

**CAPITULO II**  
**LA FUERZA PROPULSIVA EN NATACION**

---

## **2.1. Introducción**

---

Cuando una persona se desplaza en el agua utilizando un estilo de competición sus brazos se mueven alternativa o simultáneamente adelante y atrás por debajo y sobre el agua, a la vez que sus pies lo hacen abajo y arriba en flexión plantar o hacia atrás y adelante en flexión dorsal. El colocar manos, antebrazos y pies de una adecuada manera, y desplazarlos en la trayectoria oportuna proporcionará unos valores de fuerza propulsiva mayores que si no se efectúa así. Para conseguir saber si el movimiento y posición son correctos hay que tener en cuenta principios similares a los que explican la propulsión de una hélice de un barco o la sustentación del ala de un avión y todo ello relacionado con un sistema espacial de referencia.

Cuando observamos la trayectoria de la mano de un nadador vemos una línea que corresponde a la proyección de esa trayectoria en el plano de observación. Si observamos al nadador de manera que se acerca o se aleja de nosotros, estamos viendo la trayectoria en un plano frontal, si el nadador lo observamos por encima o mejor por debajo, la trayectoria se proyecta en el plano horizontal y si vemos al nadador pasar por delante de nosotros de derecha a izquierda o viceversa consideramos una trayectoria sobre el plano sagital. Para comprender los fenómenos propulsivos adecuadamente, las trayectorias deben de considerarse en relación al espacio estático y no en relación a un punto referencial móvil como pueda ser el hombro.

Según Webb (1984) como ocurre con cualquier cuerpo sólido sometido a propulsión, el movimiento hacia delante es el resultado neto de las fuerzas que tienden a hacerlo avanzar y de las que lo frenan. La fuerza propulsiva (F.P.) es el empuje generado por los movimientos de la Natación. Las fuerzas oponentes proceden de la Resistencia inercial y de la Resistencia al avance por parte del agua. En este capítulo analizaremos la Fuerza Propulsiva.

## **2.2. Fuerza Propulsiva de las Extremidades Superiores:**

---

Las observaciones y análisis efectuados sobre una gran cantidad de nadadores, en los últimos 20 años, han llevado a la conclusión general de que la fuerza propulsiva que realiza el nadador con sus manos es la suma vectorial de dos fuerzas, cuya correcta interacción tendrá como resultado que la F.P. esté dirigida horizontalmente hacia delante y por tanto su valor para desplazar el cuerpo será mucho mayor.

Cada una de estas dos fuerzas, que se suman vectorialmente, responden a dos distintos principios físicos. En primer lugar analizaremos la Fuerza de Arrastre (F.A.) que es el resultado de la propia resistencia de la mano al moverse en el agua y después la Fuerza de Sustentación (F.S.) que se explica básicamente por el Principio de Bernoulli.

### **2.2.1. Fuerza de Arrastre:**

Hasta hace poco tiempo, en que la investigación sólo había aparecido esporádicamente en el deporte de la natación, toda la propulsión generada por el nadador con los brazos, se explicaba únicamente por el **Principio de Acción y Reacción**. A toda acción le corresponde una reacción igual y de sentido opuesto. El movimiento hacia atrás a través del agua, de la mano (que ofrece una cantidad de resistencia), produce una reacción de ésta en el cuerpo, causando un cambio en su posición de equilibrio. El agua es acelerada y movida en dirección opuesta a la que uno desea ir. Esta forma de propulsión explica el desplazamiento de algunos animales que realizan movimientos oscilatorios. Esta fuerza se conseguirá en función de la Resistencia Total de la mano y el brazo contra el agua. Se crea por tanto una zona de alta presión en la palma de la mano y una zona de baja presión en el dorso. Según Redondo, Morris y Cano (1981) "*la componente de arrastre de la fuerza puede considerarse compuesta de un término de arrastre viscoso, producido por la fricción laminar de la mano, un término de arrastre de forma, compuesto por resistencia frontal y succión posterior, producido por el déficit de momento de la estela al existir separación de las líneas de corriente y la mano. También existe un arrastre inducido o de vórtice producido por el extremo de la mano*".

La fuerza producida tiene la misma dirección del movimiento de la mano y sentido contrario. Sin embargo, esta F.A. creada no es tan grande como para hacer mover el cuerpo hacia delante la misma distancia que se movió la mano hacia atrás. Se produce un efecto similar a si resbalara la mano en el agua, ya que el agua que se empuja directamente hacia atrás, ya es agua en movimiento y producirá menor "apoyo".

En 1971 J.E. Counsilman explicó la poca eficacia del uso de este tipo de tracción diciendo: *"Una propulsión eficaz se obtiene empujando una gran masa de agua una corta distancia sin mucha aceleración.....Es mayor la eficacia en el agua que se logra por el desplazamiento de una gran cantidad de agua una corta distancia, que la que se consigue moviendo una pequeña cantidad de agua una larga distancia"*. Según Martin (1989) el empuje hacia delante que se consigue empujando el agua hacia atrás es igual al momento lineal (cantidad de movimiento),  $m \cdot v$  (producto de la masa por la velocidad) del agua. La energía requerida para acelerar el agua, que es movida hacia atrás cada segundo, es proporcional a  $m \cdot v^2$ . Puede pensarse que el empuje hacia delante es independiente de la relación entre  $m$  y  $v$ , pero la energía requerida es menor si  $v$  es pequeña. Es más eficiente, mecánicamente hablando, para un nadador mover una mayor aleta, o tener una mano más grande y moverla lentamente, que tener una superficie propulsora menor y moverla a más velocidad.

