

INFLUENCIA DE LA POSTURA Y LA UTILIZACIÓN DEL CASCO EN LA RESISTENCIA AERODINÁMICA DEL CICLISTA

THE INFLUENCE OF POSTURE AND USE OF AEROHELMET IN CYCLIST'S AERODYNAMIC RESISTANCE

RESUMEN

La resistencia más importante que impide el avance de un ciclista en una contrarreloj individual (CRI) es la fuerza aerodinámica de arrastre ó F_A (un 90% a 50Km/h) que puede minimizarse (2-15%) con la utilización de diferentes implementos permitidos por la U.C.I. (manillares, cascos, etc.). La única técnica directa para medir F_A es el túnel de viento, siendo escasos los estudios referenciados, y siempre analizando a un solo corredor. En este trabajo se pretende estudiar la resistencia aerodinámica de tres ciclistas profesionales en el túnel de viento e introducir una serie de modificaciones en la postura y en el uso de materiales que permitan aumentar el rendimiento en competiciones CRI.

Participaron 3 ciclistas del equipo Kelme-Costa Blanca competidores en el Tour-2001 y Vuelta-2001. Se utilizó un túnel de viento subsónico de circuito cerrado (ITER, Tenerife). Se estudiaron 4 posiciones sobre la bicicleta de CRI (1-Estática, 2-Dinámica a ritmo competición durante 10min, 3-Idem, con modificaciones en el apoyo de antebrazos, 4-Idem, sin casco) y 1 sobre la de carretera (5-Agarrados de las manetas sin casco), calculándose F_A y las medidas derivadas (F_A/Kg , SCx y SCx/Kg).

Se minimizó F_A al modificar el apoyo de antebrazos, pero no todos los ciclistas se vieron favorecidos por el uso del casco. F_A fue mayor en las posiciones de pedaleo (2-3-4) que en la posición estática (1). Los valores de SCx para CRI (1-4) oscilaron entre 0.2368-0.3658m² y para bicicleta de carretera entre 0.4284-0.5209m² existiendo una serie de factores que dificultan su comparación con los obtenidos en otros estudios.

En conclusión, las modificaciones en la posición posiblemente hallan incrementado su rendimiento en competiciones CRI, no así la utilización del casco. Para comparar valores de resistencia aerodinámica de diferentes ciclistas es necesario considerar algunas fuentes de error (técnica de medición, valores de F_A y SCx relativizados, valoración estática o dinámica, etc.). El túnel de viento es la única técnica útil en la valoración de la resistencia aerodinámica para el incremento del rendimiento ciclista en competiciones CRI.

Palabras clave: aerodinámica, túnel de viento, ciclismo, contrarreloj, rendimiento.

CORRESPONDENCIA:

Juan García López. FCAFD de la Universidad de León. 24071 León (Spain). Tel: +34 987 875794. Fax: +34 987 876540. E-mail: inejgl@unileon.es

Aceptado:
18.03.02

SUMMARY

The most important resistive force that prevents a cyclist from advancing during an individual time trial (ITT) is aerodynamic drag force or F_A (about 90% riding at 50 Km/h). This force can be minimized (2-15%) using different pieces of equipment allowed by the U.C.I. (handlebars, helmets, etc.). The wind tunnel is the only direct method to assess F_A however, there are very few published studies and these always analyse just one rider. The aim of this study was to study the aerodynamic resistance of three professional cyclists in a wind tunnel as well as to introduce some modifications in body position and equipment use, which result in an improvement in ITT performance.

Three cyclists from the Kelme-Costa Blanca team, who took part in Tour-2001 and Vuelta-2001, participated in this study. A subsonic closed loop wind tunnel (ITER, Tenerife) was used. Four ITT bike riding postures (1-Static posture, 2-Dynamic posture, riding at competition pace for 10 min, 3-idem but with some modifications in handlebar support, 4- idem but without helmet) and one riding position on the racing bike (5- holding the brake levers and without helmet) were studied and F_A and some derived parameters (F_A/Kg , SCx and SCx/Kg) were obtained.

F_A was minimized when the handlebar support was modified, however, using the helmet did not benefit all cyclists. F_A was higher in dynamic postures (2-3-4) than in the static one (1). SCx values were in the 0.2368-0.3658m² range for the ITT bike and 0.4284-0.5209 m² for the racing bike. Several factors that impeded making comparisons with the values obtained in other studies were observed.

In conclusion, posture modifications are likely to improve ITT performance, this was not shown for the helmet. It is necessary to take some sources of error into account when comparing the aerodynamic resistance values of different cyclists (measurement method, F_A and SCx values corrected for body mass, static versus dynamic valuation, etc.). The wind tunnel is the most useful method when assessing aerodynamic resistance in order to increase cyclists' performance in ITT.

Keywords: aerodynamics, wind tunnel, cycling, time trial, performance.

J. García-López¹,
J. Peleteiro López¹,
J.A. Rodríguez-Marroyo¹,
E. Friend Monasterio²,
M.A. González Hernández^{2,3},
A. Córdoba Martínez^{4,5},
J.G. Villa Vicente¹

¹Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte (FCAFD). Universidad de León. ²Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER). ³Universidad Politécnica de Madrid. ⁴Equipo Ciclista Profesional Kelme-Costa Blanca. ⁵Universidad de Valladolid.

AGRADECIMIENTOS
Los autores agradecen al Equipo Ciclista Profesional Kelme-Costa Blanca la colaboración desinteresada y permisividad para la divulgación de estos resultados. Así mismo, también agradecen al Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) de Tenerife las facilidades ofrecidas para que este trabajo pudiera llevarse a cabo.

1.- INTRODUCCIÓN

Actualmente se distinguen varias disciplinas en el ciclismo⁽³⁵⁾ entre las que se encuentra el Ciclismo de Carretera (también denominado Ciclismo en Ruta). Las pruebas de carretera pueden ser llanas, de media o alta montaña y contrareloj por equipos (CRE) e individuales (CRI); por las características de este último tipo de pruebas la aerodinámica juega un papel fundamental^(24,34). Las estimaciones demuestran que a 30Km/h las fuerzas aerodinámicas son un 80% del total de las fuerzas de resistencia, y a 50 Km/h son un 90% de las mismas^(3,23). El valor porcentual tan elevado de estas fuerzas se debe a que, al no existir grandes variaciones en la orografía (las fuerzas de la gravedad son prácticamente nulas), las fuerzas de rozamiento cinético y de rodadura pierden importancia a medida que se aumenta la velocidad, en tanto que permanecen con un valor constante, mientras que las fuerzas aerodinámicas se incrementan exponencialmente^(5,36). La potencia externa humana está limitada, necesiándose casi el doble de la misma para aumentar la velocidad desde 32.4 Km/h hasta 43.2 Km/h⁽¹⁸⁾, de ahí la importancia de optimizar la resistencia aerodinámica.

