logro de estos propósitos son (Elliott, Reid, & Crespo, 2003): balance, inercia, oposición de fuerza, momento, energía elástica, y cadena de coordinación. A partir de la identificación de estos aspectos (y de lo analizado en este documento), se pueden fijar los factores de rendimiento que afectan al golpeo, tomando como referencia el esquema general para el establecimiento del modelo biomecánico de los deportes propuesto por Hay (1978) y adaptando el modelo de algunos de ellos.

Como objetivo primario del golpeo se establece la consecución del punto o la ventaja. Este objetivo se logra a través de un golpeo de la pelota con dos características: velocidad y precisión. La velocidad y precisión del golpeo dependen de: la altura a la que se produce el contacto con la pelota, la velocidad de salida de la pelota, y el ángulo de proyección de la pelota. La altura a la que se produce el contacto con la pelota depende de: la estatura del deportista y longitud de sus segmentos (depende de factores genéticos), la posición del cuerpo (depende de la técnica), y la altura de la pelota tras el bote (depende de la velocidad horizontal y vertical previa al bote, la velocidad angular a la que rota, el eje sobre el que se produce la rotación, el ángulo de incidencia sobre la pista, y el coeficiente de rozamiento de la pista). La velocidad de salida de la pelota depende de: la velocidad lineal de la raqueta en el impacto (depende de la cantidad de fuerza aplicada, la coordinación de los impulsos parciales, el recorrido de aceleración de la raqueta, y la conversión del momento angular a momento lineal), el ángulo de posición de la raqueta (depende del agarre), el brazo momento (distancia del eje de giro del brazo fijado en el hombro, depende de factores genéticos asociados a la longitud de los segmentos y factores técnicos asociados a la flexión-extensión del codo), la masa de la raqueta (depende de los materiales de construcción), el coeficiente de restitución de la raqueta (depende de la tensión de las cuerdas y la zona donde se produce el golpeo), el coeficiente de restitución de la pelota (depende de la presión interna y de las condiciones ambientales), y los condicionantes aerodinámicos (resistencia del aire y efecto Magnus). El ángulo de proyección de la pelota depende de: la altura a la que se golpea, la velocidad del golpeo, la posición corporal, y el ángulo de incidencia de la raqueta en el impacto con la pelota.

Conclusiones

La evolución del tenis está ligada, en parte, a los cambios que se han producido en materia de entrenamiento deportivo, a la fabricación de los implementos y elementos del juego con nuevos materiales, y a los estudios de tipo biomecánico que han permitido comprender el movimiento y optimizar la técnica. Si tenemos en cuenta la acción técnica de golpeo, entre los aspectos determinantes de la evolución en su rendimiento destacan aquellos relacionados con: las propiedades de la pista, la configuración de la raqueta, la pelota de juego, y las características de los movimientos.

La pista de juego tiene una serie de características en función del tipo de material utilizado en su construcción. En este sentido, se pueden identificar tres aspectos que determinan la forma en que la pelota llega de un tenista a otro: coeficiente de fricción (determina la interacción de la pista con la pelota), coeficiente de restitución (determina la conservación de energía de la pelota, velocidad lineal, en el bote),

cantidad y sentido del giro de la pelota (determina la altura de bote, el ángulo de reflexión, y la velocidad de salida de la pelota).

La raqueta es un elemento complejo que ha evolucionado desde su creación. A pesar de estar regulada en algunos aspectos (por ejemplo, longitud o anchura), es posible modificar parámetros para adaptarla a las características de los deportistas: el área de cordaje (superficie de contacto), el plan de cordado (número de cuerdas verticales y horizontales), la tensión de las cuerdas (medida en kilos), su grosor, la aerodinámica, la sección del cordaje, la empuñadura, y la distribución de su peso. Además, se debe prestar atención a la zona del cordaje que impacta con la pelota.

La pelota es el elemento esencial del juego y en su desplazamiento por la pista describe un movimiento de tipo curvo balístico. A través de la interacción con la raqueta, en términos de velocidad (trasmisión de energía cinética en la que el coeficiente de restitución de las cuerdas y la pelota es fundamental) y rotación (creación de giro a través del deslizamiento con el encordado), se puede lograr que la pelota modifique la trayectoria que hubiera realizado sin giro. Esto es posible gracias al efecto Magnus.