### **2.2.2. Fuerza de Sustentación:**

La otra fuerza producida por la mano del nadador es la fuerza de sustentación hidrodinámica, que se genera en dirección perpendicular a la del movimiento de la mano. Este tipo de fuerza es la que utiliza la hélice (medio de propulsión acuático más eficaz que se conoce), sus hojas no empujan el agua directamente hacia atrás, sino que se mueven hacia delante encontrando continuamente agua en reposo. (Redondo y Cano, 1979)

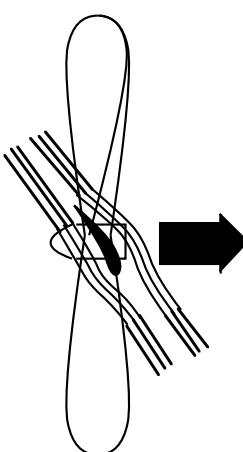


Figura 2.1.: Fuerza propulsora obtenida por la hélice al girar en un plano perpendicular a la dirección de movimiento.

Counsilman (1971) explica dicha F.S. por el Principio de Bernoulli. La forma de la mano y un ángulo de ataque adecuado producirán una mayor velocidad en el flujo de agua que pasa por el dorso de la mano que por la palma. De acuerdo con el principio de Bernoulli (a mayor velocidad la presión del fluido es menor) resulta que en el dorso de la mano la presión que ejerce el agua sobre su superficie es menor que sobre la palma, creándose una diferencia de presión, teniendo como resultado la F.S.

Las teorías hidrodinámicas que explican la sustentación están basadas en estudios realizados durante el Renacimiento. La **ecuación de continuidad** enunciada por Leonardo de Vinci dice así (Catalá,1979,pág.171): "*En cualquier sección normal a un tubo de corriente, siempre que no varíe la densidad, el producto del área de la sección por la velocidad del fluido en ella es constante*". Lo cual se expresa con la siguiente igualdad:

$$S \cdot v = S' \cdot v' = cte \quad (2.1)$$

Donde  $S$  es la sección del tubo de corriente y  $v$  la velocidad. Si en el tubo de corriente variamos sus secciones "*allí donde la sección sea más pequeña el fluido se desplazará más rápido que donde la sección es mayor*".

El **teorema de Bernoulli** dice: "*En el seno de un fluido incompresible y sin rozamiento, la suma de la presión hidrostática, la debida a la altura y la debida a la velocidad es constante en todos los puntos de la corriente fluida*" (Catalá,1979, pág.177). Se expresa por medio de la siguiente fórmula:

$$\boxed{P_1 + p g h_1 + \frac{1}{2} p v_1^2 = P_2 + p g h_2 + \frac{1}{2} p v_2^2} \quad (2.2)$$

Donde  $P$  es la presión,  $p$  es la densidad,  $g$  es la gravedad,  $h$  es la altura y  $v$  la velocidad de las líneas de corriente.

Por tanto **las velocidades y las presiones son inversamente proporcionales**. Donde el fluido se mueve más rápido se producirá menor presión y donde se mueve más lento la presión será mayor. (Ver figura 2.2.A). Esta situación se da en fluidos llamados "ideales" o "perfectos", fluidos homogéneos sin viscosidad. Este hipotético fluido es un líquido que fluye o se desliza sobre un cuerpo sólido sin fricción y es incompresible. Ser incompresible significa que la densidad del fluido no es afectada por las variaciones de presión (Marchaj, 1988). En un fluido como el agua, existe un

contacto con los cuerpos que se mueven a través de ella. Su viscosidad o rozamiento interno hace que las partículas en contacto con el objeto sean frenadas o aceleradas por él.

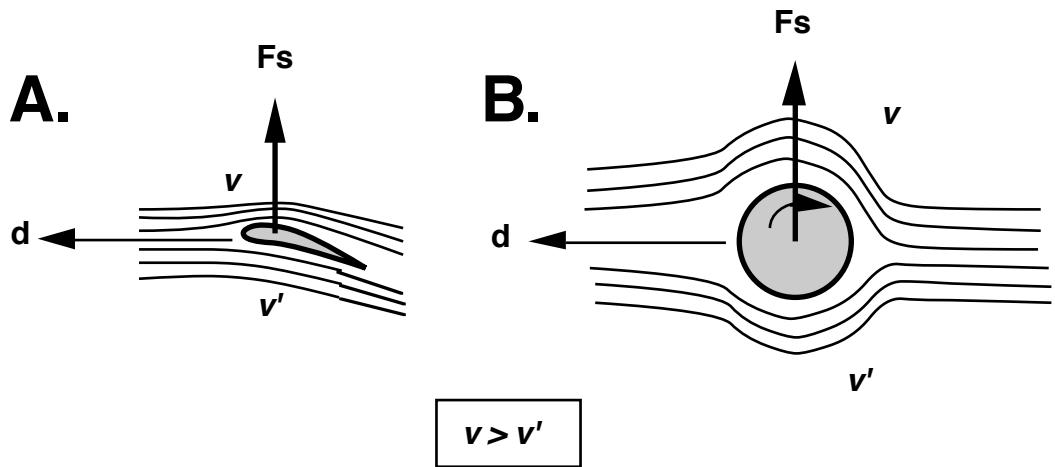


Figura 2.2.: **A.** La diferencia de velocidad entre la parte superior e inferior del ala, hace que existan diferencias también entre las presiones. Al ser la velocidad  $v$  mayor que la velocidad  $v'$ , la presión encima del ala es menor que debajo, diferencia de presiones que genera la sustentación ( $Fs$ ). **B.** En un objeto esférico en rotación, la velocidad del fluido es mayor en las partes donde el rozamiento con la superficie de la esfera acelera al fluido. Se genera también fuerza de sustentación por la diferencia de velocidades y presiones. La dirección de movimiento del objeto se ha denominado "d". Téngase en cuenta que las líneas de corriente dibujadas alrededor de la esfera perderán la simetría al comenzar a rotar.

