
TÍTULO: “Biomecánica aplicada al ciclismo profesional”.

AUTORES: García-López J (Ponencia principal del Congreso)

ACTO: XXXIII Congreso de la Sociedad Ibérica de Biomecánica y Biomateriales.

REF. CD-ROM: “XXXIII Congreso de la Sociedad Ibérica de biomecánica y Biomateriales BioValencia’10”. Ed. Vicerrectorado de Investigación y Política Científica. Universitat de València. ISBN: 978-84-936128-2-5. 2010.

LUGAR/AÑO: Valencia, 11-13 de noviembre de 2010.



BIOMECÁNICA APLICADA AL CICLISMO PROFESIONAL

García-López J

Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Instituto de Biomedicina. Universidad de León.

CONTEXTO

A finales del año 2005 se inició una relación entre Fundación Ciclista de Euskadi y la Universidad de León, representada por su profesor de Biomecánica Juan García López (Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte). El interés era prestar apoyo biomecánico a los ciclistas en dos aspectos fundamentales: 1-Encontrar la posición más adecuada en la bicicleta de ruta, por las implicaciones que ésta podría tener en la prevención de lesiones; 2-Trasladar las medidas de la bicicleta de ruta a la bicicleta de contrarreloj, de manera que los ciclistas no acusaran el cambio en exceso, además de probar diferentes posiciones sobre esta última, para seleccionar aquella que fuera más aerodinámica. Esta colaboración ha perdurado y madurado durante los últimos 5 años, llevando a cabo las siguientes actividades.

POSICIONAMIENTO DEL CICLISTA EN LA BICICLETA DE RUTA

En primer lugar, debemos definir las medidas básicas de la bicicleta, para lo que vamos a utilizar el trabajo sobre ciclismo moderno de N. Belluye y M. Cid (2001), que hace referencia a 7 dimensiones de la bicicleta que pueden registrarse para analizar la interacción entre ésta y el ciclista (Figura-1). Las 4 primeras están íntimamente ligadas al ajuste de las piernas (cadena de propulsión), mientras que las 3 últimas (de la 5 a la 7) están ligadas al ajuste del tronco y los brazos (cadena de estabilización). En la bicicleta de ruta es esencial un buen ajuste de las piernas para evitar lesiones por sobreuso, mientras que el ajuste del tren superior tiene más que ver con el confort encima de la bicicleta y las lesiones en músculos posturales (extensores de tronco y cuello, etc.).

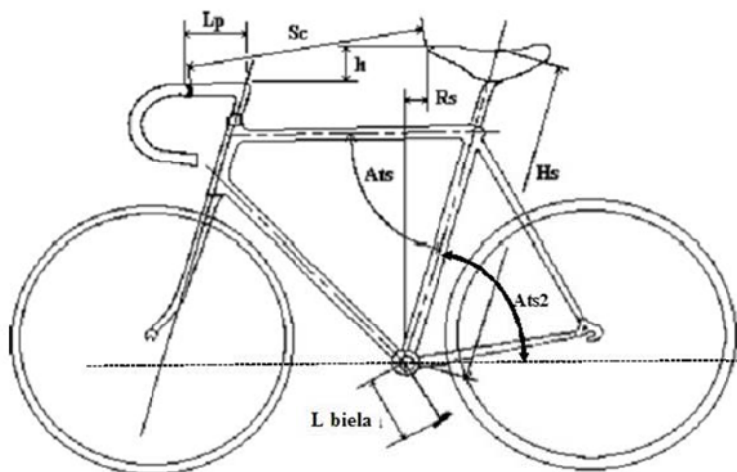


Figura-1.-Dimensiones de la bicicleta (modificado de Belluye y Cid, 2001): Lbiela = longitud de la biela; Hs = altura del sillín; Rs = retroceso del sillín; Ats2 = ángulo del tubo del sillín con la horizontal; Lp = longitud de la potencia; Sc = distancia desde la punta del sillín hasta el manillar o largura; h = diferencia de alturas entre el sillín y el manillar.

Básicamente podemos identificar tres métodos de determinación de la altura del sillín de un ciclista (Figura-2). El primero de ellos es el “Método Antropométrico”, que consiste en tomar como referencia las

dimensiones antropométricas de los ciclistas y multiplicarlas por una constante, para determinar las diferentes dimensiones de la bicicleta. El segundo es la “Goniometría Estática”, o medición del ángulo de máxima extensión de la rodilla del ciclista, estando el éste en posición estática, siendo útil sólo para la elección de la altura del sillín. El tercero es la “Goniometría Dinámica”, obteniéndose variables de cinemática lineal y angular mientras el ciclista pedalea (método que utilizamos en la Fundación Ciclista de Euskadi). Este método permite ajustar las dimensiones de la bicicleta que afectan al tren inferior (ej. altura del sillín), y si se amplía la filmación para capturar a todo el ciclista, también las que afectan al tren superior (ej. diferencia de alturas entre sillín y manillar).

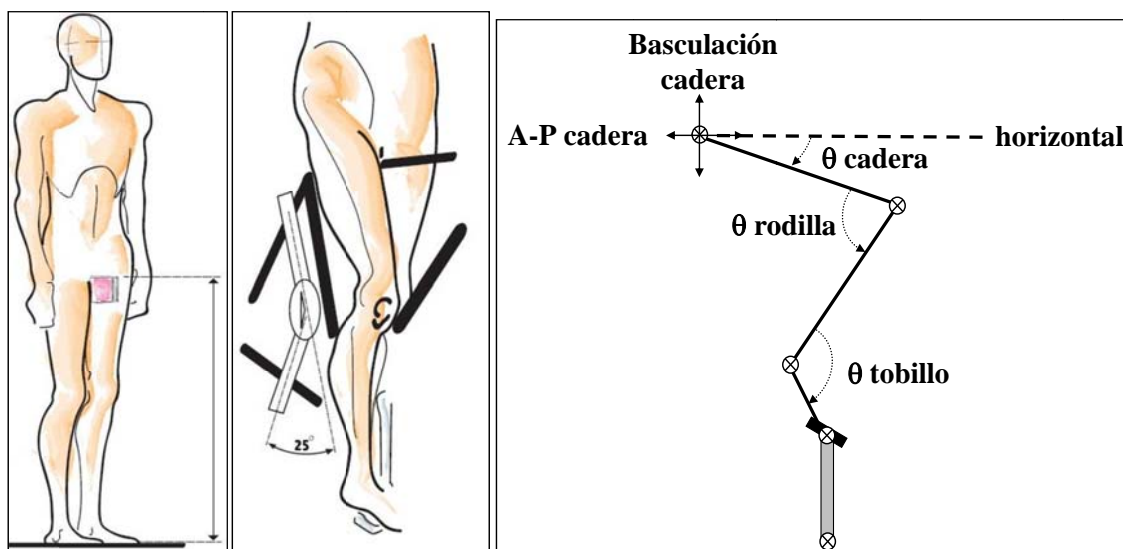


Figura-2.-Métodos más utilizados para determinar la altura del sillín de un ciclista. Método antropométrico (izquierda). Método de goniometría estática (centro). Método de goniometría dinámica (derecha).