En 1899, Charley Murphy recorrió una milla en bicicleta en un tiempo récord, 1 minuto más rápido que cualquier coche de su época, y para ello se aprovechó de una estela de aire de un tren en marcha⁽³⁶⁾. El récord de velocidad masculino en pista sobre una distancia de 200 m con salida lanzado es de unos 72 Km/h (Michael Hubner en 1990), mientras el récord conseguido por un vehículo aerodinámico fuselado es de 105 Km/h (Markham en 1986); e igualmente el récord de la hora de Rominger fue de 55.3 Km/h en 1994, cuando ya desde 1987 Romanov consiguió un récord de la hora de 91.1 Km/h corriendo tras moto⁽³⁹⁾.

Se ha demostrado que a 24 Km/h., reducir el área frontal (S) en 0.16 m² produce un incremento de velocidad de 1.13 Km/h, que utilizar manillares tipo "triatlon" respecto a los modelos de "cuerno de cabra" o utilizar cascos aerodinámicos respecto a una cabeza desnuda pueden reducir las fuerzas de arrastre del ciclista en 4.45 N a 48 Km/h (ahorro de 60 vatios)⁽¹⁷⁾. Durante algún tiempo, en las pruebas de CRI y en las pruebas de pista se permitió el uso de bicicletas que minimizaban la resistencia aerodinámica provo-

cando una mayor inclinación anterior del tronco del ciclista⁽³⁾. Para ello utilizaban estrategias como colocar una rueda delantera más pequeña que la trasera o alargar el manillar hasta conseguir una posición del ciclista prácticamente tumbado, sin embargo estas estrategias han sido limitadas por la Unión Ciclista Internacional (UCI)⁽³⁵⁾.

Actualmente una de las luchas más importantes que se mantiene para incrementar el rendimiento en el ciclismo es la mejora aerodinámica dentro de los límites establecidos por la UCI. En este sentido, cualquier modificación, por pequeña que sea, puede provocar variaciones en la fuerza de arrastre entre 1N y 5N, lo que a velocidades de 14 m/s (50 Km/h) supone un ahorro entre 14 W y 70 W^(17,33). Como puede constatar en la literatura, cuando un ciclista profesional es evaluado en el laboratorio con un cicloergómetro los valores máximos de potencia aeróbica (en el $VO_{2máx}$) son de 450-550 W⁽³¹⁾, y sólo ligeramente superiores en algunos ciclistas como Miguel Indurain, que desarrolló una potencia 572 W preparando el récord de la hora⁽³⁴⁾. A éste y al resto de ciclistas, la optimización de la resistencia aerodinámica les permite obtener mejoras de más de un 10% en este tipo de pruebas. Los beneficios aerodinámicos de una posición adecuada de la parte superior del cuerpo y la posición de los brazos, son el resultado de disminuir el área frontal y el coeficiente de resistencia del ciclista^(25,27).

Para medir la resistencia aerodinámica de los ciclistas se han utilizado diferentes técnicas, entre las que se encuentra el túnel de viento⁽⁵⁾. El objetivo de este trabajo es estudiar la resistencia aerodinámica de tres ciclistas profesionales de ruta en el túnel de viento, así como introducir una serie de modificaciones en la postura y en el uso de materiales que permitan aumentar el rendimiento en competiciones CRI.

2.- MATERIAL Y MÉTODO

En el estudio participaron 3 ciclistas profesionales de ruta (70.6 ± 4.1 Kg y 1.78 ± 0.04 m), competidores a nivel nacional e internacional con el equipo ciclista Kelme-Costa Blanca, de edades comprendidas entre los 22 y 30 años, con varios años de práctica y sin ningún tipo de enfermedad. Todos ellos fueron infor-

mados del objeto de investigación y dieron su consentimiento por escrito antes de comenzar la misma.

Los ciclistas realizaron cinco pruebas de resistencia aerodinámica en túnel de viento (figura-1). Dichas pruebas eran de carácter estático (no existía pedaleo) y dinámico con resistencia, sobre un potenciómetro (Elite Axiom Power Train[®], Italia) instalado encima de la balanza dinamométrica con el que se realizó un ajuste de cero antes de fijar el sistema ciclista-bicicleta. Durante la prueba estática (Posición 1) los ciclistas utilizaron su propia bici de CRI (modelo KG 396[®], Look SA, Francia), llevando casco (Catlike cronos[®], Catlike SA, España) y manteniendo los dos pies horizontales al suelo. Las pruebas dinámicas fueron realizadas tras un calentamiento de 15 min. a un ritmo de CRI durante un periodo de tiempo de 10 minutos: utilizando la bici de CRI (modelo KG 396[®], Look SA, Francia) y el casco (Posición 2); igual que la anterior modificando el apoyo de antebrazos (Posición 3*); igual que la anterior sin casco (Posición 4*); con su bicicleta de carretera (modelo KG 381[®], Look SA, Francia) sin casco (Posición 5). (*) Las

modificaciones en el apoyo de antebrazos para las posiciones 3 y 4 consistieron en bajar la almohadilla de los reposabrazos unos 2-3 cm y adelantar las manetas del manillar de triatlón. Dichas modificaciones se llevaron a cabo tras la puesta en común entre los ciclistas y el mecánico del equipo.

Paralelamente a la realización de las pruebas estáticas y dinámicas se registraron los valores de resistencia aerodinámica mediante una balanza dinamométrica y el nivel de esfuerzo (potencia) mediante ergometría (no refiriéndose estos datos en el presente estudio).

Los valores de resistencia aerodinámica se obtuvieron en un túnel de viento subsónico (hasta 56m/s) de circuito cerrado convenientemente diseñado (ITER, Tenerife), con una cámara de ensayos donde se ubicó el ciclista colocado sobre su bicicleta encima de una balanza dinamométrica, y una sala de control desde la que se registraron todas las variables de cada prueba (figura-2). La velocidad del viento (limitada a 22 m/s por razones de seguridad) estuvo correcta-