El movimiento del golpeo se basa fundamentalmente en la adquisición de la mayor cantidad de velocidad en la parte distal de los segmentos implicados en la cadena cinética y para ello se debe prestar atención a: la posición de los segmentos en el espacio, la correcta utilización del CEA, el inicio del movimiento aplicando el principio acción-reacción en los segmentos proximales, y el principio de coordinación de impulsos parciales.

Referencias

Akutagawa, S. y Kojima, T. (2005). Trunk rotation torques through the hip joints during the one and two handed backhand tennis strokes. *Journal of Sports Sciences, 23*(8), 781-793.

Alam, F., Subic, A., Naser, J., Rasul, M. G. y Khan, M. M. (2008). A study of spin effects on tennis ball aerodynamics. *Wseas transactions on Fluid Mechanics, 3*(3), 271-278.

Alderson, J. y Elliott, B. (2006). *Visual assessment tools in tennis. Proceedings of: XXIV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Salzburg: Austria.

Ashley, S. (1993). High-tech racquets hold court. *Mechanical Engineering, 115*(8), 50-55.

Bahamonde, R. (1997). *Joint power production during flat and slice tennis serves. Proceedings of: XV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Denton, Texas: USA, pp. 489-493.

Bahamonde, R. (2000). Changes in angular momentum during the tennis serve. *Journal of Sports Sciences, 18*(8), 579-592.

Bahamonde, R. (2005). Review of the biomechanical function of the elbow joint during tennis strokes. *International Sport Medicine Journal, 6*(2), 42-63.

Bahamonde, R. y Knudson, D. (1998). Kinematic analysis of the open and square stance tennis forehand. *Journal of Science and Medicine in Sport 30*(5), 5-29.

Baiget, E., Iglesias, X. y Rodríguez, F. A. (2008). Prueba de campo específica de valoración de la resistencia en tenis: respuesta cardiaca y efectividad técnica en jugadores de competición. *Apunts. Educación Física y Deportes, 3*(93), 19-28.

Baiget, E., Iglesias, X., Vallejo, L. y Rodríguez, F. A. (2011). Efectividad técnica y frecuencia de golpeo en el tenis femenino de élite. Estudio de caso. *Motricidad. European Journal of Human Movement, 27*, 101-116.

Baker, J. y Wilson, B. (1978). The effect of tennis racket stiffness and string tension on ball velocity after impact. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 49*(3), 255-259.

Billat, V. (2002). *Fisiología y metodología del entrenamiento, de la teoría a la práctica*. Barcelona: Paidotribo.

Bower, R. y Cross, R. (2005). String tension effects on tennis ball rebound speed and accuracy during playing conditions. *Journal of Sports Sciences, 23*(7), 765-771.

Bower, R. y Sinclair, P. (1999). Tennis racket stiffness and string tension effects on rebound velocity and angle for an oblique impact. *Journal of Human Movement Studies, 37*, 271-286.

Bower, R. y Sinclair, P. (2007). Tennis racket stiffness, string tension and impact velocity effects on post-impact ball angular velocity. *Sports Engineering, 10*(2), 111-122.

Brody, H. (1979). Physics of the tennis racket. *American Journal of Physics, 47*(6), 482-487.

Brody, H. (1981). Physics of the tennis racket II: The sweet spot. *American Journal of Physics, 49*(9), 816-819.

Brody, H. (1984). That's how the ball bounces. *The Physics Teacher, 11*, 494-497.

Brody, H. (1987a). Models of tennis racket impacts. *International Journal of Sport Biomechanics, 3*, 292-296.

Brody, H. (1987b). *Tennis science for tennis players*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press.

Brody, H. (1995). How would a physicist design a tennis racquet? *Physics Today, 48*(3), 26-31.

Brody, H. (1997). The physics of tennis III. The ball-racket interaction. *American Journal of Physics, 65*(10), 981-987.

Brody, H. (2000) *An overview of racket technology*. En S. Haake & A. Coe (Eds.), Tennis Science and Technology (pp. 43-48). London, England: Blackwell Science Ltd.

Brody, H., Cross, R. y Lindsay, C. (2002). *The physics and technology of tennis*. Solana Beach, California: Racquet Tech Publishing.

Bunn, J. (1972). *Scientific principles of coaching*. Englewood cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

Casolo, F. y Ruggieri, G. (1991). Dynamic analysis of the ball-racket impact in the game of tennis. *Meccanica, 26*(2-3), 67-73.

Chadwick, S. G. y Haake. S. J. (2000). *Methods to determine the aerodynamic forces acting on tennis balls in flight*. En S. J. Haake & A. D. Coe (Eds.), Tennis Science & Technology (pp. 127-134). London: Blackwell Science Ltd.