La principal ventaja del uso del Método Antropométrico es que se puede determinar rápidamente la configuración básica de la bicicleta. Para más información sobre el mismo se puede consultar literatura específica (de Vey Mestdagh, 1998; Belluye y Cid, 2001). Desde nuestro punto de vista, es aconsejable utilizarlo en personas que no van a practicar mucho ciclismo (como valores orientativos, menos de 5000 km/año y menos de 3 horas/día). No es aconsejable utilizarlo en el resto de población ciclista, porque al estudiar la medida básica de altura del sillín de los ciclistas de la Fundación Euskadi, y compararlo con el método de goniometría dinámica, nosotros hemos observado que el 75% de ellos estarían a 0.5 cm de su altura óptima (por encima o por debajo), el 60% a 1 cm, el 40% a 1.5 cm y el 20% a más de 2 cm. Sirvan como ejemplo diferentes ecuaciones para estimar la altura del sillín a partir de la altura de la entropierna: Grenzling (1979, citado por Belluye y Cid, 2001) obtuvo su ecuación en 47 corredores del Tour de Francia (Hs: entre 0.876 y $0.894 \times$ entropierna). Greg Lemond (citado por Silberman et al., 2005) propone multiplicarla por 0.883 ($Hs = 0.883 \times$ Entropierna). Si nosotros hubiéramos utilizado este último valor, el 75% de nuestros ciclistas estarían a 0.9 cm de su altura óptima, el 50% a 1.7 cm y el 25% a 2.4 cm. En el presente Congreso de la Sociedad Ibérica de Biomecánica y Biomateriales (Valencia, 2010) se presenta un estudio realizado en una población distinta de ciclistas que confirma estos resultados.

La principal ventaja de la Goniometría Estática respecto al método anterior es que individualiza la medida para cada ciclista, tomando como referencia el ángulo de máxima extensión de rodilla estando la biela perpendicular al suelo (180°) y el talón paralelo al mismo. Para ello utiliza tres puntos anatómicos de referencia (trocanter mayor del fémur, cóndilo femoral externo y maleolo lateral). Esto evita que se cometan

errores al considerar que todas las personas de igual talla van a tener la misma longitud de piernas, o que una altura de la entrepierna/isquion dada se corresponda exactamente con una longitud de pierna. La Goniometría Estática puede consultarse en varios estudios científicos (Peveler et al., 2007 y 2008) y también en libros de referencia de rendimiento en ciclismo (Burke, 2002). Estos trabajos recomiendan ajustar la altura del sillín hasta que se consiga un ángulo de máxima extensión de rodilla entre 25-35°, tanto para mejorar su rendimiento como para la prevención de lesiones. Las principales limitaciones de este método son tres: 1-no mide la acción dinámica de pedalear, donde existe basculación de la cadera de la pierna que hace fuerza, o donde la flexibilidad dinámica de determinados músculos (ej. isquiotibiales) pudiendo afectar al mencionado ángulo; 2-en el pedaleo dinámico el pie no tiene por qué estar paralelo al suelo en el momento que la biela está perpendicular a 180°; 3-sólo sirve para ajustar la altura del sillín, no otras dimensiones de la bicicleta. Además, sólo tiene en cuenta la extensión de la rodilla y no su flexión. La principal ventaja de la Goniometría Dinámica respecto al método anterior es la posibilidad de analizar otras variables de la configuración de la bicicleta. Por ejemplo, permite tomar como referencia la máxima flexión de rodilla, que combinada con una adecuada extensión de rodilla (25-35°) puede ayudarnos a decidir la longitud de la biela. Además, tomando como referencia los valores de flexo-extensión de la cadera y del tobillo tenemos mucha más información, pudiendo contrastar si realmente la posición del sillín es elevada (se observaría en valores excesivamente altos de extensión de la cadera), o es el tobillo quien no flexiona lo suficiente, provocando que la rodilla tenga que flexionarse por él (se observaría porque el mínimo ángulo del tobillo no llegaría a los límites de referencia). En este último caso, el problema estaría en el anclaje de la zapatilla al pedal, y no en la altura o el retroceso del sillín. Otra de las ventajas de este método, al ser más preciso, es comparar con exactitud el comportamiento cinemático de ambas piernas (Figura-3). Se recomienda llevar a cabo este análisis en personas que practiquen ciclismo con asiduidad (valores orientativos de más de 5000 km/año y más de 3 horas/día).

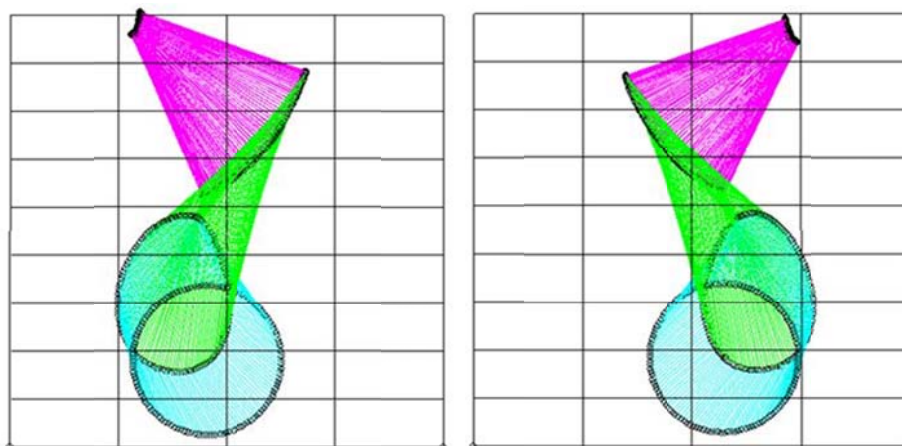


Figura-3.-Animación obtenida a partir del análisis mediante goniometría dinámica en las piernas derecha e izquierda del ciclista. Se observa que el ciclista eleva menos su rodilla izquierda al pedalear, que el tobillo derecho extiende más y flexiona menos que el tobillo izquierdo, etc.

El método de Goniometría Dinámica permite llevar a cabo una filmación frontal para valorar el movimiento de ambas rodillas respecto al pedal (Figura-4). Conocemos que para disminuir la carga de la rodilla ésta debe estar siempre por dentro del pedal (Ruby et al., 1992), y que en el hipotético caso que no fuera así, es más perjudicial que sobresalga del pedal durante la fase de impulso de la pierna (fase principal del pedaleo, donde se ejerce más fuerza), que durante la fase de recobro. Las principales causas de que la rodilla

sobresalga por fuera del pedal son una falta de técnica de pedaleo, o una incorrecta orientación (giro) de las calas de la zapatilla (García-López, 2009). El principal inconveniente del método de Goniometría Dinámica es que se requieren ciertos conocimientos de análisis biomecánico, la utilización de software especializados y experiencia en la colocación de los puntos de referencia anatómicos. Sería aconsejable realizar un análisis de Goniometría Dinámica en 3D, en vez de en 2D, fundamentalmente en el plano frontal, ya que para el plano sagital las variables de cinemática angular han mostrado un comportamiento similar al ser analizadas por ambos sistemas (Umberger y Martin, 2001). Esto exigirá más conocimientos técnicos de análisis biomecánico y mayor inversión económica, propia de los sistemas 3D.