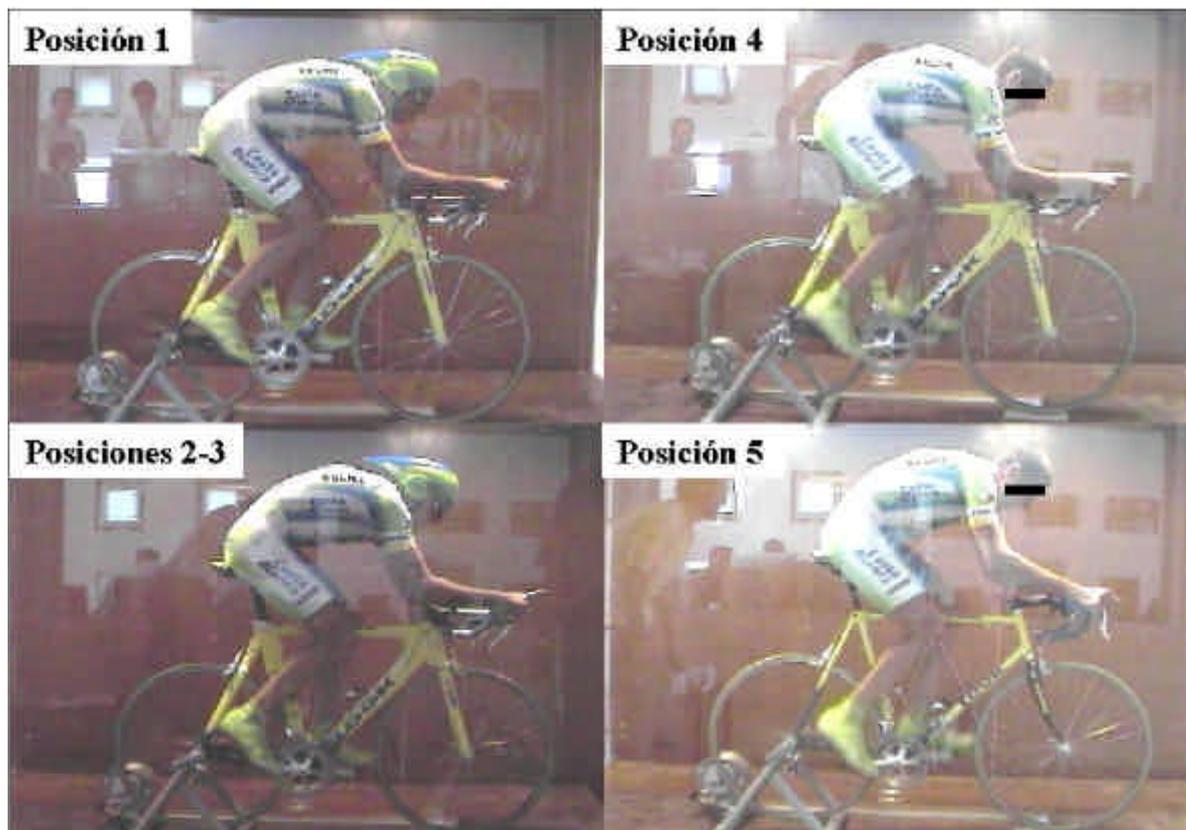


FIGURA 1.-
Las cinco posiciones analizadas en el presente estudio.

mente manipulada mediante un software de control remoto (ITER, Tenerife) que integraba la información de un transductor de velocidad del aire (modelo TSI-8455[®], EEUU, rango de medición de 0.125 a 50 m/s y precisión de 0.06 m/s) y mandaba información a través de un microcontrolador conectado a un variador de frecuencia (modelo Meltrac-A140E-220K[®], Mitsubishi, EEUU) a los 9 ventiladores de la planta de potencia (modelo HCT-100-4T-30[®], SODECA, Inglaterra, potencia y velocidad máximas de 22 kW y 1760 rpm, respectivamente) para conseguir la velocidad deseada en la cámara de ensayos (15 m/s ó 54 Km/h), comenzando la medición cuando esta se encontraba estabilizada. La balanza dinamométrica consistía en una plataforma móvil que permitía el desplazamiento del conjunto ciclista-bicicleta sobre unos rodamientos. Esta balanza se unía mediante un perfil metálico no deformable a una célula de carga calibrada mediante fuerzas estáticas

(modelo RS-632-742[®], rango de medición de 0 a 58.84 N y precisión de 0.04 N) encargada de medir la fuerza que el viento ejerce sobre el ciclista y la bicicleta. Los datos de la célula de carga se capturaron mediante una tarjeta de adquisición de datos a 16bits y 100kHz (Daqboard/216a[®], Iotech Inc, EEUU), lo que resulta importante en la realización de los ensayos dinámicos donde el ciclista se encuentra pedaleando, y se trataron con el software Daqview[®] (Iotech Inc., EEUU). Los datos de fuerza se registraron durante un intervalo de tiempo superior a 5s., tomándose como valor de resistencia aerodinámica (N) la media en ese intervalo de tiempo.

El protocolo a seguir durante los ensayos dinámicos (en esfuerzo) se estandarizó, registrándose las fuerzas aerodinámicas a intervalos de tiempo constantes (1'40'', 3'40'', 5'40'', 7'40'' y 9'40''), tomándose, como se ha indicado, el valor medio de fuerza.

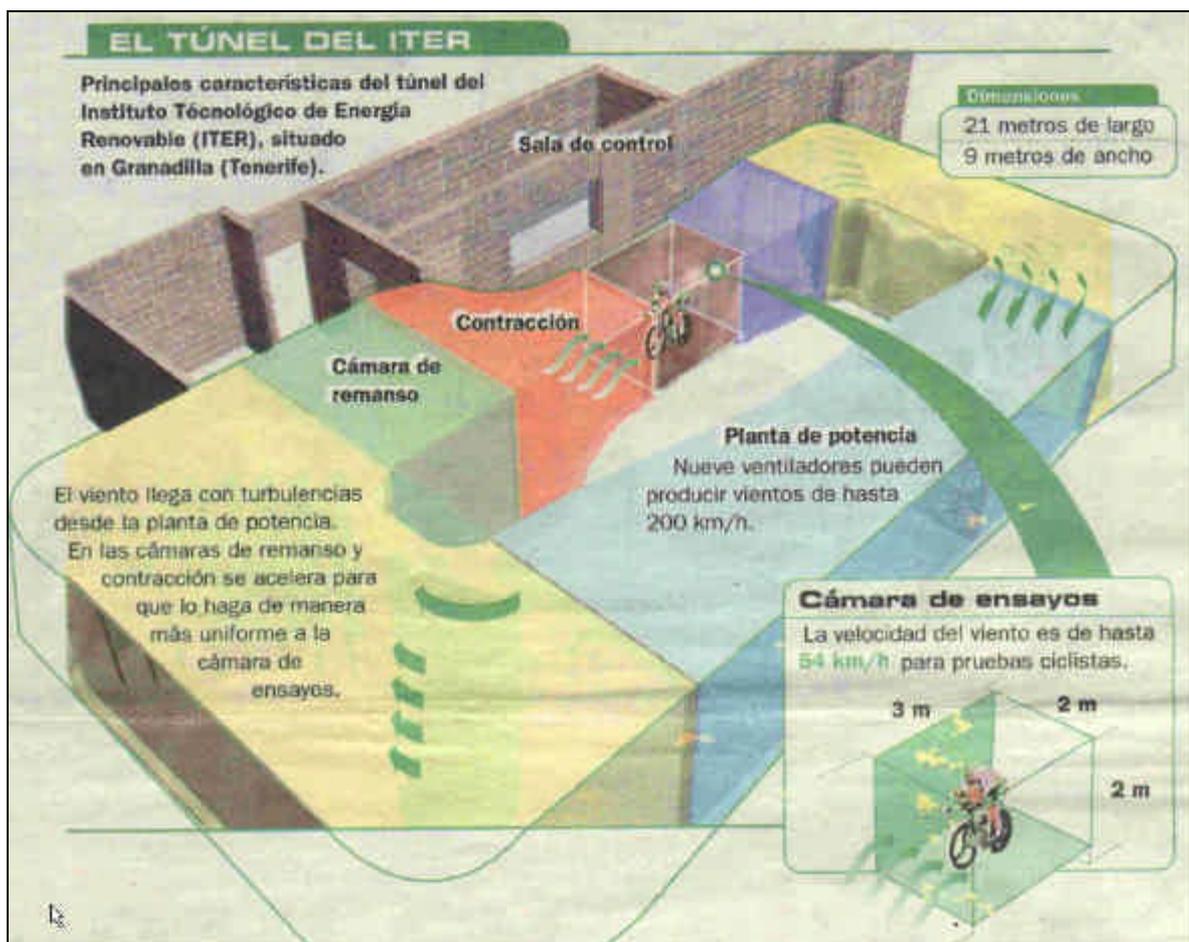


FIGURA 2.- Características del túnel de viento subsónico y de circuito cerrado (I.T.E.R.)