Chow, J. W., Shim J. H. y Lim, Y. T. (2003). Lower trunk muscle activity during the tennis serve. *Journal of Science and Medicine in Sport, 6*(4), 512-518.

Cross, R. (1997). The dead spot of a tennis racquet. *American Journal of Physics, 65*(8), 754-764.

Cross, R. (1998). The sweet spots of a tennis racquet. *Sport Engineering, 1*(2), 63-78.

Cross, R. (2000). The coefficient of restitution for collisions of happy balls, unhappy balls, and tennis balls. *American Journal of Physics, 68*(11), 1025-1031.

Cross, R. (2003a). Measurements of the horizontal and vertical speeds of tennis courts. *Sports Engineering, 6*(2), 93-109.

Cross, R. (2003b). *Materials and tennis string*. En M. Jenkins (Eds.), Materials in sports equipment (pp. 196-220). England: Woodhead Publishing.

Dunlop, J. J. (2000). *Characterising the service bounce using a speed gun*. En S. J. Haake & A. D. Coe (Eds.), Tennis Science & Technology (pp. 183-190). London: Blackwell Science Ltd.

Dunn, M., Goodwill, S., Wheat, J. y Haake, S. (2011). *Assessing tennis player interactions with tennis courts*. Proceedings of: XXIX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Oporto: Portugal, pp. 859-862.

Elliott, B. (1982). Tennis: the influence of grip tightness on reaction impulse and rebound velocity. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 14*(5), 348-352.

Elliott, B. (1988). Biomechanics of the serve in tennis: a biomechanics perspective. *Sports Medicine, 6*(5), 285-294.

Elliott, B. (2001). *Biomechanics and stroke production: implications for the tennis coach*. Coachesinfo.com [consultado 05/06/2013].

Elliot, B. C. (2002a). *Biomechanics of tennis*. En: P. Renström (Eds.), Tennis (pp. 1-28). Oxford: Blackwell Publishing.

Elliott, B. (2002b). *Biomechanics applied to the tennis serve*. En K. Gianikellis, B. Elliott, M. Reid, M. Crespo, & R. Bahamonde (Eds.), Proceedings of: XX International Symposium on Biomechanics in Sports (pp. 1-6). Cáceres: España.

Elliott, B. (2003). *The development of racquet speed*. En: B. Elliott, M. Reid, & M. Crespo (Eds.), Biomechanics of Advanced Tennis (pp. 102). London, England: The International Tennis Federation.

Elliott, B. (2006). Biomechanics and tennis. *British Journal of Sports Medicine, 40*(5), 392-396.

Elliott, B., Baxter, K. y Besier, T. (1999). Internal rotation of the upper arm segment during a stretch-shorten cycle movement. *Journal of Applied Biomechanics, 15*(4), 381-395.

Elliott, B., Blanksby, B. y Ellis, R. (1980). Vibration and rebound velocity characteristics of conventional and oversized tennis rackets. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 51*(4), 608-615.

Elliott, B., Fleisig, G., Nicholls, R. y Escamilla, R. (2003). Technique effects on upper limb loading in the tennis serve. *Journal of Science and Medicine in Sport, 6*(1), 76-87.

Elliott, B. C., Marsh, T. y Blanksby, B. (1986). A three-dimensional cinematographic analysis of the tennis serve. *International Journal of Sport Biomechanics, 2*(4), 260-271.

Elliott, B., Marsh, T. y Overheu, P. (1989a). A biomechanical comparison of the multisegment and single unit topspin forehand drives in tennis. *International Journal of Sport Biomechanics, 5*(3), 350-364.

Elliott, B., Marsh, T. y Overheu, P. (1989b). The topspin backhand drive in tennis. *Journal of Human Movement Studies, 16*(1), 1-16.

Elliott, B., Marshall, R. y Noffal, G. (1995). Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *Journal of Applied Biomechanics, 11*(4), 433-442.

Elliott, B. C., Reid, M. y Crespo, M. (2003). *Biomechanics of advance tennis*. ITF.

Elliott, B., Takahashi, K. y Noffal, G. (1997). The influence of grip position on the upper limb contributions to racket-head speed in the tennis forehand. *Journal of Applied Biomechanics, 13*(2), 182-196.

Girard, O., Micallef, J. y Millet, G. P. (2007). Influence of restricted knee motion during the flat first serve in tennis. *Journal of Strength and Conditioning Research, 21*(3), 950-957.