Figura-4.-Análisis del movimiento de la rodilla en el plano frontal del ciclista (izquierda).

El método de Goniometría Dinámica también permite el ajuste del tronco y los brazos. Para ello es necesario ampliar el marco de filmación del ciclista, no sólo localizando su extremidad inferior, sino también a sus extremidades superiores (Figura-5, izquierda). Se han establecido referencias de los ángulos que deben formar los segmentos tronco-brazo y brazo-antebrazo, aunque posiblemente la más clara sea la relación entre el tronco y la horizontal (Figura-5, derecha), que debe ser de 30° en posición de agarre bajo del manillar y de 45° en posición de agarre alto del mismo (Silberman et al., 2005). Estas referencias serán más precisas que las establecidas mediante el método antropométrico (de Vey Mestdagh, 1998), por los motivos que se han comentado anteriormente. No obstante, en nuestra labor de apoyo a la Fundación Euskadi no las hemos aplicado, por lo que no tenemos una valoración práctica de las mismas.

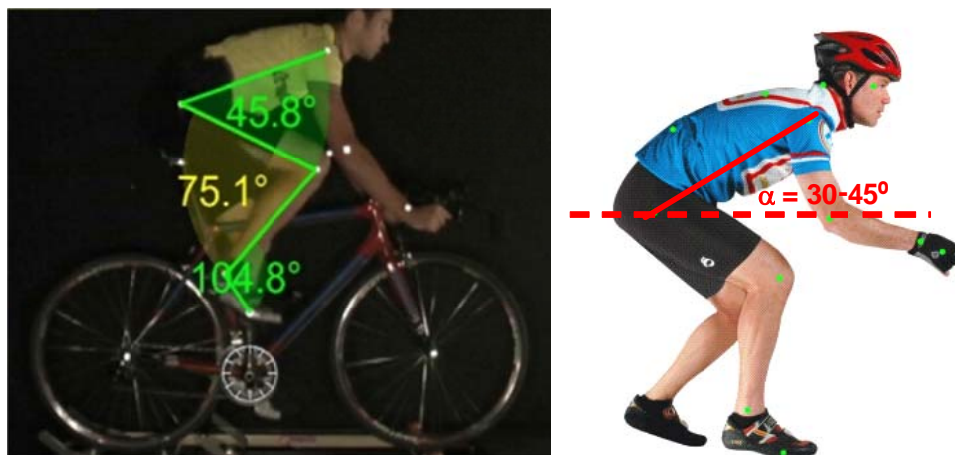


Figura-5.-Utilización del método de goniometría dinámica para ajustar el tronco y los brazos del ciclista (izquierda). Ángulos de referencia del tronco con la horizontal (derecha).

Existe la posibilidad de utilizar otros métodos como la electromiografía o el análisis cinético de la pedalada para posicionar al ciclista en la bicicleta. Estos métodos no han sido reflejados en la clasificación anterior (Figura-2), porque entendemos que deben complementarse obligatoriamente con la Goniometría Dinámica. Esto es debido a que entendemos que una completa valoración Biomecánica debe abarcar el estudio del movimiento, de las fuerzas y de la ergonomía del ciclista (García-López, 2009). Por lo tanto, complementariamente a lo anterior, desde el año 2008 hemos registrado simultáneamente el movimiento y las fuerzas que aplican los ciclistas mientras pedalean en un ergómetro que reproduce exactamente la posición en sus bicicletas (altura del sillín, retroceso, etc.). Este ergómetro es denominado LODE-Excalibur (Figura-6), sumamente preciso en la medición de fuerzas, obteniendo un total de 180 registros por pedalada con cada una de las piernas (cada 2°). Se trata del único ergómetro disponible comercialmente (ha sido importado de Holanda) que hoy día permite: 1-Medir la fuerza aplicada con ambas piernas por separado; 2-Medir la eficiencia mecánica del pedaleo; 3-Ofrecer la posibilidad de realizar entrenamiento técnico con conocimiento del resultado (también llamado feedback biomecánico).



Figura-6.-Registro simultáneo de movimiento (Goniometría Dinámica) y fuerzas (LODE Excalibur) durante el proceso de posicionamiento del ciclista en su bicicleta.

1-Medición de la fuerza aplicada con ambas piernas por separado (Figura-7). Tal y como hemos mencionado, independientemente de que la posición de los ciclistas sobre la bicicleta sea correcta, a veces podemos observar diferencias en la fuerza aplicada por ambas piernas que pueden deberse a otros factores además de la posición. Por ejemplo, haber tenido antiguas lesiones en cualquiera de las extremidades puede producir un déficit de fuerza en la misma extremidad lesionada, de la misma forma que una mala técnica de pedaleo puede hacer que al recobrar una de las piernas (desde el punto muerto inferior al punto muerto superior del pedaleo) se deje demasiado peso en el pedal, debiendo ser compensado por la otra pierna, etc. Todas estas cuestiones pueden ser evaluadas con un ergómetro de características similares al descrito en la Figura-7. Es importante distinguirlo de otros ergómetros que obtienen la suma de las fuerzas aplicadas al plato por ambas piernas conjuntamente (ej. el SRM), de manera que nunca se sabe si un exceso de trabajo por parte de, por ejemplo, la pierna derecha, se debe a un déficit de fuerza en la pierna izquierda, o a una mala habilidad de esta misma pierna para quitar el peso del pedal mientras la pierna derecha empuja. ¿Es entonces un problema de déficit de fuerza o de técnica? Sólo podemos saberlo si medimos tanto la fuerza positiva como la fuerza negativa que aplicamos a los pedales con ambas piernas

por separado, como puede observarse en la Figura-7. Esta metodología nos va a permitir conocer, de forma anticipada, a aquéllos ciclistas que al inicio de temporada tienen problemas para pedalear de una forma equilibrada (Smak et al., 1999), y trabajar con ellos para evitar problemas a medida que los kilómetros de entrenamiento y competición se van acumulando.

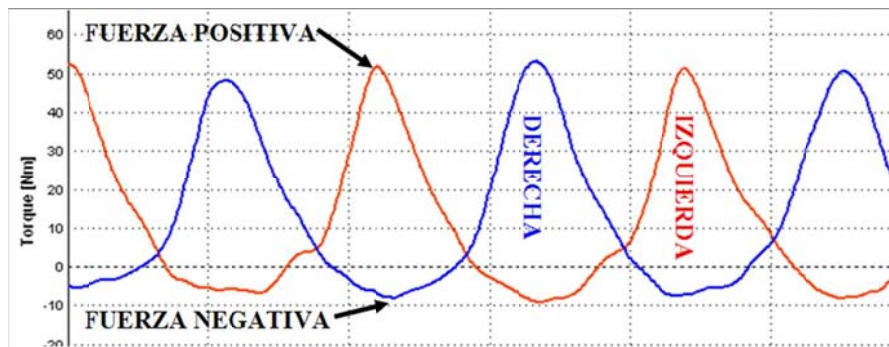


Figura-7.-Torque o fuerza aplicada con la pierna derecha (azul oscuro) y la pierna izquierda (rojo) al pedalear a una potencia de 250 vatios y una cadencia de 90 revoluciones por minuto.