El efecto Magnus es una aplicación directa de lo dicho, cuando una pelota se lanza con efecto, (ver figura 2.2.B) describe una trayectoria curva. El movimiento de una parte de la pelota en el sentido de las líneas de corriente acelerando el aire a su paso y de la otra parte en sentido contrario, enlenteciéndolo, produce sustentación, ya que hay más presión donde se mueve más lento el aire y menos donde se mueve más rápido.

El fenómeno de la generación de F.S. se produce de forma diferente en un cilindro o esfera en rotación que en un ala, una hélice o una mano. En los dos casos se consigue un diferencial de velocidades y por tanto de presiones entre las superficies inferiores y superiores. El cilindro debe rotar para generar circulación<sup>1</sup> y por tanto sustentación. La pregunta en este momento sería: ¿Cómo se produce circulación alrededor de un ala, una hélice o una mano? Utilizando el mismo procedimiento que Catalá (1979) o Marchaj (1988) trataremos de explicarlo para el caso de una mano utilizada como elemento propulsor en el medio acuático:

Un nadador al colocar su mano con relación a su trayectoria en un determinado ángulo de ataque<sup>2</sup> ( $\alpha$ ) crea dos torbellinos o vórtices principales detrás de su mano como consecuencia de las líneas de corriente que pasan por encima y debajo de la mano. En el caso visto anteriormente de la mano en  $90^\circ$  a la dirección de movimiento ( $\alpha = 90^\circ$ , ver figura 2.3.A), los dos vórtices son iguales y como el teorema del momento cinético<sup>3</sup> así lo exige, se anulan mutuamente quedando sólo como resultante la fuerza de la resistencia o arrastre. Al cambiar a un ángulo inferior (disminuir el ángulo de ataque, ver figura 2.3.B y C), uno de los vórtices se hará más intenso que el otro y para compensar esta diferencia de momento cinético, tiene que originarse en el fluido y alrededor de toda la mano otro vórtice, de igual sentido que el vórtice que perdió intensidad, con objeto de que el momento cinético total siga siendo nulo.

El vórtice generado detrás de la mano de mayor magnitud se visualiza con gran facilidad en el laboratorio en los tuneles de viento o en canales hidrodinámicos, donde el fluido lleva partículas que permiten ver el comportamiento del flujo alrededor de un objeto. A este vórtice se le denomina vórtice inicial. Dicho torbellino induce circulación alrededor del objeto.

---

<sup>1</sup>El concepto de circulación se define como el producto de velocidad tangencial del fluido cíclico y sus dimensiones (dimensiones de una circunferencia en el caso de un cilindro en rotación:  $2\pi r$ ). Marchaj(1988)

<sup>2</sup> Ángulo formado entre la superficie de la mano y la dirección de movimiento de la misma en el agua.

<sup>3</sup> La variación del momento cinético respecto al cuerpo es igual al momento de la fuerza aplicada al cuerpo respecto a un punto fijo. Siendo el momento cinético de un móvil con respecto a un punto fijo el producto vectorial de la distancia entre dicho punto al móvil por la cantidad de movimiento ( $m \cdot v$ ) de que está animado.

Este vórtice, alrededor de la mano, acelera el fluido por encima y lo frena por debajo de la mano, con lo que se genera la sustentación, además de la propia resistencia de la mano o arrastre. *Por tanto la fuerza total será la suma vectorial de la sustentación y la*