Glencross, D. y Cibich, B. (1977). A decision analysis of games skill. *Australian Journal of Sport Psichology, 9*, 72-75.

Goodwill, S. y Haake, S. (2004). Ball spin generation for oblique impacts with a tennis racket. *Society for Experimental Mechanics, 44*(2), 194-205.

Groppel, J., Shin, I., Thomas, J. y Welk, G. (1987). The effects of string type and tension on impact in midsized and oversized tennis racquets. *International Journal of Sports Biomechanics, 3*(1), 40-46.

Gordon, B. y Dapena, J. (2006). Contributions of joint rotations to racquet speed in the tennis serve. *Journal of Sports Sciences, 24*(1), 31-49.

Haake, S., Rose, P. y Kotze, J. (2000). *Reaction time-testing and grand slams tie-break data*. En S. Haake & R. Coe (Eds.), Tennis Science and Technology (pp. 269-276). Oxford: Blackwell Science.

Hatze, H. (1992). Objective biomechanical determination of tennis racket properties. *International Journal of Sport Biomechanics, 8*(4), 275-287.

Hay, J (1978). The biomechanics of sports techniques. New Jersey: Prentice Hall.

Hazte, H. (1994). Impact probability distribution, sweet spot, and the concept of an effective power region in tennis rackets. *Journal of Applied Biomechanics, 10*(1), 43-50.

Henning, E. y Schnabel, G. (1998). *A method to determine ball impact location and its movement across the strings of a tennis racket*. Proceedings of: XVI Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Konstanz: Germany.

Herring, R, y Chapman, A. (1992). Effects of changes in segmental values and timing of both torque and torque reversal in simulated throws. *Journal of Biomechanics, 25*(10), 1173-1184.

Hochmuth, G. (1981). *Biomecánica de los movimientos deportivos*. Berlín: Sportverlag.

Iino, Y. y Kojima, T. (2001). Torque acting on the pelvis about its superior inferior axis through the hip joints during a tennis forehand stroke. *Journal of Human Movement Studies, 40*, 269-290.

Kawazoe, Y. (1997). Experimental identification of a hand-held tennis racket and prediction of rebound ball velocity in an impact. *Theoretical and Applied Mechanics, 46*, 177-188.

Kawazoe, Y. (2002). Mechanism of high-tech tennis rackets performance. *Theoretical and Applied Mechanics, 51*, 177-187.

Kern, J. C. y Zimmerman, W. J. (1993). *The effect of tennis racquet flexibility on rebound velocity*. En J. Hamill, T. R. Derrick, & E. H. Elliott, E.H. (Eds.), Biomechanics in Sports XI (pp. 193-195). Amherst, MA: University of Massachusetts.

Kibler, W. B. (2009). The 4000-watt tennis player: Power development for tennis. *Medicine and Science in Tennis, 14*(1), 5-8.

Knudson, D. (1997). *Effect of grip models on rebound accuracy of off-centre tennis impacts*. En J. Wilkerson, K. Ludwig, & W. Zimmerman (Eds.), Biomechanics in Sports XV: Proceedings of the 15th International Symposium on Biomechanics in Sports (pp. 483-487). Denton, Texas: Texas Women's University.

Knudson, D. (2006). *Biomechanical principles of tennis technique*. Vista, CA: Racquet Tech Publishing.

Knudson, D. (2007). Qualitative biomechanical principles for application in coaching. *Sports Biomechanics, 6*(1), 109-118.

Knudson, D. (2008). *Biomechanical aspects of the tennis racket*. En Y. Hong & R. Bartlett (Eds.), Handbook of biomechanics and human movement science (pp. 244-256). USA: Routledge.

Knudson, D. y Bahamonde, R. (2001). Effect of endpoint conditions on position and velocity at impact in tennis. *Journal of Sports Sciences, 19*(11), 839-844.

Knudson, D. y Morrison, M. (2002). *Qualitative analysis of human movement*. 2nd ed. Champaign, Illinois: Human Kinetics.

Knudson, D. y White, S. (1989). Forces on the hand in the tennis forehand drive: Applications of force sensing resistors. *Journal of Applied Biomechanics, 5*(3), 324-331.

Kraemer, W, Triplett, N., Fry, A., Koziris, L., Bauer, J., Lynch, J., McConnell, T., Newton, R., Gordon, S., Nelson, R. y Knuttgen, H. (1995). An in-depth sports medicine profile of women college tennis players. *Journal of Sport Rehabilitation, 4*(2), 79-98.

