

Núm. Orden: 0299

Título: Valoración biomecánica de la resistencia aerodinámica en ciclistas profesionales: aspectos metodológicos.

Autores: García-López, J.; Peleteiro, J.; Rodríguez-Marroyo; Córdova, A.*; Villa-Vicente, J.G.

Procedencia: ICAFD de Castilla y León, Universidad de León.

* Kelme-Costa Blanca. Universidad de Valladolid.

Correo: inejgl@unileon.es

INTRODUCCIÓN.

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. Cualquier modificación, por pequeña que sea, puede provocar variaciones en la fuerza de arrastre entre 1N y 5N, lo que a velocidades de 14m/s (50Km/h) supone un ahorro entre 14W y 70W (16,31). Cuando un ciclista profesional es evaluado en el laboratorio con un cicloergómetro de freno electromagnético, los valores máximos de potencia aeróbica (en el $VO_{2máx}$) son de 450-550W (30), y sólo ligeramente superiores en algunos ciclistas como Miguel Indurain, que desarrolló una potencia 572W preparando el récord de la hora (32). 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 (24,26). Para medir esta resistencia aerodinámica de los ciclistas se han utilizado diferentes técnicas, entre las que se encuentra el túnel del viento (4).

Test de resistencia tradicional. Consiste en arrastrar con una motocicleta a dos bicicletas unidas entre sí con otro cable, manteniendo en todo momento los ciclistas de ambas bicicletas una postura predeterminada. El cable que va de la motocicleta a la primera bicicleta tiene una longitud de 50m., mientras que entre la primera y la segunda bicicleta la longitud escogida se elige a voluntad. Si en ambos cables se colocan unos sensores de fuerza mediante galgas extensiométricas se conocerán directamente las fuerzas de resistencia totales (rodadura y aerodinámica) que actúan sobre el ciclista (5,13). Sin embargo, la turbulencia del aire establecida por el vehículo remolcador y las alteraciones en las condiciones climatológicas, especialmente el viento, pueden afectar a los resultados obtenidos (12).

Análisis de regresión entre la resistencia aerodinámica y la velocidad durante el pedaleo real. Con esta técnica, la resistencia aerodinámica es medida con un transductor de fuerza montado en el eje de la rueda trasera (marca Look). Sin embargo, la precisión de este método parece estar limitado por la pobre linealidad de transductor y los efectos de alteraciones en las condiciones ambientales, especialmente el viento (17).

Tasa metabólica obtenida en laboratorio. Consiste en medir la potencia y el gasto metabólico del ciclista en el laboratorio, extrapolando estos resultados a tests de campo, fundamentalmente contra-reloj de diferentes distancias, posiciones y velocidades (6,7,32). Los principales inconvenientes de esta técnica son comunes a los descritos para estimar el gasto metabólico a partir de otras técnicas como ergoespirometría, lactacidemia, etc. (29).

Método de deceleración simplificado. Se basa en medir la pérdida de energía cinética debida al rozamiento de rodadura y aerodinámico. Ha sido utilizado desde 1926 con trenes (11), posteriormente con automóviles (18) y también con ciclistas (10,12,19,27). Comparados los valores de resistencia aerodinámica de este método con la técnica estática del túnel del viento se observa una sobreestimación del 3.8 % (21). Como principales inconvenientes de este método se consideran los errores debidos a los efectos del viento, la temperatura, y las diferentes pendientes; además, estas variables indeterminadas degradan la precisión del test hasta el punto de que las pruebas repetidas han mostrado variaciones del 10% o más (33).

Dinamómetros de biela. Son unos sistemas de galgas extensiométricas y telemetría que se colocan en el pedalier (SRM) registrando las fuerzas aplicadas al mismo y la velocidad de pedaleo. La combinación de estas variables permite calcular la resistencia aerodinámica y de rodadura que acontecen en el desplazamiento del ciclista (3,8). Los principales inconvenientes de este sistema se deben al 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% (28), con un cicloergómetro de freno mecánico Monark, donde las variaciones no fueron superiores al 1% (25) y con un potenciómetro tradicional Kingcycle, obteniéndose valores inferiores de potencia con el SRM, pero resultando sus mediciones más reproducibles (1).