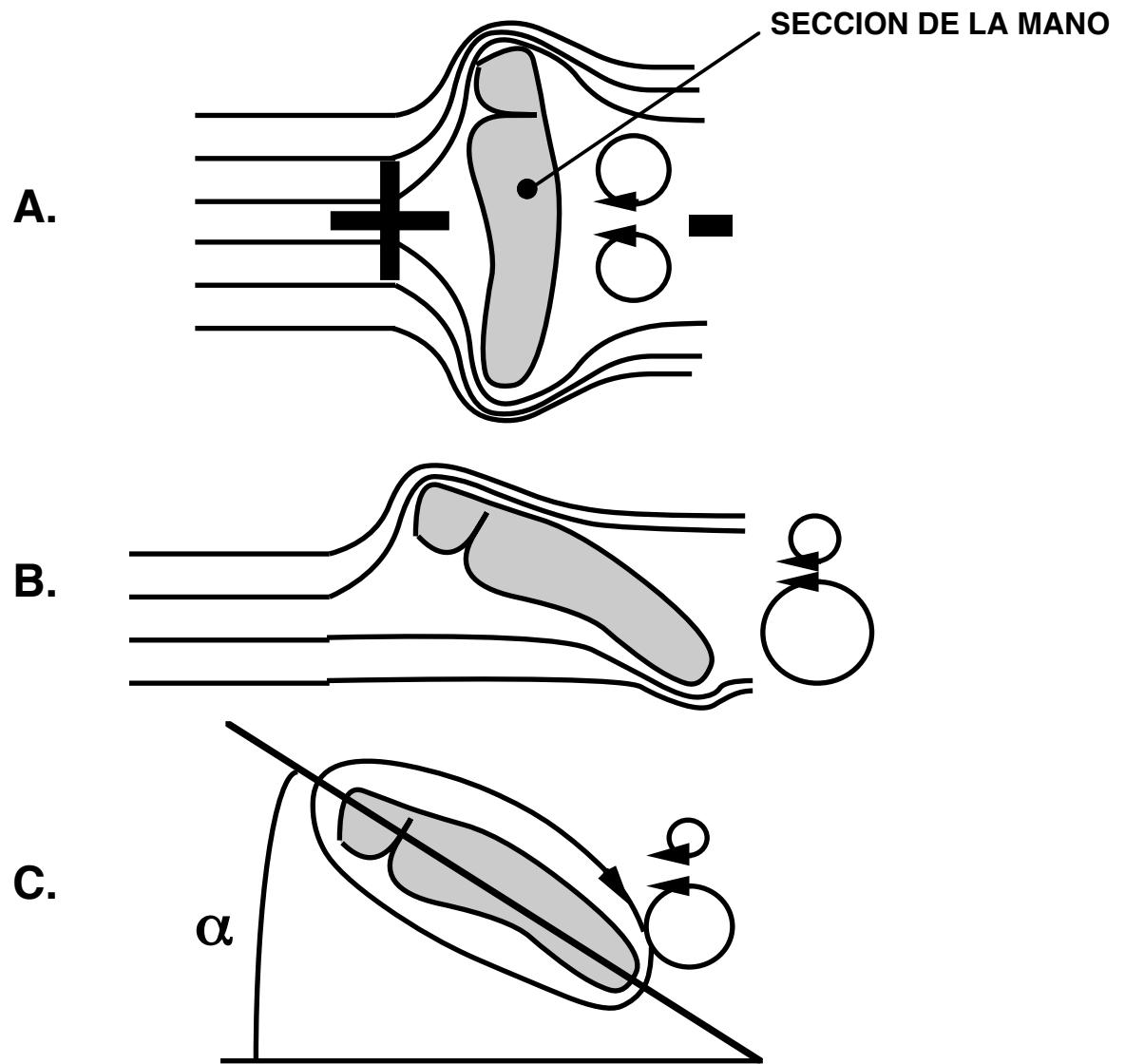


Figura 2.3.: Diagrama de la visualización teórica de los vórtices generados por la mano al desplazarse en el agua, al modificarse el ángulo de ataque.

*resistencia o arrastre y en nuestro caso a partir de ahora se llamará fuerza propulsiva o propulsora.*

Esta F.S. no se producirá si la mano se lleva directamente hacia atrás, obteniéndose cuando la mano se mueve lateral y verticalmente, debiendo cambiar de posición al cambiar de sentido. De estos movimientos que son perpendiculares a la dirección de movimiento del cuerpo, resultará una F.S. dirigida paralelamente a dicha dirección.

La cuantificación de la sustentación desde el punto de vista de los torbellinos, fue establecida independientemente por Kutta (1902) y por Joukowski (1906), estableciendo lo que se ha dado en llamar el teorema de Kutta-Joukowski, que dice: "*un perfil en reposo situado en un campo de velocidad uniforme y alrededor del cual existe una circulación experimenta una fuerza de sustentación.*". Esta teoría explica la sustentación en secciones de movimientos bidimensionales, sin embargo presenta problemas cuando la sección representa una envergadura finita, por ejemplo en un ala (Larrabie, 1980). Esto provoca que en el extremo de una superficie sustentadora se genere lo que se llama un torbellino o vórtice de punta. Al ser la mano también de unas dimensiones limitadas se producen esos vórtices de punta, que son fácilmente visibles en el comienzo de los movimientos propulsivos de los estilos crol, mariposa y espalda, por las burbujas que acompañan a la mano en su entrada en el agua (Colwin, 1985)

### **2.2.3. Trayectoria propulsiva y posición de la mano**

---

Estas teorías propulsivas explican por qué los nadadores realizan trayectorias curvilíneas, con continuos cambios tanto en la dirección, como en la posición de la mano. Hay que abandonar la idea de que la mano se desplaza hacia atrás, ya que ésta incluso llega a salir del agua por delante de donde entró. Los nadadores poco eficientes si mueven en mayor proporción la mano hacia atrás, resbalándose y propulsando en menor cantidad.

Otra razón para el error de suponer que la mano se mueve hacia atrás exclusivamente es el hecho de que se suele confundir el movimiento de la mano relativo al cuerpo con el movimiento relativo al agua. Sólo este último puede describir las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la mano.

Según Barthels (1979) cuando las F.S. se usan dentro del movimiento de la técnica de cualquiera de los estilos, resisten el movimiento hacia atrás de la mano mientras los músculos propulsores se contraen, esto produce que el cuerpo se mueva hacia delante relativo a la mano y al agua. Cuanto mayor sea la F.S. menor movimiento

hacia atrás se producirá en la mano y por tanto más se desplazará el cuerpo hacia delante.

### **2.3. Interacción de la fuerza de arrastre y de sustentación:**

---

Trayectoria y posición de la mano están íntimamente relacionadas, la variación en la posición de la mano lleva como consecuencia la necesidad de una variación en la trayectoria propulsiva, siendo en algunos casos imposible aplicar fuerza en el agua con una posición de la mano determinada si no es acompañada de una trayectoria concreta. Los cambios en la dirección de la trayectoria según Counsilman (1971) vienen dados por la necesidad de buscar agua que no está en movimiento y proporcionar mayor apoyo al nadador.