La variable obtenida de la balanza dinamométrica fue la fuerza de arrastre en valores absolutos (F_A), y derivadas de ésta, la fuerza de arrastre relativa al peso corporal (F_A/Kg) y el coeficiente de succión aerodinámica en valores absolutos (SCx) y relativos (SCx/Kg), obtenido al aplicar la ecuación de Newton (18,32,39).

$$F_A = 0.5 \times SCx \times v^2 \times \rho$$

Donde F_A es la fuerza de arrastre en N, SCx es el coeficiente de succión aerodinámica en m^2 , v^2 es la

velocidad del aire durante el ensayo (15 m/s) y ρ la densidad del aire, que fue estimada a partir de una fórmula que incluye la temperatura (18° C) y la presión atmosférica (765 mm de Hg) del ensayo, obteniéndose el valor 1.22 Kg/m^3 (6,18).

Antes de comenzar el ensayo y al finalizar el mismo se obtuvo una fotografía en el plano frontal de la postura adoptada por el ciclista con el objetivo de calcular el área frontal (S) de choque con el viento en las posiciones 3, 4 y 5 (figura-3). Se tomó como valor la media de S antes y después del ensayo, calculán-

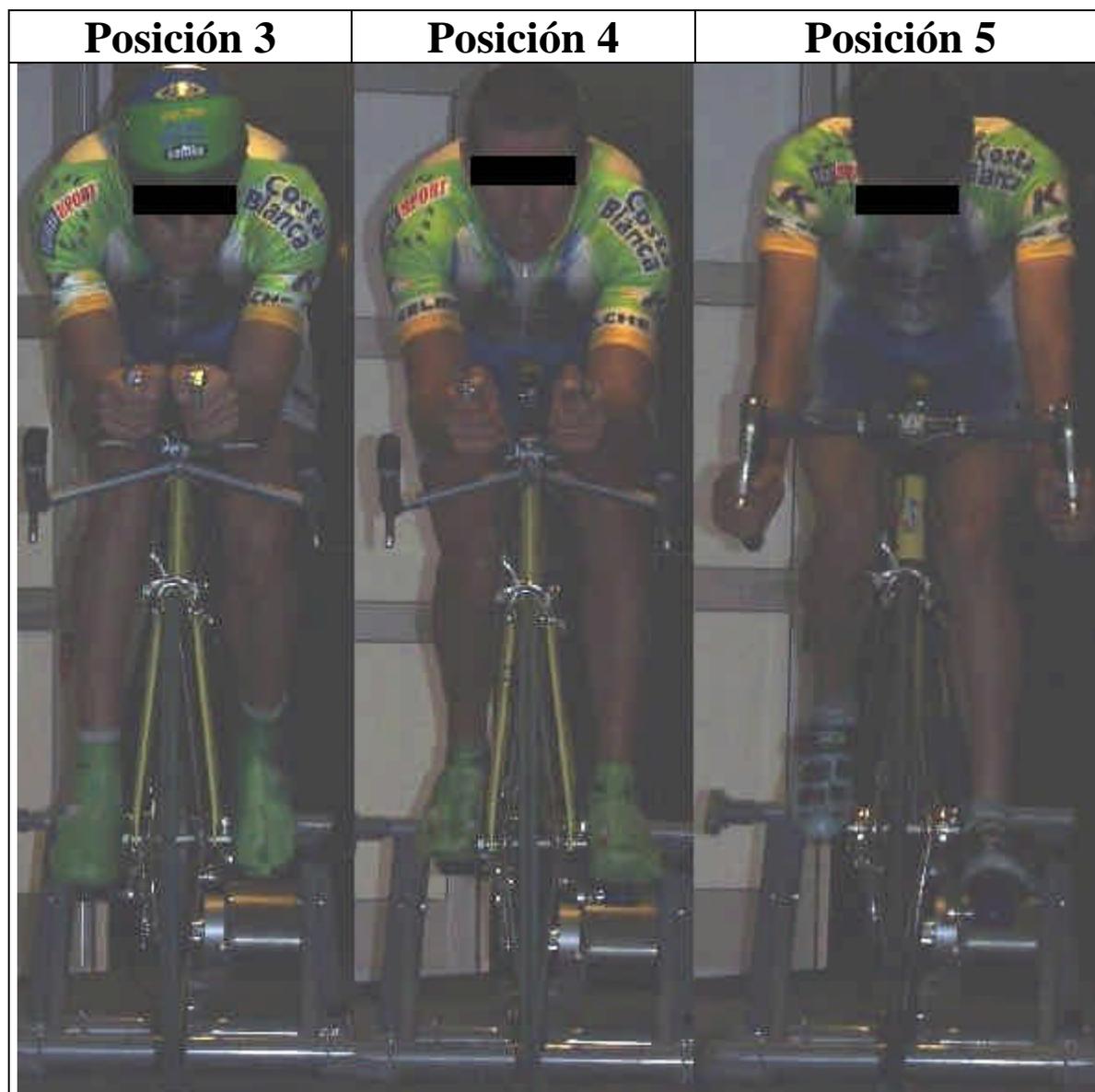


FIGURA 3.- Área Frontal (S) en las posiciones 3, 4 y 5.

dose esta variable según la metodología descrita por Swain y cols.⁽³⁸⁾: pesar con una balanza de precisión (modelo ER182A, A&D Company, Japón, precisión 1/100000 gr) un área de la foto de dimensiones conocidas (4m² pertenecientes aun sistema de referencia de 2x2m) y el área recortada del ciclista y la bicicleta, relacionando ambos pesos y calculando S.

Para el tratamiento gráfico se han utilizado la Hoja de Cálculo Excel-v7.0 (Microsoft Inc., EEUU) y el programa Corel Photopaint-v9.0 (Corel Inc., EEUU) para Windows.

3.- RESULTADOS

En la Tabla I se observa que la posición más aerodinámica para el Ciclista 1 es la Posición 1, siendo de las posiciones dinámicas la n° 4 aquella que menores valores de F_A presenta. Comparando la Posición 2 con la Posición 3 la disminución de F_A es de 10.1N (20.1%), mientras que entre la Posición 4 y la Posición 2 la diferencia es de 15.2N (30.4%). La diferencia entra la posición más aerodinámica con bicicleta de CRI (n° 4) y la posición con bicicleta de carretera (n° 5) es de 294 N (84%). El resto de variables derivadas de F_A se comportan de la misma

forma, en tanto que dependen directamente de ella, no ocurriendo lo mismo con el coeficiente de penetrabilidad del perfil ó Cx, ya que a pesar de aumentar S de la posición 3 a la 4, la resistencia aerodinámica disminuye, lo que se debe a un menor Cx en la Posición 4. Por todos los motivos comentados, al Ciclista 1 se le aconsejó competir en pruebas CRI con el apoyo de antebrazos modificado y sin utilizar el casco.