2-Medición de la eficiencia mecánica del pedaleo (Figura-8). Siempre se ha descrito que los ciclistas con mayor nivel técnico de pedaleo o mayor rendimiento en competición son capaces de generar una menor fuerza negativa, y por lo tanto también necesitan una menor fuerza positiva para pedalear a la misma potencia de pedaleo que los ciclistas de menor nivel; sin embargo, no ha sido hasta hace poco tiempo que hemos podido demostrar experimentalmente esta hipótesis (García-López et al., 2009). Se puede hablar de una eficiencia mecánica del pedaleo, que es el cociente entre ambas fuerzas, y que es una de las causantes de que los ciclistas de nivel, además de por su mayor capacidad física, empleen menos esfuerzo para pedalear a las mismas potencias que los ciclistas de menor nivel. Como puede observarse en la Figura-8, para una misma potencia de pedaleo, los ciclistas de mayor nivel técnico retrasan la aparición de la fuerza negativa a partir del punto muerto inferior (a partir de los 180°), y adelantan la aparición de la fuerza positiva antes del punto muerto superior (antes de los 360°). La aplicación de esta herramienta nos va a permitir conocer cuáles de nuestros ciclistas presentan un déficit técnico en el pedaleo que les va a conllevar mayor esfuerzo físico para pedalear a las mismas potencias, y así centrar parte nuestros esfuerzos en trabajar este aspecto. En el presente Congreso de la Sociedad Ibérica de Biomecánica y Biomateriales (Valencia, 2010) se presenta un estudio que pretende explicar cuáles son las adaptaciones cinemáticas que posibilitan estas diferencias cinéticas entre ciclistas de diferente nivel competitivo.

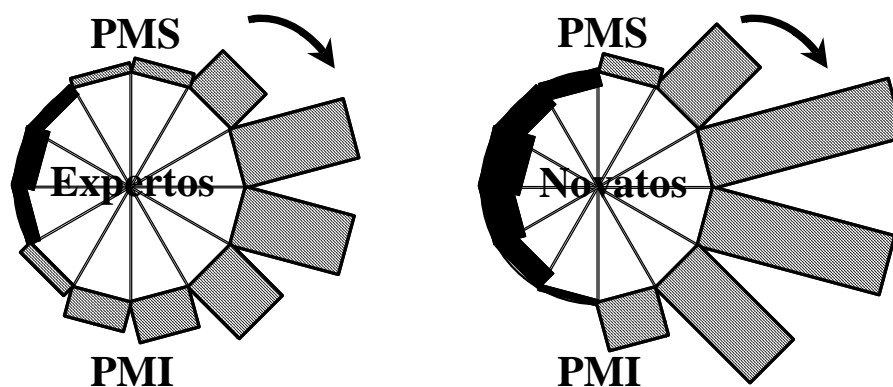


Figura-8.-Representación gráfica de la fuerza positiva (área rayada) y negativa (área oscura) aplicada por un ciclista experto y otro novato a la misma potencia de pedaleo. PMI = Punto Muerto Inferior. PMS = Punto Muerto Superior.

3-Realización de entrenamiento técnico con conocimiento del resultado ó feedback biomecánico (Liebermann et al., 2002). Después de haber llevado a cabo las evaluaciones anteriores y de conocer las carencias en la técnica de pedaleo del ciclista, puede utilizarse un módulo del programa que indica al ciclista, gráficamente y en tiempo real, la producción de de fuerza positiva y negativa con ambas piernas, mientras pedalea. Esto le va a permitir al variar su posición sobre la bicicleta, y la manera de hacer fuerza con cada una de las piernas, hasta ir consiguiendo un mejor equilibrio entre ambas, y también un pedaleo más económico. En concreto, recientemente uno de nuestros ciclistas, que tenía perfectamente ajustada su posición en la bicicleta, pero que había tenido problemas ligados a la Biomecánica en años anteriores, ha sido capaz de reducir una diferencia de un 7% en la aplicación de fuerza con la pierna derecha (es una diferencia bastante preocupante para el inicio de temporada), hasta un 2-3%, únicamente con una forma distinta de sentarse en el sillín y poniendo atención en la manera de hacer fuerza con la pierna izquierda. Por lo tanto, con un trabajo adecuado de técnica de pedaleo que iremos reevaluando a lo largo de la temporada, y siguiendo con su actual tratamiento de Fisioterapia, esperamos que los mencionados problemas desaparezcan. De la misma forma en otro de nuestros ciclistas que tenía una eficiencia mecánica baja (78% pedaleando a 250 vatios) hemos ensayado una técnica de pedaleo más redondo, visualizando la fuerza negativa que deja en cada uno de los pedales, y consiguiendo mejorar la eficiencia mecánica de pedaleo en un 9% (hasta un 87%), siendo este un valor mucho más aceptable y cercano a los ciclistas más eficientes del equipo.

POSICIONAMIENTO DEL CICLISTA EN LA BICICLETA DE CONTRARRELOJ

Las pruebas de contrarreloj son etapas específicas del ciclismo de ruta donde los ciclistas utilizan bicicletas de geometría y características diferentes a las bicicletas de ruta o carretera que se han comentado anteriormente (Figura-1). Generalmente una bicicleta de contrarreloj tiene un mayor ángulo del tubo del sillín (Ats_2), lo que afecta a la altura (H_s) y el retroceso del sillín (R_s). Estas modificaciones tienen el objetivo de implicar, en mayor medida, la musculatura extensora de las piernas, que es capaz de producir más potencia en pruebas de corta duración, aún a costa de tener una menor eficiencia mecánica y metabólica (Dorel et al., 2009). Además, en la bicicleta de contrarreloj, la diferencia de alturas sillín-manillar (h) y la longitud entre la punta del sillín y la potencia (Sc) también suelen ser mayores, en un intento de disminuir la resistencia que ciclista+bicicleta ofrecen al aire (García-López et al., 2008). Otras diferencias destacables que buscan una ganancia aerodinámica son: los tubos del cuadro y del sillín son más planos y alargados; utilizan un manillar diferente, llamado "manillar de triatlón", que permite al ciclista tumbarse más sobre la bicicleta; las ruedas convencionales de radios (Figura-9, izquierda) se cambian por ruedas lenticulares y de perfil alto (Figura-9, derecha), y a veces también por ruedas de 3 ó 4 bastones.



Figura-9.-Características principales de una bicicleta de ruta (izquierda) y de contrarreloj (derecha).