Kreighbaum, E. y Barthels, K. M. (1996). *Biomechanics. A qualitative approach for studying human movement*. Boston: Allyn & Bacon.

Labrada, J. L., Coz, E. y Pérez, F. (2010). Análisis cinemático del movimiento de lanzamiento en pitchers del equipo de béisbol de Matanzas. *Biomecánica del Ejercicio y los Deportes, 1*(4), 12-15.

Lees, A. (2003). Science and the major racket sports: a review. *Journal of Sport Sciences, 21*(9), 707-732.

Liu, H., Li, L. y Fang, X. (2000). *Biomechanical analysis and evaluation of the power serve of female tennis players.* Proceedings of: XVIII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Hong Kong: China, pp. 293-296.

Maeda, H., Okauchi, M. y Shimada, Y. (2000). *A model for analysis of the impact between a tennis racket and a ball*. Proceedings of: XVIII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Hong Kong: China.

Marshall, R. y Elliott, B. (2000). Long-axis rotation: the missing link in proximal-to-distal segmental sequencing. *Journal of Sports Sciences, 18*(4), 247-254.

Mehta, R., Alam, F. y Subic, A. (2008). Review of tennis ball aerodynamics. *Sports Technology, 1*(1), 7-16.

Mehta R. D. & Pallis J. M. (2001) *Sports ball aerodynamics: effects of velocity, spin and surface roughness*. En F. H. Froes & S. J. Haake (Eds.), Materials and Science in Sports (pp. 185-197). Warrendale, USA: The Minerals, Metals and Materials Society [TMS].

Muntañola, M. T. (1996). Evolución del deporte del tenis. *Apunts: Educación Física y Deportes, 44-45*, 12-18.

Newton, I. (1672). New theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society London, 1*, 678-688.

Noffal, G. *Where do high speed tennis serves come from?* En B, Elliott, Gibson, B. & Knudson, D. Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports: Tennis Edith Cowan University Press. Perth: Australia, 1999, pp. 27-34.

O'Donoghue, P. y Ingram, B. (2001). A notational analysis of elite tennis strategy. *Journal of Sports Sciences, 19*(2), 107-115.

Plagenhoef, S. (1971). *Patterns of human motion: a cinematographic analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

Putnam, C. (1993). Sequential motion of body segments in striking and throwing skills: description and explanation. *Journal of Biomechanics, 26*(Suppl. 1), 125-135.

Reid, M. M., Campbell, A. C. y Elliott, B. C. (2012). Comparison of endpoint data treatment methods for estimation of kinematics and kinetics near impact during the tennis serve. *Journal of Applied Biomechanics, 28*(1), 93-98.

Reid, M., Elliott, B. y Alderson, J. (2008). Lower-limb coordination and shoulder joint mechanics in the tennis serve. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 40*(2), 308-315.

Reid, M., Elliott, B. y Crespo, M. (2013). Mechanics and learning practices associated with the tennis forehand: A review. *Journal of Sports Science and Medicine, 12*(2), 225-231.

Reid, M. y Whiteside, D. (2012). *Integrating biomechanics at the elite level: the tennis Australia experience*. Proceedings of: XXX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Melbourne: Australia, pp. 60-63.

Roetert, E., Ellenbecker, T. y Reid, M. (2009). Biomechanics of the tennis serve: Implications for strength training. *Strength and Conditioning Journal, 31*(4), 35-40.

Roetert, E. y Groppel, J. (2001). *Mastering the kinetic chain*. En E. Roetert & J. Groppel (Eds.), World-class Tennis Technique (pp. 99-113). Champaign, Illinois: Human Kinetics.

Roetert, E., Kovacs, M., Knudson, D. y Groppel, J. (2009). Biomechanics of the tennis groundstrokes: Implications for strength training. *Strength and Conditioning Journal, 31*(4), 41-49.

Ruperto, A., Sánchez, P. A. y Leo, F. M. (2008). Influencia de la aceleración lineal de la mano-raqueta y de su posición sobre la precisión del servicio plano en tenis. Un estudio de caso. *Kronos, 8*(14), 25-30.

Sakurai, S., Jinji, T., Reid, M., Cuitenho, C. y Elliott, B. (2007). Direction of spin axis and spin rate of the ball in tennis service. *Journal of Biomechanics, 40*, S197.

Sakurai, S., Reid, M. y Elliott, B. (2013). Ball spin in the tennis serve: spin rate and axis of rotation. *Sports Biomechanics, 12*(1), 23-29.