En la Tabla II se observa que la posición más aerodinámica para el Ciclista 2 es la Posición 1, seguida de la n° 3. Es de destacar que comparando la Posición 1 con la Posición 3 el incremento de F_A es de 3.1N (8.2%), mientras que comparando las posiciones 2 y 3 F_A disminuye en 1.2N (2.8%). Las diferencias entra la posición más aerodinámica con bicicleta de CRI (n° 3) y la posición con bicicleta de carretera (n° 5) son de 30.5N (74.4%). Todas las variables derivadas de F_A siguen una evolución similar, incluso S, aumentando en un 2.2% de la posición 3 a la 4 (menor que el incremento de F_A); lo que indica que el Cx en esta última era menor. Por los motivos expuestos al Ciclista 2 se le aconsejó competir en pruebas CRI con el apoyo de antebrazos modificado y utilizando el casco.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
F_A (N)	32.5	50.2	40.1	35.0	64.4
$F_A/Kg(N/Kg)$	0.4452	0.6877	0.5493	0.4795	0.8822
SC_X (m ²)	0.2368	0.3658	0.2922	0.2550	0.4692
$SC_X/Kg(m^2/Kg)$	0.0032	0.0050	0.0040	0.0035	0.0064
S (m ²)	-	-	0.2867	0.2894	0.3803

TABLA I.-
Valores obtenidos en
el Ciclista 1.

Fuerza de arrastre en valores absolutos (F_A) y relativos (F_A/Kg). Coeficiente de succión aerodinámica en valores absolutos (SC_X) y relativos (SC_X/Kg). Area frontal del ciclista (S).

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
F_A (N)	37.9	42.2	41	43.2	71.5
$F_A/Kg(N/Kg)$	0.4859	0.5410	0.5256	0.5538	0.9167
SC_X (m ²)	0.2761	0.3075	0.2987	0.3148	0.5209
$SC_X/Kg(m^2/Kg)$	0.0035	0.0039	0.0038	0.0040	0.0067
S (m ²)	-	-	0.3096	0.3167	0.3511

TABLA II.-
Valores obtenidos en
el Ciclista 2.

Fuerza de arrastre en valores absolutos (F_A) y relativos (F_A/Kg). Coeficiente de succión aerodinámica en valores absolutos (SC_X) y relativos (SC_X/Kg). Area frontal del ciclista (S).

En la Tabla III se observa que la posición más aerodinámica para el Ciclista 3 también es la Posición 1, siendo de las posiciones dinámicas la nº 3 y nº 4 aquéllas que de menores valores de F_A presentan. Comparando la Posición 1 con las posiciones 3 y 4 el incremento de F_A es de 3.3N (9.3%), mientras que entre la Posición 2 y las posiciones 3 y 4 es de 6.9N (15.1%). Las diferencias entre la posición más aerodinámica con bicicleta de CRI (nº 3) y la posición con bicicleta de carretera (nº 5) son de 20.0N (51.5%). Todas las variables derivadas de F_A siguen una evolución similar, excepto S, que disminuye un 10.2% entre las posiciones 3 y 4, manteniéndose los valores de F_A , lo que indica que el Cx de la Posición 4 es mayor. Por los motivos expuestos al Ciclista 3 se le aconsejó competir en pruebas CRI con el apoyo de antebrazos modificado, siendo indiferente la utilización o no del casco, pero no utilizándolo en caso de aparecer cualquier tipo de duda.

Comparando los resultados de resistencia aerodinámica relativos al peso corporal (F_A/Kg y SCx/Kg) en los tres ciclistas observamos que los menores valores para la posición estática (nº1), la posición de pedaleo más aerodinámica (nº 2 ó 3 ó 4) y la Posición 5 son para el Ciclista 1, seguido por el Ciclista 2 y el Ciclista 3. Los ciclistas 1 y 2 disminuyen el Cx en la Posición 4 respecto a la Posición 3; en el Ciclista 3 ocurre lo contrario.

4.- DISCUSIÓN

Utilización del túnel de viento para valorar la resistencia aerodinámica.

El test de resistencia tradicional ^(6,14), que consiste en arrastrar con una motocicleta y un cable equipado

con medidores extensiométricos a una o dos bicicletas, ha sido criticado por la turbulencia de aire generada por el vehículo remolcador y las alteraciones en las condiciones climatológicas, especialmente el viento, que pueden afectar a los resultados obtenidos ⁽¹³⁾.

El uso de un transductor de fuerza bastante ligero en el eje trasero de la rueda (Max One[®]) ha sido cuestionado por su pobre linealidad con la potencia real y la influencia de las condiciones ambientales (especialmente el viento) en la constancia de su medida ⁽¹⁸⁾. Una alternativa podía ser el dinamómetro de biela (SRM[®]), capaz de registrar las fuerzas aplicadas y la velocidad de pedaleo ^(4,9). Su principal inconveniente es el poco tiempo que se ha utilizado en la literatura científica específica, habiéndose validado comparándolo con un dinamómetro Calrig[®], con el que las variaciones han oscilado entre un 0-10% ⁽²⁹⁾, con un cicloergómetro de freno mecánico Monark[®], donde las variaciones no fueron superiores al 1% ⁽²⁶⁾ y con un potenciómetro tradicional Kingcycle[®], obteniéndose valores inferiores de potencia con el SRM[®], pero resultando sus mediciones más reproducibles ⁽²⁾.

Algunos autores como Capelli y cols. ^(7,8) y Padilla y cols. ⁽³⁴⁾ han estimado la resistencia aerodinámica a partir de extrapolaciones de la potencia mecánica medida en el laboratorio y su relación con la tasa metabólica. Los principales inconvenientes de esta técnica son comunes a los descritos para reproducir el gasto metabólico cuando las características ambientales, la hora de la prueba y los factores intrínsecos al sujeto son cambiantes ⁽³⁰⁾.

El test de deceleración simplificada es el más antiguo, empleado con trenes y automóviles desde 1926

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
F_A (N)	35.5	45.7	38.8	38.8	58.8
$F_A/Kg(N/Kg)$	0.5820	0.7492	0.6361	0.6361	0.9639
SC_X (m ²)	0.2587	0.3330	0.2827	0.2827	0.4284
$SC_X/Kg(m^2/Kg)$	0.0042	0.0055	0.0046	0.0046	0.0070
S (m ²)	-	-	0.3226	0.2896	0.3904

Fuerza de arrastre en valores absolutos (F_A) y relativos (F_A/Kg). Coeficiente de succión aerodinámica en valores absolutos (SC_X) y relativos (SC_X/Kg). Área frontal del ciclista (S).

TABLA III.-
Valores obtenidos en el Ciclista 3.

(12,19) y posteriormente con ciclistas (11,13,20,28), cuyo fundamento es medir la variación de la energía cinética debida a la resistencia aerodinámica a lo largo de un pasillo de dimensiones conocidas. Comparado con el túnel de viento sobreestima la resistencia aerodinámica en un 3.8% (22) y presenta variaciones en medidas repetidas de un 10% o más (37). Aunque recientemente un estudio (5) ha conseguido disminuir estas variaciones controlando estrictamente el viento, la temperatura y las características del pasillo, la gran cantidad de intentos a realizar para cada postura adoptada y la dificultad para que el sujeto sea capaz de reproducirla parecen ser sus mayores inconvenientes.