Túneles del viento. Es la técnica más fiable para medir la resistencia aerodinámica y consiste en colocar al ciclista encima de una plataforma de fuerzas situada en el interior del túnel del viento, generando artificialmente una corriente de aire en régimen de circulación laminar, y midiendo la fuerzas que actúan sobre él a partir de las medidas de las plataformas de fuerzas (21). Existen diferentes tipos de túnel,

utilizándose en el ciclismo los túneles de tipo subsónico (ya que las velocidades del desplazamiento del ciclista son relativamente bajas) y de circuito cerrado (mejor adecuación de la temperatura del aire en la cámara de ensayo) (16). El túnel del viento ha sido utilizado como test de referencia para medir la resistencia aerodinámica en ciclismo, habiéndose demostrado su validez y reproducibilidad (4). El principal inconveniente de esta técnica es el elevado coste económico de un ensayo, pero permite analizar con mayor precisión la resistencia aerodinámica del ciclista, así como la resistencia obtenida con la utilización de diferentes tipos de materiales: manillares convencionales o tipo delta, tubos convencionales o con perfil de “gota de agua”, ruedas de 4 bastones o lenticulares, etc. (9,31). Son escasos los estudios realizados en túneles del viento con ciclistas profesionales de ruta (32), y siempre estos ensayos han sido realizados sobre un único ciclista, tenido un carácter más divulgativo que científico (22).

El objetivo de este estudio es cuantificar la resistencia aerodinámica de ciclistas profesionales en el túnel del viento y compararla con los valores referidos en la literatura .

MATERIAL Y MÉTODO.

En el estudio participaron 5 ciclistas profesionales de ruta ($71.6 \pm 2.7\text{Kg}$ y $1.79 \pm 0.03\text{m}$), 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 obtuvieron información sobre los objetivos del estudio y las pruebas a realizar, dando su consentimiento por escrito. Los ciclistas fueron sometidos a varias pruebas de resistencia aerodinámica en túnel del viento (figura-1). Dichas pruebas fueron de carácter estático (no existía pedaleo) y dinámico con resistencia (sobre un potenciómetro instalado encima de la plataforma de fuerzas). Durante la prueba estática (Posición 1) los ciclistas mantuvieron los dos pies horizontales al suelo. Las pruebas dinámicas fueron realizadas a un ritmo de CRI durante un periodo de tiempo de 10 minutos, utilizando la bici de CRI estándar y el casco (Posición 2), la bici de CRI modificada en el apoyo de antebrazos y con casco (Posición 3), en una posición similar a la anterior pero sin utilizar casco (Posición 4) y utilizando una bicicleta de carretera convencional sin casco (Posición 5). Las modificaciones en el apoyo de antebrazos para las posiciones 3 y 4 consistieron en bajar la almohadilla de reposabrazos unos 2-3cm y adelantar las manetas del manillar del triatlón. Dichas modificaciones se llevaron a cabo tras puesta en común entre los ciclistas y el mecánico del equipo.