La mayoría de los estudios sobre la importancia de las pruebas de contrarreloj individual en la clasificación final de una vuelta por etapas coinciden en poner el ejemplo de lo acontecido entre Greg Lemond y Laurent Fignon en el Tour de Francia de 1989 (Figura-10, izquierda). Antes de la última etapa (CRI 25 km) Fignon aventajaba a Lemond en 50 s, y en esa última etapa perdió 58 s y el Tour. Ejemplos similares los encontramos en la historia reciente de la Vuelta a España, cuando Oscar Sevilla perdió la edición de 2001 en la última etapa (contrarreloj individual de 38 km) en favor de Ángel Casero, después de haber sido líder las últimas 12 etapas; o cuando Aitor González ganó la edición de 2002 también en la última etapa (contrarreloj individual de 41.2 km), siendo líder de la carrera hasta ese momento Roberto Heras. Sin ir más lejos, en la historia reciente de nuestro propio equipo, Samuel Sánchez (Figura-10, derecha) consiguió el tercer puesto de la clasificación general de la Vuelta a España 2007 ganando la penúltima etapa de esta edición (contrarreloj individual de 20 km), y desbancando de ese puesto a Cadel Evans.



Figura-10.-Greg Lemond (equipo Agrigel) en la última etapa (CRI 25 km) del Tour de Francia 1989 (izquierda). Samuel Sánchez (equipo Euskaltel-Euskadi) en la penúltima etapa (contrarreloj individual de 20 km) de la Vuelta a España 2007 (derecha).

Durante una prueba de contrarreloj (individual o escalada) el ciclista debe producir una potencia aproximada de 5.5 W/kg (Vogt et al., 2006), lo que significa, para un ciclista estándar de 70 kg de masa, unos 385 W ó 0.5 caballos de vapor. Esta potencia será ligeramente mayor a medida que disminuya la duración de la prueba, y viceversa. Por lo tanto, el ciclista debe estar preparado físicamente para producir fuerza propulsiva con sus músculos (Figura-11), motivo por el cual se cuida minuciosamente su preparación desde los servicios físico-médicos del equipo. Si el ciclista es capaz de producir la fuerza o potencia mencionada, es labor de la Biomecánica disminuir las resistencias o fuerzas resistivas a las que se enfrenta, consiguiendo así que la velocidad media de la prueba sea mayor, y aumenten las posibilidades de éxito. Las fuerzas resistivas a las que nos referimos básicamente pueden describirse como (García-López, 2008): 1-

fuerza de arrastre o aerodinámica, debida al choque del ciclista y la bicicleta con el aire; 2-fuerza de la pendiente, debida a la resistencia que tira hacia atrás del ciclista y la bicicleta al subir por una pendiente; 3-fuerza por rozamiento de rodadura, debida al rozamiento de las 2 ruedas con el suelo y 4-fuerza por rozamiento cinético, debida al rozamiento de los engranajes de la cadena y de los ejes de las ruedas, el plato y los pedales. Las dos últimas fuerzas (rozamiento por rodadura y rozamiento cinético) apenas constituyen el 10% de la resistencia total, y pueden considerarse similares en bicicletas de ruta y de contrarreloj, por lo que el argumento central de elección entre una y otra bicicleta tendrá que ver con el equilibrio entre la resistencia aerodinámica y de la pendiente.

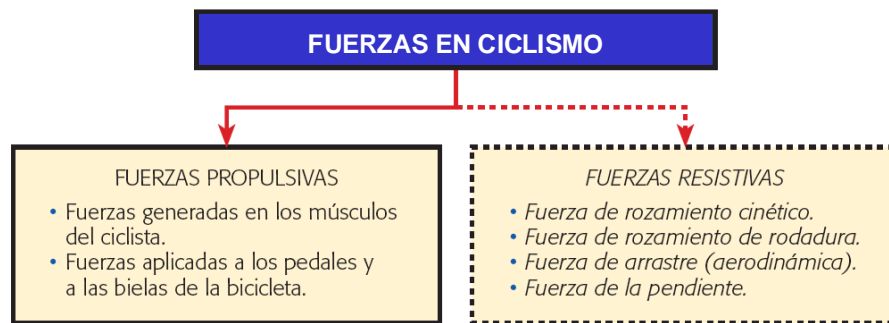


Figura-11.-Principales fuerzas propulsivas y resistivas en ciclismo. Figura original del libro “Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte”, Editorial Médica Panamericana (2008).

En las pruebas de contrarreloj individual se deben utilizar bicicletas específicas (Figura-9, derecha), a pesar de conllevar un mayor gasto metabólico y una menor eficiencia mecánica, ya que, como demuestran varios estudios, a una velocidad superior a los 40 km/h, más del 90% de la resistencia es debida a la aerodinámica (Figura-12, izquierda). Esto es ratificado por nuestros propios estudios llevados a cabo en túnel de viento (García-López et al., 2008), donde hemos obtenido un 40% más de resistencia aerodinámica con la bicicleta de carretera que con la de contrarreloj. Por lo tanto, el objetivo principal será, a la vez que disminuir la resistencia aerodinámica, conseguir que el ciclista sea capaz de producir la misma potencia o incluso más en estas bicicletas que en las bicicletas de ruta, lo cual se intentará haciendo entrenamientos específicos sobre la bicicleta de contrarreloj. En la prueba de crono-escalada el ciclista puede elegir varias combinaciones de cuadro y ruedas de la bicicleta, que estarán en función de la pendiente media de la prueba, ya que como también demuestran varios estudios, en puertos de más de 3ª categoría, más del 90% de la resistencia es debida a la pendiente (Figura-12, derecha). Es en esta prueba el objetivo será obtener un buen equilibrio entre las resistencias aerodinámica y de la pendiente, difícil de determinar, ya que el material aerodinámico suele ser más pesado, incrementando la resistencia de la pendiente. Este es el motivo por el cual veremos que existe más variedad en la elección de los materiales por parte de los ciclistas, dependiendo del trazado, de sus características de pedaleo (sentado/de pie) y de sus preferencias personales. En líneas generales, se recomienda utilizar material aerodinámico en el ciclismo profesional hasta pruebas con un 5-6% de pendiente media (García-López, 2008), como veremos más adelante.

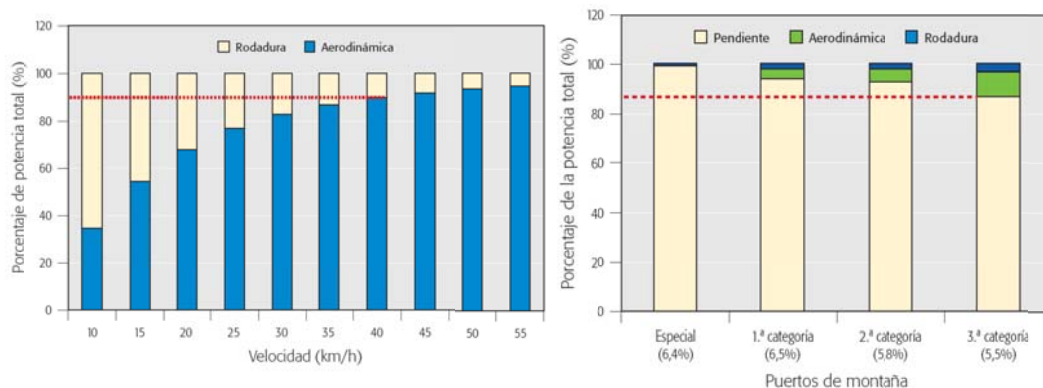


Figura-12.-Porcentajes de potencia que ejerce el ciclista empleados en vencer la resistencia aerodinámica en una contrarreloj llana (izquierda), y la resistencia de la pendiente en una prueba de ciclismo en carretera ascendiendo diferentes puertos de montaña (derecha). Figuras originales del libro “Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte”, Editorial Médica Panamericana (2008).