Se puede afirmar con seguridad que la técnica más fiable para medir la resistencia aerodinámica es la valoración en túneles del viento (22), pudiendo utilizarse para el estudio de situaciones deportivas túneles de circuito cerrado o abierto (17), pero siendo posiblemente mejores los de circuito cerrado, similares al utilizado en este estudio, porque dependen menos de la temperatura del aire que es extraído del exterior y proyectado sobre el ciclista. Se ha comprobado que la variación en mediciones repetidas es menor de un 1% (18), por lo que se han podido constatar los efectos de utilizar diferentes tipos de manillares, tubos, ruedas, etc. (10,33). En este estudio se pretendía observar variaciones en la resistencia aerodinámica dependiendo de pequeñas modificaciones en el apoyo de antebrazos, por lo que la elección del túnel de viento ha sido posiblemente acertada. El principal inconveniente de esta técnica es su elevado coste económico, por lo que son escasos los ensayos realizados con varios ciclistas profesionales de ruta, y más habituales los estudios sobre un único ciclista (24,34), tenido algunos un carácter más divulgativo que científico (23).

Optimización de la resistencia aerodinámica en los ciclistas.

Las pequeñas modificaciones introducidas en el apoyo de antebrazos para cada uno de los ciclistas han supuesto una disminución de la resistencia aerodinámica entre un 2.8% (Ciclista 2) y un 20.1% (Ciclista 1), similares a las obtenidas por otros autores al comparar las posiciones UP (erguida con las manos en el freno de una bicicleta convencional), DP (agarrados de la parte baja de una bicicleta conven-

cional), AP (con manillar aerodinámico), y OP (optimizando la posición en el manillar aerodinámico) (5,18,24), lo que indica que han sido bastante efectivas. Estudios realizados sobre un solo ciclista del equipo profesional Rabobank indicaron que el hecho de bajar el manillar de triatlón 1.8cm, atrasar las almohadillas de apoyo 19cm y levantar el agarre de las manos en las manetas unos 6cm redujo la resistencia aerodinámica en un 11% (24). Sin embargo, estas modificaciones no pueden estandarizarse ni analizarse en posiciones estáticas y haciendo referencia sólo al factor aerodinámico, ya que dependen de la comodidad del ciclista encima de la bicicleta, habiéndose demostrado que una variación muy grande puede suponer un aumento en el gasto metabólico del esfuerzo, contrarrestando las mejoras aerodinámicas (16,21,40); por ello, en nuestro estudio se alternaron pequeñas adaptaciones en consenso con cada ciclista referentes a adelantar el manillar de triatlón y bajar el apoyo de los antebrazos en las almohadillas.

Referente a la utilización del casco, los estudios de Kyle y Caiozzo (1986) indican que el casco de goma disminuye la resistencia aerodinámica un 0.4% sobre la cabeza totalmente desnuda, un 21% sobre la cabeza con el pelo corto y un 30% con el pelo largo. Como se ha observado, la utilización del casco ha supuesto la disminución de la resistencia aerodinámica en uno de los corredores (Ciclista 2), ha sido indiferente en otro (Ciclista 3) y ha perjudicado al tercero (Ciclista 1). Debemos resaltar que los estudios de Kyle y Caiozzo se realizaron en un túnel de la California State University, de dimensiones 61x81cm, con lo que se introdujeron maniqués equipados con diferentes cascos, capuchas y pelucas (27). Dal Monte y cols. (1987) realizaron ensayos con ciclistas reales que usaron cuatro modelos diferentes de casco, obteniendo que sólo uno de ellos redujo el SCx comparado con no utilizar casco, pero indicando que era un modelo demasiado aparatoso, por lo que la tendencia sería a no utilizar casco (10). En este sentido, se afirma que para asegurar resultados óptimos el diseño del casco debería ser personalizado, siendo capaz de mantener el ciclista una posición óptima, lo que es difícil conseguir en estados de esfuerzo máximo (1). Los ciclistas estudiados debieron utilizar el casco en condiciones reales de pedaleo y esfuerzo, por lo que no siempre se mantenía la posición más ideal debido a la costumbre individual de cada uno, y además se debe reconocer que ninguno contaba con un casco

individualizado en lo referente al acople con los hombros y la espalda, aunque sí en cuanto a tamaño.

Consecuencia de estas valoraciones se informó a los responsables del equipo sobre las consideraciones individuales de cada corredor. En el Tour de Francia-2001 participaron los tres corredores, y el equipo Kelme-Costa Blanca consiguió el 5º puesto en la CRE (por equipos), mejorando notablemente su actuación del año anterior, y los puestos 8º (Ciclista 1), 10º (Ciclista 2) y 15º (Ciclista 3) en la CRI individual, donde sólo se introdujeron las modificaciones en el apoyo de antebrazos y no se suprimió la utilización del casco en el sujeto que no se beneficiaba de él (Ciclista 1). En la primera etapa CRI de la Vuelta a España-2001 el Ciclista 1 compitió con la cabeza desnuda, consiguiendo la victoria; en la séptima etapa los tres corredores quedaron entre los 13 primeros (2º el Ciclista 1, 6º el Ciclista 3 y 13º el Ciclista 2) y en la última etapa de CRI ya se había diseñado un casco individual con la particularidad de tener una cola móvil que se acoplaba perfectamente a la espalda (Catlike®, España), ganando este mismo corredor. En esta misma etapa, el Ciclista 3 perdió su primer puesto en la clasificación general, en favor de otro ciclista de peso 74 Kg y talla 183 cm, ya que la ventaja de 25 s no fue suficiente para una CRI de 38 Km, aunque las diferencias (61 s) no fueron tan elevadas como cabría esperar para dos corredores de características antropométricas tan dispares que salieron a disputar la etapa. Por todo lo comentado anteriormente es posible que el estudio aerodinámico de estos ciclistas contribuyera a un aumento en su rendimiento, aunque otros factores de orden táctico (disputar en mayor o menor medida la etapa, etc.) pueden enmascarar dichas mejoras.

Comparación de variables relacionadas con la resistencia aerodinámica.

La disminución de la resistencia aerodinámica en AP respecto a UP y DP se debe a un agrupamiento de los brazos dentro del cuerpo que reduce "S" y a una optimización del "Cx" del perfil. En el presente estudio "S" fue mayor en la Posición 5 que en las Posiciones 3 y 4 (rango 0.0344 - 0.1008 m²), donde su valor osciló entre 0.2867 - 0.3226 m² comparados con los 0.3511 - 0.3904 m² para la Posición 5, mientras que el Cx tuvo una variación individual. Los valores de "S" estimados a partir de la BSA se han

encontrado en un rango entre 0.294 y 0.386 m² para unos⁽³⁾ y entre 0.334 y 0.376 m² para otros⁽³⁴⁾, siendo los 0.376 m² calculados directamente (metodología de Swain y cols., 1986) en M.Indurain para batir del récord de la hora mayores que el valor máximo de nuestro estudio⁽³⁴⁾, debido quizás a que este ciclista era 2 Kg más pesado y 1 cm. más alto que cualquiera de los 5 ciclistas de nuestra muestra. Sin embargo, debe considerarse que estimar "S" a partir de BSA no tiene en cuenta la forma corporal del ciclistas, y presupone que con un mismo peso y talla todos los ciclistas ofrecerían la misma área frontal frontal de choque con el aire.