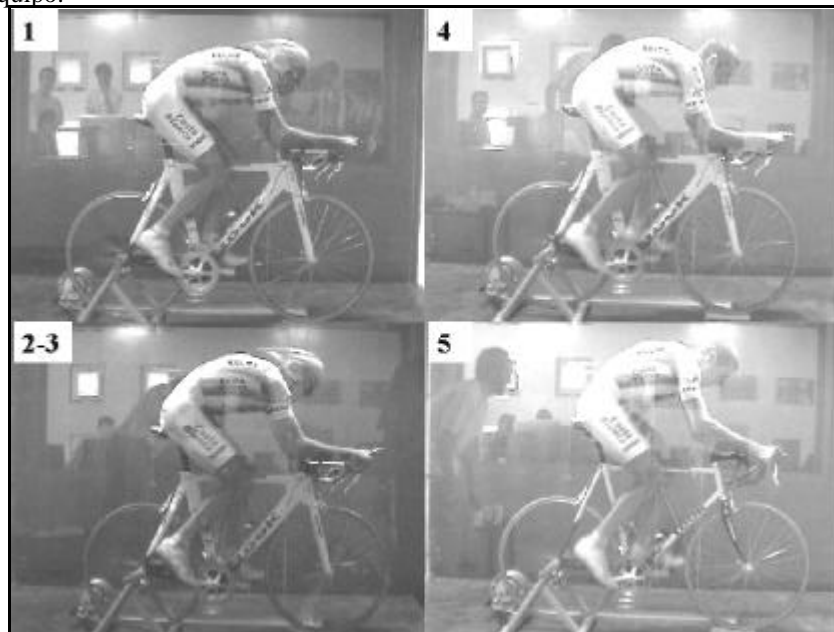


Figura-1.-Las cinco posiciones sobre la bicicleta analizadas en este estudio.

Los valores de resistencia aerodinámica se obtuvieron en un túnel del viento subsónico 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). Para ello se necesitaron combinar una serie de elementos:

- La velocidad del viento en la cámara de ensayo correctamente controlada mediante un anemómetro.
- La velocidad del viento constante durante la realización del ensayo, al igual que el flujo de viento totalmente laminar al entrar en contacto con el ciclista.

- La balanza dinamométrica constaba de un transductor extensiométrico calibrado mediante cargas estáticas, con una sensibilidad de 0.1N para las fuerzas anteroposteriores (Fx), permitiendo un correcto “ajuste de cero” con el corredor colocado encima.
- La frecuencia de muestreo de la balanza dinamométrica fue de 1000Hz, lo que resulta importante en la realización de los ensayos dinámicos donde el ciclista se encuentra pedaleando.
- Los datos de fuerza obtenidos del transductor de la balanza se registraron durante un intervalo de tiempo superior a 5s., tomándose como dato de resistencia aerodinámica (N) el valor medio de fuerza 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. La variable obtenida de la balanza dinamométrica fue la fuerza de arrastre en valores absolutos (F_A), y derivadas de ésta, el coeficiente de succión aerodinámica en valores absolutos (SC_x) y relativos (SC_x/Kg), obtenido al aplicar la ecuación de Newton para estimar la fuerza de arrastre " $F_A=0.5 \times SC_x \times v^2 \times \rho$ ". Donde F_A es la fuerza de arrastre en N, SC_x es el coeficiente de succión aerodinámica en m^2 , v^2 es la velocidad del aire durante el ensayo (15m/s) y ρ la densidad del aire durante el ensayo (1.22Kg/m³).

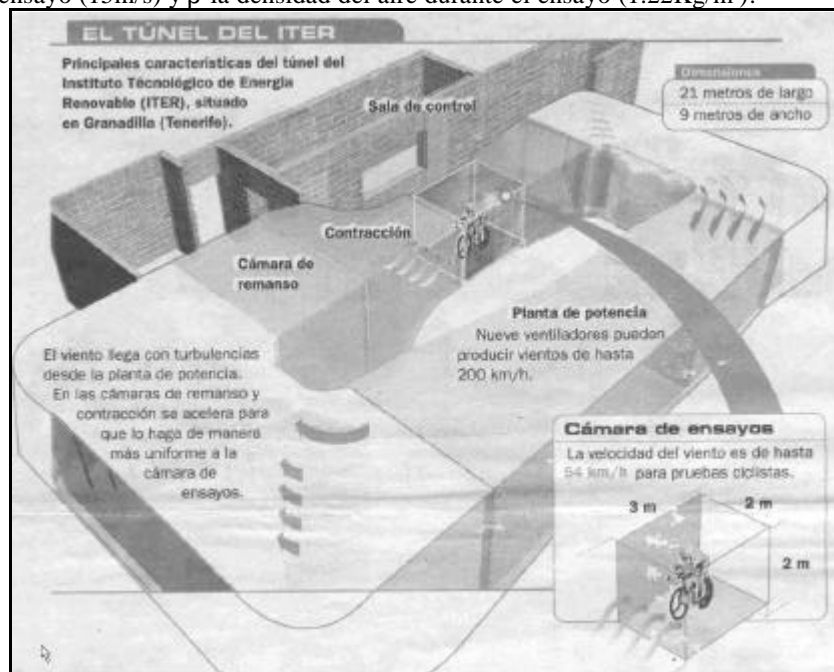


Figura-2.-Características del túnel del viento subsónico y de circuito cerrado.