Sarabia, J. M., Juan, C., Hernández, H., Urbán, T. y Moya, M. (2010). El mantenimiento de la potencia mecánica en tenistas de categoría cadete. *Motricidad. European Journal of Human Movement, 25*, 51-74.

Schiebl, F. (1998). *Stress studies in tennis – differences between tennis rackets of different lengths*. Proceedings of: XVI Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Konstanz: Germany.

Schönborn, R. (1999). *Advanced techniques for competitive tennis*. Achen, Germany: Meyer and Meyer.

Sheridan, H. (2006). Tennis technologies: de-skilling and re-skilling players and the implications for the game. *Sport in Society, 9*(1), 32-50.

Smekal, G., Pokan, R., Von Duvillard, S. P., Baron, R., Tschan, H. y Bachl, N. (2000). Comparison of laboratory and «on-court» endurance testing in tennis. *International Journal of Sports Medicine, 21*(4), 242-249.

Stepanek, A. (1988). The aerodynamics of tennis balls – The topspin lob. *American Journal of Physics, 56*(2), 138-142.

Subijana, C. y Navarro, E. (2006). *The kinetic chain performed by high performance tennis players*. Proceedings of: XXIV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Salzburg: Austria.

Subijana, C. y Navarro, E. (2007). Análisis de la técnica en el tenis: el modelo biomecánico en jugadores de alto nivel. *Kronos, 5*(11), 10-15.

Subijana, C. y Navarro, E. (2009). Kinetic energy transfer during the serve. *Journal of Human Sport and Exercise, 4*(2), 114-128.

Sun, Y., Liu, Y. y Zhou, X. (2012). *A kinematic analysis of a top 10 wta tennis player's first serve*. Proceedings of: XXX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Melbourne: Australia, pp. 253-255.

Susta, D. y O´Connell, D. (2009). *Wrist position affects hand-grip strength in tennis players*. Proceedings of: XXVII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Limerick: Ireland.

Vallatta, A., Casolo, F. y Caffi, M. (1993). *On the coefficients of restitution of tennis racquets*. En J. Hamill, T. R. Derrick, & E. H. Elliott (Eds.), Biomechanics in Sports XI: Proceedings of the 11st International Symposium on Biomechanics in Sports (pp. 196-200). Amherst, Massachusetts: University of Massachusetts.

Van Gheluwe, B. y Hebbelinck, M. (1985). *The kinematics of the service movement in tennis: a three dimensional cinematographic approach*. En D. Winter, R. Norman, R. Wells, K. Hayes, & A. Patala (Eds.), Biomechanics IX-B (pp. 521-526). Champaign, Illinois: Human Kinetics.

Vaverka, F., Cernosek, M., Tesarova, K. y Elfmark, M. (2005). *The influence of body height on the serve in tennis*. Proceedings of: XXIII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Beijing: China, pp. 335-338.

Vergauwen, L., Madou, B. y Behets, D. (2004). Authentic evaluation of forehand ground strokes in young low-to intermediate-level tennis players. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 36*(12), 2099-2106.

Vergauwen, L., Spaepen, A. J., Lefevre, J. y Hespel, P. (1998). Evaluation of stroke performance in tennis. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 30*(8), 1281-1288.

Waite, R. (1997). *Power to the people. Turbo Tennis*. http://www.tennisserver.com [consultado 05/06/2013].

Walshe, A, Wilson, G. y Ettema, G. (1998). Stretch-shorten cycle compared with isometric preload: contributions to enhanced muscular performance. *Journal of Applied Physiology, 84*(1), 97-106.

Wang, S. y Huang, Ch. (2001). *Effects of using different moment of inertia of racket on tennis serve*. Proceedings of: XIX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. San Francisco: USA, pp. 39-42.

Ward-Smith, A. J. (1983). The influence of aerodynamic and biomechanical factors on long jump performance. *Journal of Biomechanics, 16*(8), 655-658.

Weineck, J. (2005). *Entrenamiento total*. Barcelona: Paidotribo.

Whiting, W. y Zernicke, R. (1998). *Biomechanics of musculoskeletal injury*. Champaign, Illinois: Human Kinetics.

Wilson, G., Elliott, B. y Wood, G. (1991). The effect on performance of imposing a delay during a stretch-shorten cycle movement. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 23*(3), 364-370.

Wong, T. y Wang, J. (2001). *The impact comparison of top-spin ball of tennis on clay court and hard court*. Proceedings of: XIX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. San Francisco: USA, pp. 54-57.