Es necesario en este momento definir algunos términos que hemos de usar repetidamente a partir de ahora:

- **Dirección:** Tangente a la trayectoria en un instante de su recorrido.
- **Angulo:** Medida en grados o radianes de la posición de la mano con relación a la dirección de movimiento obteniéndose dos tipos de parámetros definidores de la posición de la mano:

- $\Psi$  : **Angulo de Azimut.** Dirección que toma el fluido al circular alrededor de la mano, siendo las cuatro direcciones fundamentales de la mano:

- $0^\circ$  : De dedo pulgar a dedo meñique.
- $90^\circ$ : De dedos a muñeca.
- $120^\circ$ : De dedo meñique a dedo pulgar.
- $270^\circ$ : De muñeca a dedos.

Es posible valorar todas las posiciones intermedias.

-  $\alpha$  : **Angulo de Ataque:** Una mano con un " $\Psi$ " determinado puede colocarse en una inclinación con relación a la dirección de movimiento que oscilará entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este ángulo es fundamental para obtener los niveles de interacción entre las dos fuerzas.

- **Angulo Optimo** será aquel que consiga hacer que la F.P. sea máxima y además esté dirigida hacia donde más interese al nadador (en el caso del estilo crol horizontal y hacia delante).

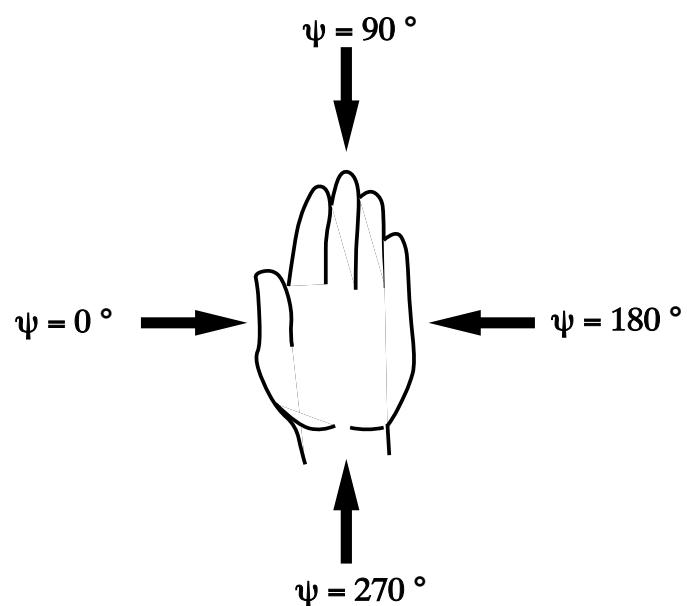


Figura 2.4.: Direcciones básicas que puede tomar el fluido con relación a la mano. Este ángulo se denomina de azimut ( $\Psi$ ).

Estudios realizados por Schleihauf (1979), con modelos de plástico, de manos en tubos de corriente, muestran la variación de la F.S. y la F.A. en función del ángulo de ataque en distintos ángulos de azimut. (diagramas polares, ver figuras 2.5 y 2.6)

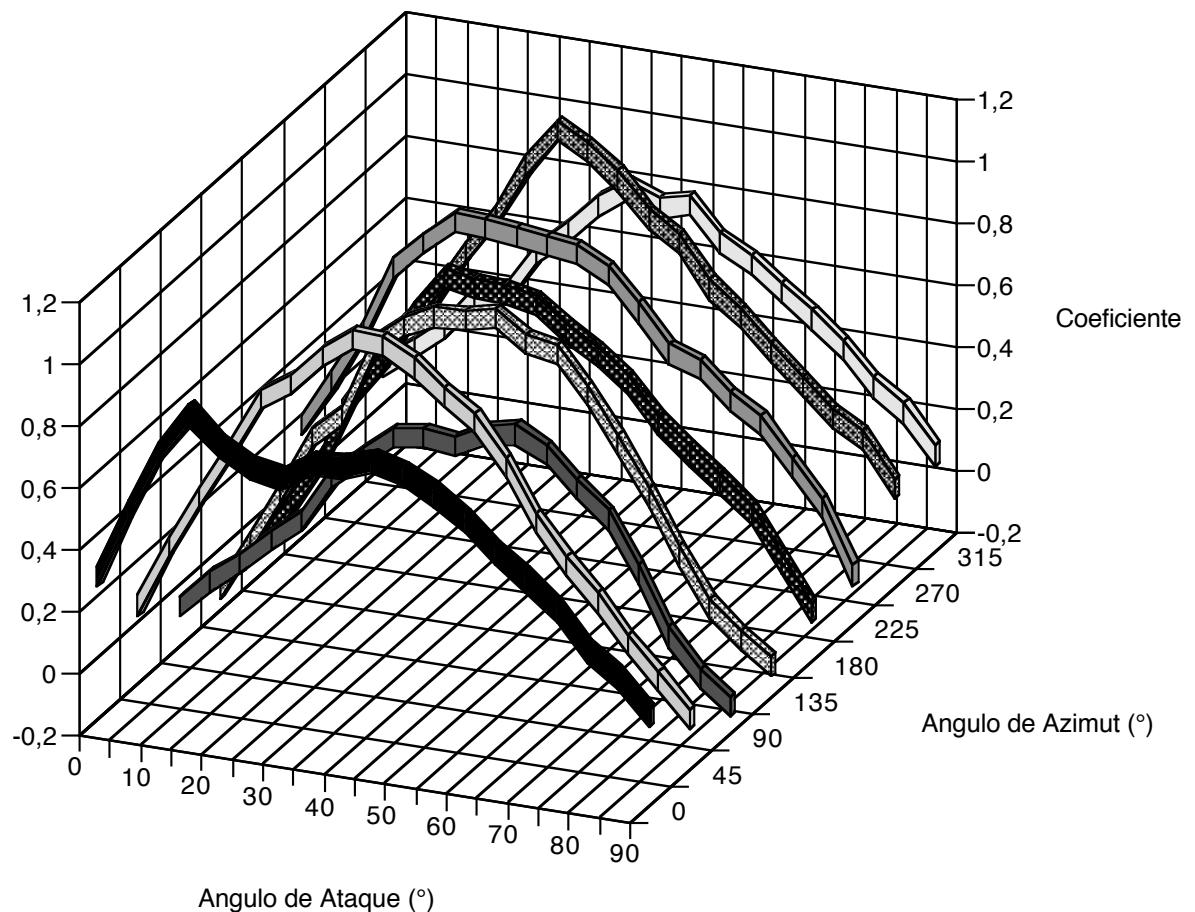
- Los valores máximos de F.S. se encontrarán entre  $20^\circ$  y  $60^\circ$  y los valores máximos de F.A. se hayan entre los  $50^\circ$  y  $90^\circ$ .
- El valor de la F.A. máximo resulta entre un 20% y 30% mayor que la F.S. máxima.
- Encontró que el ahuecar la mano, separar ligeramente los dedos entre sí y separar el pulgar del resto de la mano podía suponer en algunos casos aumentar ligeramente la F.P. en la mano.