La superficie corporal del ciclista (BSA) fue calculada a partir del peso y de la talla, aplicando la ecuación de Du Bois y Du Bois (1916) $BSA = 0.007184 \times BM^{0.425} \times H^{0.725}$, donde BM es la masa del ciclista en Kg y H es la altura del ciclista en cm.

Para el tratamiento gráfico y estadístico se han utilizado la Hoja de Cálculo Excel-v7.0 y el programa estadístico *Statistica-v4.5* para Windows. Los resultados se muestran como valores medios y error estándar de la media (E.E.M.). Las diferencias entre las cinco posiciones se analizan mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon para datos apareados. Las correlaciones entre variables se obtienen mediante la prueba no paramétrica de Spearman. Los niveles de significación “p” se han identificado como: * = p<0.05; ** = p<0.01; *** = p<0.001.

RESULTADOS.

En la tabla-1 se presentan los valores de SC_x de los 5 ciclistas estudiados en las 5 posiciones sobre la bicicleta, remarcándose en negrita la posición más aerodinámica para cada uno de ellos. Todos los ciclistas se vieron favorecidos por la modificación del apoyo de antebrazos, en tanto que sus menores SC_x se obtienen en las posiciones 3 y 4. El uso del casco (Posición 3) fue efectivo en 3 de ellos (sujetos 2 y 3), no fue efectivo en uno (sujeto 1) y resultaba indiferente en el otro (sujeto 5).

	Posicion1	Posicion2	Posicion3	Posicion4	Posicion5	Influencia del casco
Sujeto 1	0,237	0,366	0,292	0,255	0,469	+14.5%
Sujeto 2	0,276	0,307	0,299	0,315	0,521	-5.1%
Sujeto 3	0,291	0,321	0,299	0,306	0,515	-2.3%
Sujeto 4	0,237	0,377	0,293	0,326	0,469	-10.1%
Sujeto 5	0,259	0,333	0,283	0,283	0,428	0%
MEDIA	0,260	0,341	0,293	0,297	0,481	-1.3%
FEM	0,010	0,012	0,003	0,011	0,015	0.08%

Tabla-1.-Valores de SCx para los 5 sujetos en las 5 posiciones analizadas. Influencia del casco en la resistencia aerodinámica % En negrita la posición más ventajosa

En la tabla-2 se reflejan las relaciones significativas para los 20 ensayos con bicicleta de CRI entre las variables antropométricas (peso, talla y superficie corporal) y la resistencia aerodinámica absoluta y relativa expresadas como SCx y SCx/Kg, respectivamente. Se destacan relaciones entre la resistencia aerodinámica relativa (SCx/Kg) y el peso ($r=-0.54$ y $p<0.01$), y entre la talla ($r=-0.42$ y $p<0.05$) y la superficie corporal ($r=-0.54$ y $p<0.01$). La relación entre SCx y SCx/Kg, aunque significativa ($r=0.67$ y $p<0.001$), no es directa, debido a la influencia del peso del ciclista en la resistencia aerodinámica.

DISCUSIÓN.

Las pequeñas modificaciones introducidas en el apoyo de antebrazos para cada uno de los ciclistas han supuesto una disminución de la resistencia aerodinámica de un 14.5%, 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 convencional), AP (con manillar aerodinámico) y OP (optimizando la posición en el manillar aerodinámico) (4,14,17,23), 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% (23). 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 (15,20,34); 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.