Encontramos problemas para comparar los valores de SCx con los referidos en la literatura, ya que para la posición UP presenta rangos entre 0.299 y 0.390 m²⁽¹⁸⁾, lo que supone variaciones en la resistencia aerodinámica de un 30%; en DP oscilan entre 0.251 y 0.370 m²^(6,33), significando variaciones del 50% en la resistencia aerodinámica; lo mismo ocurre en AP, con SCx entre 0.172 y 0.304 m²^(34, 13), que son variaciones del 77%; y en OP, con valores entre 0.216 y 0.326 m²^(15,18), que son variaciones del 51%. La heterogeneidad de los valores de SCx en una misma posición pudiera deberse a las siguientes causas:

(a) Las técnicas utilizadas para calcular la resistencia aerodinámica, y dentro de ésta el SCx, son bastante heterogéneas: arrastre tradicional, túneles del viento, dinamómetros en la biela (SRM) o en el piñón trasero (Look), deceleración, etc.

(b) Resulta muy difícil estandarizar y reproducir la posición del ciclista. Existen infinitos perfiles para un mismo agarre, y aunque algunos estudios ofrecen valores del ángulo del tronco con la horizontal^(5,15,18,24), o la posición del manillar aerodinámico respecto al sillín (centímetros más alto o más bajo), se obvian otras características como la longitud y la altura del perfil del ciclista (puede ser más grande o más pequeño), así como la curvatura de la espalda del mismo, etc. Cuando Kyle (1979) midió en túnel de viento el "Cx" reproduciendo la misma posición UP que la referida por Kawamura (1953) encontró variaciones de un 5% (1.042 y 0.992, respectivamente), llegando a la conclusión de que el Cx depende en gran medida de la "forma geométrica"⁽¹⁸⁾. En el presente estudio se ha podido observar cómo la utilización o no del casco (posiciones 3 y 4), posiblemente unido

a modificaciones en la postura, provoca variaciones en el Cx que son individuales para cada corredor.

(c) Muchos de los cálculos del SCx, sobre todo los del modelo matemático ^(3,18,32), se basan en que “S” es proporcional (entre un 15 y 20%) a la superficie corporal del ciclista (BSA). Posteriormente asignan un “Cx” que pueda representar ese perfil, obteniendo a partir de ambos el “SCx”. Calculado de esta forma, los valores de SCx no son reales, sino gruesas aproximaciones. Las investigaciones de Swain y cols. (1987) muestran que “S” no es una proporción fija de BSA, sino que es individual, pudiendo afirmarse que en sujetos más grandes este coeficiente es más pequeño ⁽³⁸⁾. Observando los resultados del presente estudio se constata que la mayor resistencia aerodinámica relativa es obtenida por el Ciclista 3, que es el de menor tamaño (peso y talla), lo que justifica su derrota en la última CRI de la Vuelta a España 2001. Estas afirmaciones están en concordancia con los resultados de Swain y cols (1987).

(d) A pesar de utilizar la misma técnica para determinar el SCx (túnel de viento), la mayoría de los autores realizan el ensayo con el ciclista en posición estática ^(24,28,33,34) y sólo un estudio en túnel de viento al margen del nuestro utiliza posiciones que implican pedaleo ⁽³²⁾, siendo mayores los valores de SCx cuando el ciclista pedalea, ya que se crean turbulencias del aire que choca con las piernas y el que se moviliza con la cubierta y radios de la rueda. Como han intuido otros autores a la hora de valorar la resistencia aerodinámica con arrastre tradicional ⁽⁶⁾ y deceleración simplificada ⁽⁵⁾, el movimiento de las piernas durante la medición aumenta los valores de F_A , por lo que en sus protocolos exigen que los ciclistas muevan las piernas sin transmitir potencia a la cadena que altere los cálculos de estimación de SCx.

(e) El SCx no se puede expresar en términos absolutos (ej. 0.311 m^2), ya que para una misma velocidad del viento y una misma densidad del aire es el único factor que determina F_A . Un ciclista de poco peso

desarrolla menos potencia que uno de mayor peso (potencia = $F_A \times v$), y por lo tanto el SCx debería expresarse en términos relativos al peso corporal (SCx/Kg), o en su caso se deben ofrecer valores de F_A relativos al peso corporal (F_A/Kg) indicando a qué velocidad se ha realizado el ensayo, con lo que se obtendría el (SCx/Kg).

En definitiva, parece poco útil comparar los valores de SCx de ciclistas obtenidos en diferentes estudios por todas las cuestiones comentadas anteriormente, y por lo tanto la principal aplicación de valorar la resistencia aerodinámica sería comparar los resultados de un grupo de ciclistas entre ellos (escogiendo el valor SCx/Kg), pudiendo predecir así su rendimiento en pruebas de CRI, o comparar los valores SCx de un mismo ciclista en diferentes posiciones, lo que permitiría optimizar su rendimiento en dichas pruebas ⁽¹⁵⁾.

5.- CONCLUSIONES

1.- Las modificaciones introducidas en la posición de los ciclistas posiblemente hallan incrementado su rendimiento en competiciones de CRI, aunque no se ha demostrado una correcta utilización del casco por parte de todos ellos. Un aumento de la distancia del eje de pedalier al eje delantero pudiera beneficiar a algunos de los ciclistas estudiados.

2.- Para comparar la resistencia aerodinámica de ciclistas profesionales es necesario considerar algunas fuentes de error: técnica utilizada para valorar la resistencia aerodinámica, valores de resistencia aerodinámica y coeficientes de succión aerodinámica relativizados al peso corporal, valoración estática o dinámica, etc.

3.- El túnel de viento es la única técnica útil en la valoración de la resistencia aerodinámica para el incremento del rendimiento ciclista en competiciones CRI.