Hay dos medidas de la bicicleta especialmente relacionadas con la resistencia aerodinámica del ciclista, que son la diferencia de alturas entre el sillín y el manillar (h) y la largura (Sc) (Figura-13, izquierda). Ambas variables (h y Sc) afectarán al ángulo del tronco con la horizontal (Figura-13, derecha), que es determinante de la resistencia aerodinámica en posición de contrarreloj (ángulos típicos de $\sim 15^\circ$), pero que a su vez puede deteriorar la eficiencia de la pedalada (García-López et al., 2008; Dorel et al., 2009). La largura (Sc) es la distancia horizontal entre el eje de pedalier y el centro de las manetas de cambio del manillar de triatlón. En principio podemos considerar que cuanto más grandes sean ambas medidas menor resistencia aerodinámica tendrá el ciclista, aunque esto es más cierto para “ h ” que para “ Sc ”, ya que esta última puede deteriorar el control de la bici durante la conducción (exceso de largura) y aumentar la resistencia aerodinámica. La largura máxima está regulada por la UCI, estableciendo un máximo de 75 cm para todos los ciclistas, excepto para aquellos que, por causa morfológica (talla mayor de 180 cm) pueden llegar hasta 80 cm. La diferencia de alturas máxima no está regulada por la UCI, y nuestros ciclistas utilizan un rango entre 12 y 26 cm, dependiente de sus medidas antropométricas (talla, longitud de brazos y tronco...) y de su experiencia en el entrenamiento y la competición con la bicicleta de contrarreloj. La tarea que desarrollamos en el Velódromo de Anoeta es elegir ambas medidas para nuestros ciclistas, realizando tests a velocidad estable con un sensor de potencia de pedaleo, y aislando la resistencia aerodinámica con diferentes medidas de “ h ” y “ Sc ” (Figura-14).

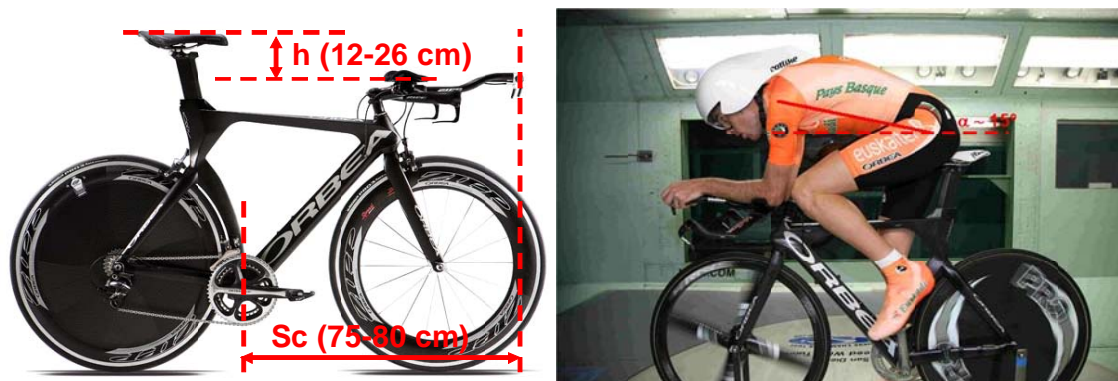


Figura-13.-Medidas de diferencia de alturas entre el sillín y el manillar (h) y la largura (Sc) importantes en la bicicleta de contrarreloj (izquierda).



Figura-14.-Ajuste de las medidas de diferencia de alturas sillín-manillar (h) y largura (Sc) de la bicicleta de contrarreloj durante la realización de pruebas de aerodinámica en el Velódromo de Anoeta.

En el Velódromo de Anoeta realizamos dos pruebas. 1-Test progresivo en velocidad, para determinar los niveles de esfuerzo de los ciclistas, y la potencia desarrollada a velocidades que oscilan entre los 30 y los 48 km/h, y tener una idea de cómo de buena o mala es la aerodinámica del ciclista respecto a la media del equipo (Figura-15, izquierda). Esta prueba tiene una duración aproximada de 1 hora donde el ciclista está trabajando entre 25 y 30 minutos. Observamos un caso de un ciclista que se va distanciando de la del equipo a medida que aumenta la velocidad, con valores bastante peores. En función de estos resultados se procede a la realización de la segunda prueba, donde introduciremos modificaciones en " h " y " Sc ". 2-Test a velocidad estable, para valorar la resistencia aerodinámica del ciclista. Su duración aproximada es de 1.5 horas, donde el ciclista está pedaleando entre 35-50 minutos. En total se realizan entre 7-10 series de esfuerzo a velocidad estable de 45 km/h. La posición inicial o de referencia se repite dos veces, para comprobar que las mediciones son correctas, y a partir de ahí se realizan modificaciones, calculando los efectos de las mismas en una prueba que se desarrollará a 50 km/h (Figura-15, derecha). Vemos entonces que al aumentar " Sc " entre 3 y 5 cm la resistencia aerodinámica disminuye, pero que la ganancia es mayor al aumentar " h " 2 cm. La mejor combinación es aumentar " h " 2 cm y " Sc " 3 cm, provocando una ganancia de 38 W a 50 km/h, o lo que es lo mismo, de 5 s por kilómetro en el ciclista analizado, que no es especialista en pruebas de contrarreloj. Simultáneamente a la realización de estas pruebas se miden los niveles de esfuerzo de los ciclistas (concentración de lactato sanguíneo y frecuencia cardiaca), además de obtener información sobre su percepción subjetiva de comodidad en la nueva postura analizada (ergonomía). A veces la mejor postura aerodinámica no es seleccionada para la competición, porque no es la más cómoda para el ciclista. La posición final es elegida de común acuerdo entre los servicios físico-médicos del equipo y el ciclista, tomando como referencia los resultados de resistencia aerodinámica, esfuerzo y percepción subjetiva de comodidad. En el presente Congreso de la Sociedad Ibérica de Biomecánica y Biomateriales (Valencia, 2010) se presenta un estudio que pretende validar el test de velódromo que se ha comentado, comparándolo con ensayos realizados en túnel de viento, y comprobando su sensibilidad al cambio de postura y el rendimiento de los ciclistas.