Otros estudios indican que el casco de goma disminuye la RA entre 0.4-30% (6), y en nuestros resultados la utilización del casco ha supuesto una disminución no significativa de la RA en un 1.3%, favoreciendo a 3 de los corredores y perjudicando al otro. Debemos resaltar que el estudio referido se llevó a cabo en un túnel de dimensiones 61x81cm, con lo que se introdujeron maniqués y no ciclistas. Ensayos con ciclistas reales usando cuatro modelos diferentes de casco afirman que sólo uno de ellos redujo el SCx, pero resultaba demasiado aparatoso, por lo que se aconsejó no utilizar casco (2). Así, el diseño del casco debe ser personalizado, siendo capaz de mantener al ciclista una posición óptima, lo que es difícil conseguir en estados de esfuerzo máximo. 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.

Encontramos problemas para comparar nuestros valores de resistencia aerodinámica con los de otros estudios debido a los motivos que a continuación se exponen:

- 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.
- Resulta muy difícil estandarizar para reproducir la posición del ciclista, ya que existen infinitos perfiles para un mismo agarre; algunos estudios ofrecen valores del ángulo del tronco con la horizontal (4,14,17,23), o la posición del manillar aerodinámico respecto al sillín (centímetros más alto o más bajo), pero 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.
- Muchos de los cálculos del SCx, sobre todo los del modelo matemático (2,17,32), 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", pero claro está que no dejan de ser gruesas aproximaciones.
- A pesar de utilizar la misma técnica para determinar el SCx (túnel del viento), la mayoría de los autores realizan el ensayo con el ciclista en posición estática (23,27,31,32) y sólo uno al margen del nuestro utiliza posiciones que implican pedaleo, 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.

- El SCx no se puede expresar en términos absolutos (0.251 ó 0.311m^2), ya que para una misma velocidad de desplazamiento o del viento (v) y una misma densidad del aire (ρ) es el único factor que determina la resistencia aerodinámica (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 (v), con lo que se obtendría el (SCx/Kg).

CONCLUSIONES.

- 1- Para comparar la resistencia aerodinámica de ciclistas profesionales valorada con diferentes técnicas es necesario considerar algunas fuentes de error.
- 2- Los valores de SCx deberían relativizarse a las características antropométricas de los corredores o a su rendimiento ergométrico.
- 3- La principal aplicación de valorar la resistencia aerodinámica en túnel del viento es comparar los resultados de un grupo de ciclistas entre ellos (escogiendo el valor SCx/Kg), pudiendo predecir así su rendimiento en pruebas de contrarreloj, o comparar los valores SCx de un mismo ciclista en diferentes posiciones, lo que permite optimizar su rendimiento en dichas pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