B I B L I O G R A F Í A

- 1 **ALVAREZ, G.** Análisis y optimización biomecánica de la técnica de pedaleo ciclista. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra. San Sebastián, 1995.
- 2 **BALMER, J.; DAVISON, R.C.R.; COLEMAN, D.A. y BIRD, S.R.** The validity of power output recorded during exercise performance tests using a Kingcycle air-braked cycle ergometer when compared with an SRM powermeter. *Int. J. Sports Med.* 2000, 21 (3): 195-199.
- 3 **BASSETT, D.R.; KYLE, C.R.; PASSFIELD, L.; BROKER, J.P. y BURKE, E.R.** Comparing cycling world hour records, 1967-1996: modeling with empirical data. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1999, 31: 1665-1676.
- 4 **BROKER, J.P.; KYLE, C.R. y BURKE, E.R.** Racing cyclist power requirements in 4000-m individual and team pursuits. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1999, 31: 1677-1685.
- 5 **CANAU, R.B.; GRAPPE, F.; MENARD, M.; BARBIER, B.; MILLET, G.Y.; HOFFMAN, M.D.; BELLI, A. y ROUILLON, J.** Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1999, 31: 1441-1444.
- 6 **CAPELLI, C.; ANTONUTTO, G.; ZAMPARO, P.; GIRARDIS, M. y DI PRAMPERO, P.E.** Effects of prolonged cycle ergometer exercise maximal muscle power and oxygen uptake in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 1993, 66: 189-195.
- 7 **CAPELLI, C. y DI PRAMPERO, P.E.** Effect of altitude on top speeds during 1h unaccompanied cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 1995, 71: 469-471.
- 8 **CAPELLI, C.; SCHENA, F.; ZAMPARO, P.; DAL MONTE, A.; FAINA, M. y DI PRAMPERO, P.E.** Energetics of best performances in track cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1998, 30: 614-624.
- 9 **CRAIG, N.** Measuring power output - the SRM Powermeter developed in Germany. *Bicycling Australia.* 1995, 6 (3): 66-68.
- 10 **DAL MONTE, A.; LEONARDI, L.M.; MENCHINELLI, C. y MARINI, C.** A new bicycle design based on biomechanics and advanced technology. *Int. J. Sports Biomech.* 1987, 3 (3): 287-292.
- 11 **DAVIES, C.T.M.** Effect of air resistance on the metabolic cost and performance of cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 1980, 45: 245-254.
- 12 **DAVIS, W.J.** The tractive resistance of electric locomotives and cars. *Electric Rev.* 1926, 29: 685-700.
- 13 **DE GROOT, G.; SARGEANT, A. y GEYSEL, J.** Air friction and rolling resistance during cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1995, 27: 1090-1095.
- 14 **DI PRAMPERO, P.E.; CORTILI, G.; MOGNONI, P. y SAIBENE, J.** Equation of motion of a cyclist. *J. Appl. Physiol.* 1979, 67: 242-255.
- 15 **GARCÍA-LÓPEZ, J.; PELETEIRO, J.; NAVAS, F.J.; RODRÍGUEZ-MARROYO, J.A.; GONZÁLEZ, M.A.; VILLA-VICENTE, J.G. y CÓRDOVA, A.** Biomechanical study of aerodynamic resistance among professional cyclists in wind tunnel. *Archivos de Medicina del Deporte.* 2001, 85: 511.
- 16 **GNEHM, P.; REICHENBACH, S.; ALPTPETER, E.; WIDMER, H. y HOPPELER, H.** Influence of different racing positions on metabolic cost in elite cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1997, 29: 818-823.
- 17 **GONZALEZ, M.A.; PÉREZ, G.; MARTÍN, A.; PÉREZ, A.; PRIEGO, R.; ROBLEDO, J.; RODRIGUEZ, A.; ROSA, S. y SÁNCHEZ, C.** Aplicaciones del túnel aerodinámico en el entrenamiento y mejora de las técnicas deportivas. *Investigaciones en Ciencias del Deporte.* 1998, 19: 11-71.
- 18 **GRAPPE, F.; CANAU, R.; BELLI, A. y ROUILLON, J.D.** Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics.* 1997, 40: 1299-1311.
- 19 **GRIFFITH, J.M. y VENHUIZEN, J.R.** Least-squares estimates of automotive-drag coefficients from coast-down tests. *Proceedings of the American Control Conference.* 1986, 1: 189-194.
- 20 **GROSS, A.C.; KYLE, C.R. y MALEWICKI, D.J.** The aerodynamics of human powered vehicles. *Sci. Am.* 1983, 249: 142-152.
- 21 **HEIL, D.P.** The pressor response to submaximal cycle ergometry while using aerodynamic handlebars. *Int. J. Sports Med.* 1997, 18: 1-7.
- 22 **HOERNER, S.F.** Résistance à l'avancement dans les fluides. Ed Gauthier-Villars. Paris, 1965.
- 23 **INTA.** Los ciclistas de Banesto eligen el INTA. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Madrid, España. <<http://www.inta.es/areas/inta.es/numero2/articulos/18.ciclista.htm>> [Consulta: 12/06/2001]
- 24 **JEUKENDRUP, A.E. y MARTIN, J.** Improving cycling performance. *Sports Med.* 2001, 31 (7): 559-569.
- 25 **JOHNSON, S. y SCHULTZ, B.** The physiological effects of aerodynamic handlebars. *Cycling Sci.* 1990, 2: 9-12.
- 26 **JONES, S.M. y PASSFIELD, L.** The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. En: The engineering of sport. S.J.Haake (Ed.). Oxford: 265-274, 1998.
- 27 **KYLE, C.R. y CAIOZZO, V.J.** The effect of athletic clothing aerodynamics upon running speed. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1986, 18 (5): 509-515.
- 28 **KYLE, C.R. y VAN VALKENBURGH, P.** Trainability of pedaling and running skills. In: Biomedical Division: Sport for all; Oja, P. And Delalma, R. (Eds.). Elsevier Science Publisher B.V., 1991: 155-161.

- 29 **LAWTON, E.W.; MARTIN, D.T. y LEE, H.** Validation of SRM power cranks using dynamic calibration (abstract). Sydney, Australia <<http://www.ausport.gov.au/fulltext/1999/iocwc/abs199a.htm>> [Consulta: 7/05/2001].
- 30 **LÓPEZ, J.L. y LEGIDO, J.C.** Umbral anaerobio: bases fisiológicas y aplicación. Ed. Interamericana McGraw-Hill. Madrid, 1991.
- 31 **LUCIA, A.; HOYOS, J.; PEREZ, M. y CHICHARRO, J.L.** Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2000, 32 (10): 1777-1782.
- 32 **MARTIN, J.C.; MILLIKEN, D.L.; COBB, J.E.; MCFADDEN, K.L. y COGGAN, A.R.** Validation of a mathematical model for road cycling power. *J. Appl. Biomech.* 1998, 14: 276-291.
- 33 **MENARD, M.** L'aerodynamique et le cyclisme. Int Conf Cyclig Biomech San Sebastian, Spain, 1992.
- 34 **PADILLA, S.; MUJKA, I.; ANGULO, F. y GOIRIENA, J.J.** Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J. Appl. Physiol.* 2000, 89: 1522-1527.
- 35 **RFEC.** Reglamentos: Reglamento del deporte ciclista. Real Federación Española de Ciclismo. Madrid, España. <<http://www.rfec.com/reguci.html>> [Consulta: 05/06/2001].
- 36 **SCIENCE OF CYCLING.** Science and cycling: aerodynamics. EEUU <<http://www.exploratorium.edu/cycling/aerodynamics1.html>> [Consulta: 7/05/2001].
- 37 **SCHURING, D.J.** The rolling loss of pneumatic tires. *Rubber Chem. Technol.* 1980, 53: 600-727.
- 38 **SWAIN, D.P.; RICHARD, J.; CLIFFORD, P.S.; MILLIKEN, M.C. y STRAY-GUNDERSEN, J.** Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *J. Appl. Physiol.* 1987, 62: 668-672.
- 39 **TIPLER, P.A.** Física. Ed. Reverté. Barcelona, 1995.
- 40 **WELBERGEN, E. y CLIJSEN, P.V.M.** The influence of body position on maximal performance in cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 1990, 61: 138-142.