La variación de la F.S. y la F.A. con relación a los distintos ángulos de azimut es pequeña, no ocurriendo lo mismo con los ángulos de ataque, que oscilan entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , resumiéndose su efecto de la siguiente manera:

- Angulo Agudo: La F.S. aumenta rápidamente y la F.A. es pequeña.
- Angulo Medio: La F.S. es máxima y la F.A. aumenta.
- Angulo Próximo a  $90^\circ$ : La F.S. es casi nula y la F.A. es máxima.

Para obtener una determinada fuerza propulsiva el nadador tiene las posibilidades anteriores (mas las infinitas intermedias). El que se use una u otra dependerá de la capacidad que tenga el nadador para mover la mano a una determinada velocidad, venciendo la fuerza que se opone al avance de la mano. Esta fuerza variará según la colocación de la mano. En posiciones de mayor resistencia la velocidad de desplazamiento es menor que en posiciones con un ángulo de ataque más pequeño. La sustentación se generará principalmente por la mano, ya que es un segmento corporal muy maniobrable y que tiene una geometría muy apropiada para hacerlo.

Por tanto, se puede decir que el nadador tiene con su mano distintas maneras de obtener una F.P. Debe utilizar en cada fase aquella que coloque la F.P. en orientación óptima. Los buenos nadadores continuamente ajustan sus manos, de manera que optimizan la resultante de los vectores F.A. y F.S. Esto puede parecer una difícil tarea, pero estos nadadores por medio de la propiocepción de la fuerza actuante en la mano, responden a la resultante misma en vez de a todas las demás variables necesarias para controlar ese movimiento de la mano (Martin, 1989).



Angulo de Ataque ( $^{\circ}$ )

Angulo de Azimut ( $^{\circ}$ )

Figura 2.5: Diagrama polar del coeficiente de sustentación obtenido en un modelo de mano, resultado de las mediciones obtenidas en un tubo de corriente, variando para cada ángulo de azimut el ángulo de ataque de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ . (Adaptado de Schleihauf, 1979).