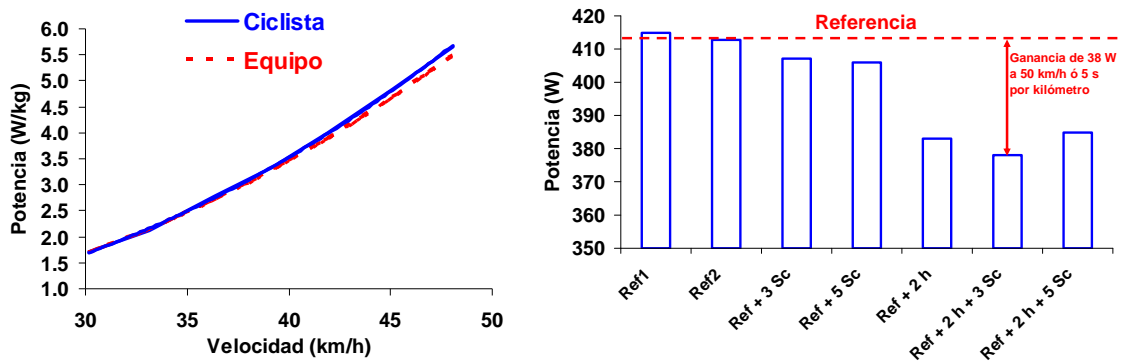


Figura-15.-Resultados obtenidos en los tests de aerodinámica en el Velódromo de Anoeta. Test progresivo en velocidad, donde se obtiene la potencia relativa (W/kg) de cada ciclista y del equipo para circular a una velocidad determinada (izquierda). Test a velocidad estable, donde calcula la potencia que necesitaría para circular a 50 km/h; cambiando las medidas de “h” y “Sc” esta potencia variará (derecha).

Hasta aquí hemos abordado los aspectos relacionados con la postura del ciclista que tienen que ver con la resistencia aerodinámica, pero no debemos olvidar que la propia bicicleta es responsable de una tercera parte de la resistencia aerodinámica del total ciclista+bicicleta, por lo que también debemos hacer referencia a ellos, en tanto que es labor de la Biomecánica asesorar a los deportistas sobre el uso de materiales para la mejora del rendimiento (García-López, 2009). El propio cuadro de la bicicleta es importante, debiendo tener una forma alargada de “gota de agua” (Figura-16, izquierda), que se caracteriza por ser entre 2.5 y 4 veces más largo que ancho. Esta misma consideración es extensible al casco aerodinámico, observando que con el paso de los años se ha ido alargando su forma. Después del cuadro es importante elegir las ruedas que se van a utilizar en la prueba. Para valorar la resistencia aerodinámica de las ruedas no es suficiente con realizar las pruebas en velódromo, sino que es necesario realizarlas en un túnel de viento (García-López et al., 2008). Una de las combinaciones de ruedas más utilizadas para una contrarreloj llana sin viento lateral es una rueda lenticular trasera y una rueda de 3-4 bastones delantera (Figura-16, derecha). La principal ventaja de la rueda de 3-4 bastones sobre la lenticular es que no ofrece mayor resistencia aerodinámica en condiciones de viento lateral, cosa que la lenticular sí hace (García-López, 2009). Actualmente casi ningún equipo utiliza rueda lenticular delantera, como sí puede observarse en algunas disciplinas de ciclismo en pista, por el riesgo que se corre si empieza a soplar viento lateral, y porque la bicicleta es mucho más difícil de manejar, al ser esta rueda más pesada, repartir su peso más hacia el exterior y, por lo tanto, tener mayor inercia que hay que romper cada vez que el ciclista quiere cambiar de dirección. En la actualidad sí que se está poniendo de moda una rueda denominada de “perfil alto” (Figura-17), que es una especie de combinación entre una rueda lenticular y una rueda convencional de unos 12-18 radios. Nuestra experiencia al evaluarlas en el túnel de viento sin viento lateral es que esta rueda puede llegar a comportarse como cualquiera de las dos anteriores, gracias a la reducción del número de radios (12) y a la forma aplanada de los mismos. Sin embargo, futuros estudios deben analizar su comportamiento con viento lateral, y el de otros modelos de rueda de perfil alto diferentes al que se expone aquí.

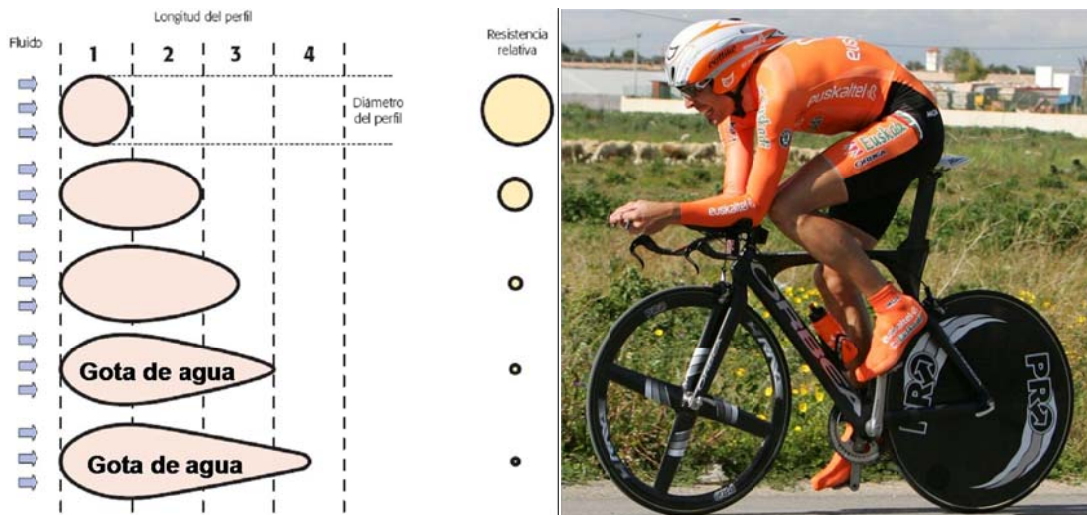


Figura-16.-Perfil de “gota de agua” utilizado para disminuir la resistencia del aire (izquierda). Combinación de ruedas lenticular trasera y rueda de 4 bastones delantera utilizadas en las pruebas de contrarreloj individual sin viento lateral (derecha).

En las pruebas de crono-escalada los ciclistas no utilizan los tres tipos de ruedas que hemos comentado, sino que buscan ruedas de “perfil medio” ó “perfil bajo” (Figura-17), porque pueden llegar a pesar entre 0.5-1.0 kg menos la pareja de ruedas, y a esto debemos sumar el sobrepeso del cuadro y el “manillar de triatlón” de una bici de contrarreloj. En líneas generales, y teniendo en cuenta que el límite para el peso total de la bicicleta establecido por la UCI es de 6.800 kg, podemos decir que se pueden disminuir el peso del cuadro-manillar de la bicicleta entre 0.5-1.0 kg en una bicicleta de ruta respecto a la de contrarreloj. En total entonces serían entre 1.0-2.0 kg de ganancia en función de utilizar una u otra configuración (cuadro-manillar más ruedas). Los modelos biomecánicos indican claramente que el efecto positivo del material aerodinámico se pierde en ciclistas profesionales cuando la pendiente tiene una inclinación mayor del 5-6%, y en ciclistas amateurs, del 3-4%, ya que estos últimos no son capaces de subir a la misma velocidad que los primeros, perdiendo beneficio aerodinámico (García-López, 2009). Por lo tanto, el principal dilema de las pruebas de crono-escalada es decidir si se utiliza o no una bicicleta de contrarreloj, y en este caso, si se utilizan o no ruedas aerodinámicas (lenticular, bastones o perfil alto), que pesan más que las convencionales (perfil medio o perfil bajo).