- Balmer, J.; Davison, R.C.R.; Coleman, D.A.; 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* 21 (3): 195-199, 2000.
- Bassett, D.R.; Kyle, C.R.; Passfield, L.; Broker, J.P.; Burke, E.R.. Comparing cycling world hour records, 1967-1996: modeling with empirical data. *Med Sci Sports Exerc* 31: 1665-1676, 1999.
- Broker, J.P.; Kyle, C.R., Burke, E.R. Racing cyclist power requirements in 4000-m individual and team pursuits. *Med Sci Sports Exerc* 31: 1677-1685, 1999.
- Candau, R.B., Grappe, F., Menard, M., Barbier, B., Millet, G.Y., Hoffman, M.D., Belli, A., Rouillon, J. Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med Sci Sports Exerc* 31: 1441-1444, 1999.
- Capelli, C.; Antonutto, G.; Zamparo, P.; Girardis, M.; Di Prampero, P.E. Effects of prolonged cycle ergometer exercise maximal muscle power and oxygen uptake in humans. *Eur J Appl Physiol* 66: 189-195, 1993.
- Capelli, C.; Di Prampero, P.E. Effect of altitude on top speeds during 1h unaccompanied cycling. *Eur J Appl Physiol* 71: 469-471, 1995.
- Capelli, C.; Schena, F.; Zamparo, P.; Dal Monte, A.; Faina, M.; Di Prampero, P.E. Energetics of best performances in track cycling. *Med Sci Sports Exerc* 30: 614-624, 1998.
- Craig, N. Measuring power output- the SRM Powermeter developed in Germany. *Bicycling Australia* 6 (3): 66-68, 1995.
- Dal Monte, A.; Leonardi, L.M.; Menchinelli, C.; Marini, C. A new bicycle design based on biomechanics and advanced technology. *Int J Sports Biomech* 3 (3): 287-292, 1987.
- Davies, C.T.M. Effect of air resistance on the metabolic cost and performance of cycling. *Eur J Appl Physiol* 45: 245-254, 1980.
- Davis, W.J. The tractive resistance of electric locomotives and cars. *Electric Rev* 29: 685-700, 1926.
- De Groot, G.; Sargeant, A.; Geysel, J. Air friction and rolling resistance during cycling. *Med Sci Sports Exerc* 27: 1090-1095, 1995.
- Di Prampero, P.E.; Cortili, G.; Mognoni, P.; Saibene, J. Equation of motion of a cyclist. *J Appl Physiol* 67: 242-255, 1979.
- García-López, J.; Peleteiro, J.; Navas, F.J.; Rodríguez-Marroyo, J.A.; González, M.A.; Villa-Vicente, J.G.; Córdova, A. Biomechanical study of aerodynamic resistance among professional cyclists in wind tunnel. *Archivos de Medicina del Deporte*: 85: 511, 2001.
- Gnehm, P.; Reichenbach, S.; Altpeter, E.; Widmer, H.; Hoppeler, H. Influence of different racing positions on metabolic cost in elite cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29: 818-823, 1997.
- Gonzalez, M.A.; Pérez, G.; Martín, A.; Pérez, A.; Priego, R.; Robledo, J. Rodríguez, A.; Rosa, S. y Sánchez, C. Aplicaciones del túnel aerodinámico en el entrenamiento y mejora de las técnicas deportivas. *Investigaciones en Ciencias del Deporte* 19: 11-71, 1998.
- Grappe, F.; Candau, R.; Belli, A.; Rouillon, J.D. Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics* 40: 1299-1311, 1997.
- Griffith, J.M.; Venhuizen, J.R. Least-squares estimates of automotive-drag coefficients from coast-down tests. *Proceedings of the American Control Conference* 1: 189-194, 1986.
- Gross, A.C.; Kyle, C.R.; Malewicki, D.J. The aerodynamics of human powered vehicles. *Sci Am* 249: 142-152, 1983.
- Heil, D.P. The pressor response to submaximal cycle ergometry while using aerodynamic handlebars. *Int J Sports Med* 18: 1-7, 1997.
- Hoerner, S.F. *Résistance à l'avancement dans les fluides*. Ed Gauthier-Villars. Paris, 1965.
- 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]
- Jeukendrup, A.E. y Martin, J. Improving cycling performance. *Sports Med.* 31 (7): 559-569, 2001.
- Johnson, S., Schultz, B. The physiological effects of aerodynamic handlebars. *Cycling Sci* 2: 9-12, 1990.
- 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.
- Kyle, C.R.; Caiozzo, V.J. The effect of athletic clothing aerodynamics upon running speed. *Med Sci Sports Exerc* 18 (5): 509-515, 1986.
- Kyle, C.R.; 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.
- Lawton, E.W.; Martin, D.T.; 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].

López, J.L.; Legido, J.C. Umbral anaerobio: bases fisiológicas y aplicación. Ed. Interamericana McGraw-Hill. Madrid, 1991.

Lucia, A.; Hoyos, J.; Perez, M.; Chicharro, J.L. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc* 32 (10): 1777-1782, 2000.

Menard, M. L'aerodynamique et le cyclisme. *Int Conf Cyclig Biomech San Sebastian, Spain* 1992.

Padilla, S., Mujika, I., Angulo, F., Goiriena, J.J. Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J Appl Physiol* 89: 1522-1527, 2000.

Schuring, D.J. The rolling loss of pneumatic tires. *Rubber Chem Technol* 53: 600-727, 1980.

Welbergen, E. Y Clijsen, P.V.M. The influence of body position on maximal performance in cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 61: 138-142, 1990.