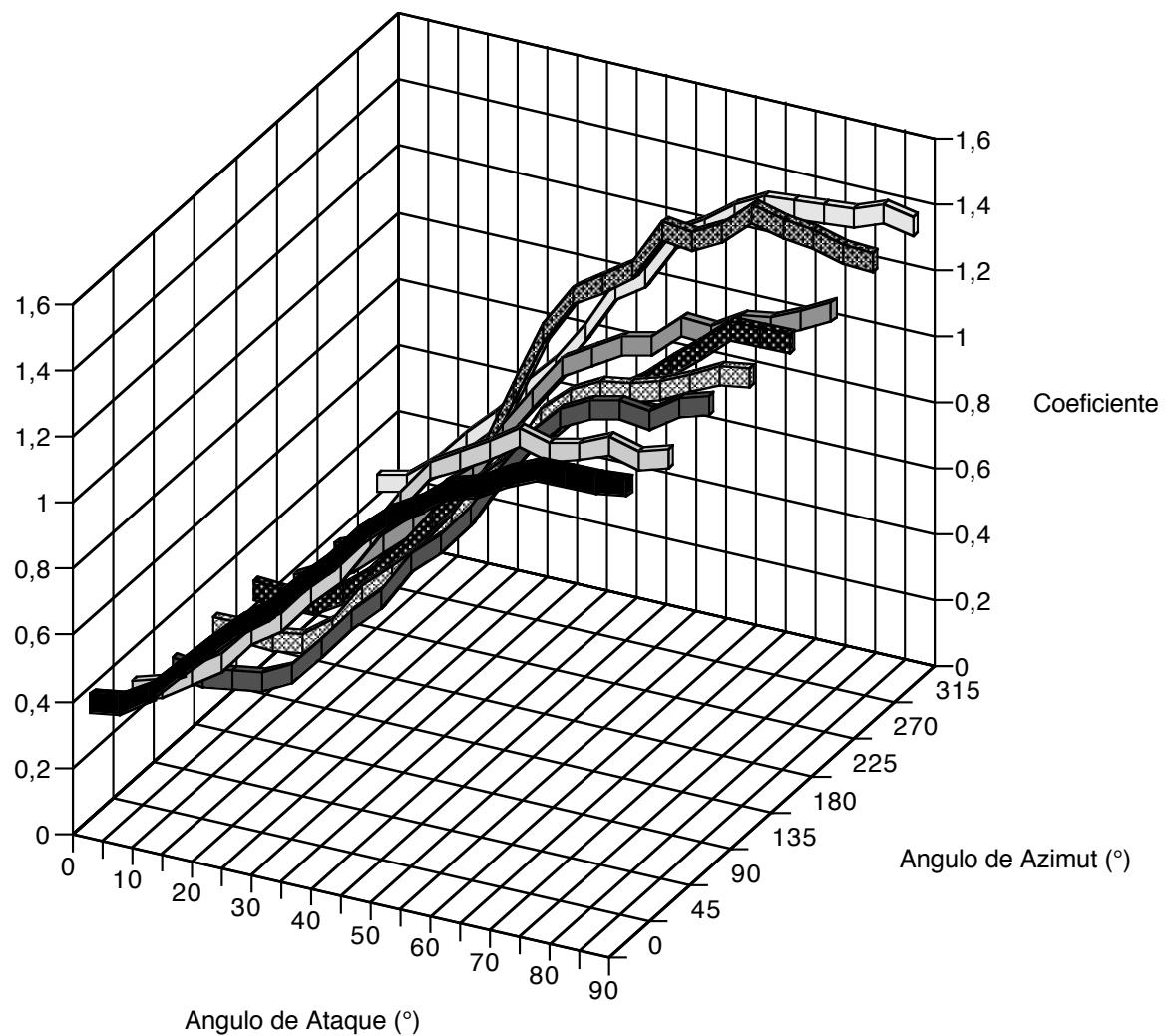


Figura 2.6: Diagrama polar del coeficiente de arrastre obtenido en un modelo de mano, resultado de las mediciones obtenidas en un tubo de corriente, variando para cada ángulo de azimut el ángulo de ataque de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . (Adaptado de Schleihauf, 1979).

En los ejemplos siguientes se pueden observar los ángulos de azimut y ataque en tres posiciones de la tracción: a) movimiento hacia abajo en crol, b) movimiento hacia dentro en braza y c) movimiento hacia arriba en crol o mariposa (ver figura 2.7).

En el primer caso (ver figura 2.7.A) la fuerza de sustentación dirige la fuerza propulsiva hacia delante, gracias a un ángulo de ataque adecuado. El agua circula de la illema de los dedos a la muñeca con lo que se crea una diferencia de presión entre el dorso y la palma de la mano. En esta fuerza propulsiva con dirección hacia arriba no se puede utilizar para avanzar hacia delante (flecha negra gruesa) nada más que su componente horizontal ( $F_{px}$ ) la cual será el valor neto de fuerza que hará moverse al nadador hacia delante. Por tanto, para que esta fase sea eficaz es necesario buscar un adecuado ángulo de ataque.

En el segundo caso (ver figura 2.7.B) las manos se mueven hacia dentro, con un ángulo de ataque, que permitirá crear una gran sustentación. El agua circula del dedo pulgar a la heminencia hipotenar con lo que se crea una diferencia de presión entre el dorso y la palma de la mano. En este caso la sustentación está dirigida hacia delante, con lo cual la componente vertical coincidirá con la sustentación.

En el tercer caso (ver figura 2.7.C) la fuerza propulsiva está orientada hacia delante gracias a la adecuada situación de los vectores arrastre y sustentación. El agua circula de la muñeca a los dedos con lo que se crea una diferencia de presión entre el dorso y la palma de la mano.

Los tres casos ilustran como dentro de una capacidad anatómica de movimiento, es posible orientar la fuerza propulsiva en direcciones similares pero gracias a diferentes relaciones entre sustentación y arrastre, buscando siempre aquellas que dirijan la fuerza propulsiva más hacia delante.

Hochtmuth (1973) y Schleihauf (1979) utilizaron las siguientes fórmulas para la obtención de la fuerza propulsiva en natación:

$$F.S. = 1/2 \cdot V^2 \cdot C_L \cdot S \quad (2.3)$$

$$F.A. = 1/2 \cdot V^2 \cdot C_D \cdot S \quad (2.4)$$

Siendo  $V$  la velocidad de la mano,  $C_L$  el coeficiente de sustentación,  $C_D$  el coeficiente de arrastre y  $S$  la superficie de la mano.

La fuerza propulsiva es la suma vectorial de las dos anteriores ( $F.S.$  perpendicular y  $F.A.$  paralela al vector velocidad) y la fuerza propulsiva neta o eficaz será la componente horizontal de dicha suma o fuerza propulsiva en  $X$  ( $F_{px}$ ). (Ver figura 2.7.A)