Figura-17.-Diferentes tipos de perfiles (alto, medio y bajo) de ruedas en ciclismo.

Destacar finalmente que no todas las pruebas de contrarreloj individual son perfectamente llanas, y que a veces pueden tener pendientes importantes, sin ser tan pronunciadas y continuas como en las crono-escaladas (Figura-18, izquierda). De hecho, en el ámbito práctico del ciclismo no se distingue entre ambas

pruebas, y se habla de una contrarreloj llana o con subidas importantes. Por lo tanto, para las pruebas de contrarreloj individual que tengan importantes pendientes hay que tener en cuenta las consideraciones que hemos comentado para las pruebas de crono-escalada y, en función de la distancias de estas subidas y del número de subidas en la misma etapa, deberemos decidir por unos u otros materiales. Sirva de ejemplo la etapa Oiartzun – Oiartzun de la Vuelta Ciclista al País Vasco 2007, donde el vencedor (Samuel Sánchez) consiguió una velocidad media de 38.9 km/h cambiando la configuración estándar del equipo para pruebas de contrarreloj (lenticular trasera + bastones delantera) por otra configuración (bastones trasera + bastones delantera) con el objetivo de disminuir el peso total de su bicicleta de contrarreloj (Figura-18, derecha).

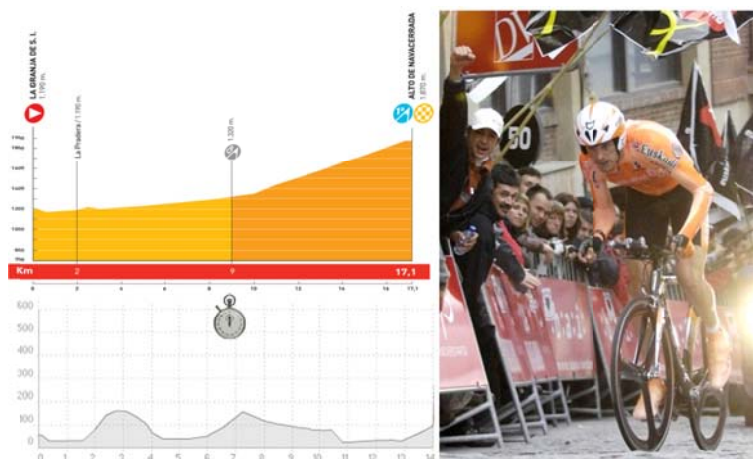


Figura-18.-Perfiles de las etapas La Granja de S. I. - Alto de Navacerrada (Vuelta a España 2008) y Oiartzun – Oiartzun (Vuelta País Vasco 2007) (izquierda). Samuel Sánchez utilizando dos ruedas de 3 bastones durante la etapa Oiartzun – Oiartzun (Vuelta País Vasco 2007) en la que se proclamó vencedor (derecha).

AGRADECIMIENTOS

A la Sociedad Ibérica de Biomecánica y Biomateriales, por haberme facilitado un foro científico donde compartir, durante los últimos 5 años, los conocimientos y experiencias sobre biomecánica ciclismo. Al Consejo Superior de Deportes (Gobierno de España), por haber financiado los proyectos titulados “Diseño y aplicación de un modelo biomecánico para el análisis técnico del pedaleo en ciclistas de ruta” y “Validación y aplicación de un test biomecánico de campo para valorar la resistencia aerodinámica en ciclistas”, en el marco de las Ayudas a las Universidades Públicas y Privadas y Entidades Públicas, para la realización de proyectos de apoyo científico y tecnológico al deporte (2007 y 2008). A la Fundación Ciclista de Euskadi (Euskadiko Txirrindularitza Iraskundea), por haber financiado el convenio titulado “Biomecánica del ciclismo” en el marco de los convenios entre la Universidad de León y la Empresa (2005-2010). A todos los ciclistas y técnicos que voluntariamente se prestaron desinteresadamente a formar parte de este trabajo, sin los cuales no hubiera podido llevarse a cabo.

BIBLIOGRAFÍA

- Burke ER (2002). *Serious Cycling* (2nd Edition). Ed. Human Kinetics. Champaign, Illinois.
- de Vey Mestdagh K (1998). Personal perspective: in search of an optimum cycling posture. *Appl Ergon.* 29 (5): 325-34.
- Dorel S, Couturier A, Hug F (2009). Influence of different racing positions on mechanical and electromyographic patterns during pedalling. *Scand J Med Sci Sports.* 19 (1): 44-54.

García-López J, Díez-Leal S, Rodríguez-Marroyo JA, Larrazabal J, de Galdeano IG, Villa JG (2005). Eficiencia mecánica de pedaleo en ciclistas de diferente nivel competitivo. *Biomecánica*, 17 (2): 9-20.

García-López J, Rodríguez-Marroyo JA, Juneau CE, Peleteiro J, Martínez AC, Villa JG (2008). Reference values and improvement of aerodynamic drag in professional cyclists. *J Sports Sci*. 26 (3): 277-86.

García-López, J (2008). Manifestación de las fuerzas aerodinámicas en diferentes deportes: ciclismo y atletismo. En Izquierdo, M. (coord.). *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Editorial Médica Panamericana. Madrid: 415-445.

García-López, J (2009). Valoración Biomecánica I. En Jiménez et al. (Eds.). "Medicina y Fisiología del Ciclismo". Ed. Nexus Médica, Barcelona: 532-631.

Liebermann DG, Katz L, Hughes MD, Bartlett RM, McClements J, Franks IM (2002). Advances in the application of information technology to sport performance. *J Sports Sci*. 20 (10): 755-69.

Peveler WW (2008). Effects of saddle height on economy in cycling. *J Strength Cond Res*. 22 (4): 1355-9.

Peveler WW, Pounders JD, Bishop PA (2007). Effects of saddle height on anaerobic power production in cycling. *J Strength Cond Res*. 21 (4): 1023-7.

Ruby P, Hull ML, Hawkins D (1992). Three-dimensional knee joint loading during seated cycling. *J Biomech*. 25 (1): 41-53.

Silberman MR, Webner D, Collina S, Shiple BJ (2005). Road bicycle fit. *Clin J Sport Med*. 15 (4): 271-6.

Smak W, Neptune RR, Hull ML (1999). The influence of pedaling rate on bilateral asymmetry in cycling. *J Biomech*. 32 (9): 899-906

Umberger BR, Martin PE (2001). Testing the Planar Assumption During Ergometer Cycling. *J Appl Biomech*. 17 (1): 55-62.

Vogt S, Heinrich L, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A (2006). Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*. 38 (1): 147-51.