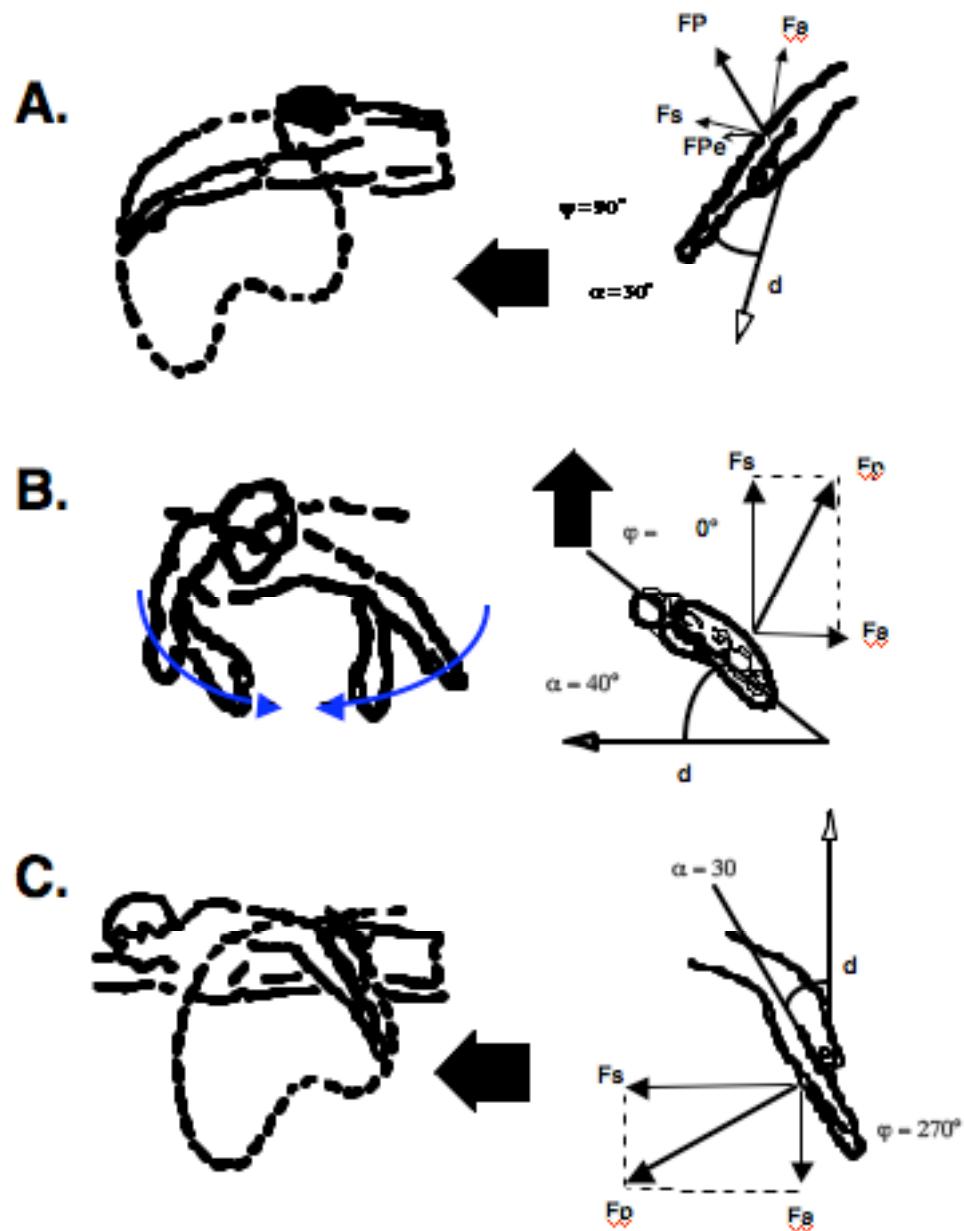


Figura 2.7: Representación de los vectores de fuerza aplicada en un punto de la trayectoria propulsiva en el movimiento hacia abajo en crol (A), en el movimiento hacia dentro en braza (B) y en el movimiento hacia arriba en crol (C). Se señalan los ángulos aproximados de azimut y ataque ( $\Psi$ ,  $\alpha$ ) y la dirección de desplazamiento de la mano (d) y del nadador (D).

Redondo (1987) limita la generalización de las fórmulas anteriores al observar cómo el coeficiente de arrastre de una mano no aumentaba tanto al aumentar la velocidad como proponía Schleihauf (1979), ya que si el régimen del fluido pasa de laminar a turbulento, el coeficiente de arrastre no aumenta. Por tanto, en ciertos casos puede ser conveniente mover las manos sólo hasta una cierta velocidad, para no perder "apoyo" en el agua.

Esta situación se puede observar con facilidad en personas muy musculadas y gran potencia. Son capaces de aplicar una gran fuerza contra el agua, moviendo sus extremidades con gran rapidez, sin embargo la fuerza propulsiva aplicada es muy inferior a la que utiliza un nadador experimentado, pero con menor corpulencia.

Si se analiza el problema desde el punto de vista de la Energía utilizada para desplazarse en el agua, podemos definir la eficiencia mecánica como la diferencia entre la energía utilizada<sup>4</sup> y la energía aplicada<sup>5</sup> (Toussaint, Groot, Savelberg, Vervoorn, Hollander y van Ingen, 1988). La energía utilizada se puede medir por medio del consumo de oxígeno, pero la energía aplicada es mucho más difícil de evaluar. Parte de la energía aplicada se utiliza necesariamente para proporcionar una energía cinética al agua, ya que el impulso propulsivo se aplica contra masas de agua que adquieren un momento lineal hacia atrás.

La energía aplicada (**Po**) por tanto es utilizada para vencer la resistencia (**Pd**) y para producir un cambio de energía cinética (**Pk**), expresándose:

$$Po = Pd + Pk \quad (7)$$

La eficiencia propulsiva (**ep**) por tanto se calcularía:

$$ep = \frac{Pd}{Po} = \frac{Pd}{Pd + Pk} \quad (8)$$

Gracias a que es posible medir la energía utilizada y que investigaciones recientes han posibilitado la medición de la resistencia activa (**Pd**), es posible el cálculo experimental de **ep**.

En este sentido, es importante matizar las diferencias que se plantean cuando el deportista nada en una situación normal, es decir se desplaza libremente, cuando realiza movimientos propulsivos pero es retenido por un sistema que le sujet a y lo mantiene

---

<sup>4</sup> Del inglés "power input"

<sup>5</sup> Del inglés "power output". (Po)

estático, es decir su velocidad de desplazamiento es igual a cero, cuando el nadador utiliza

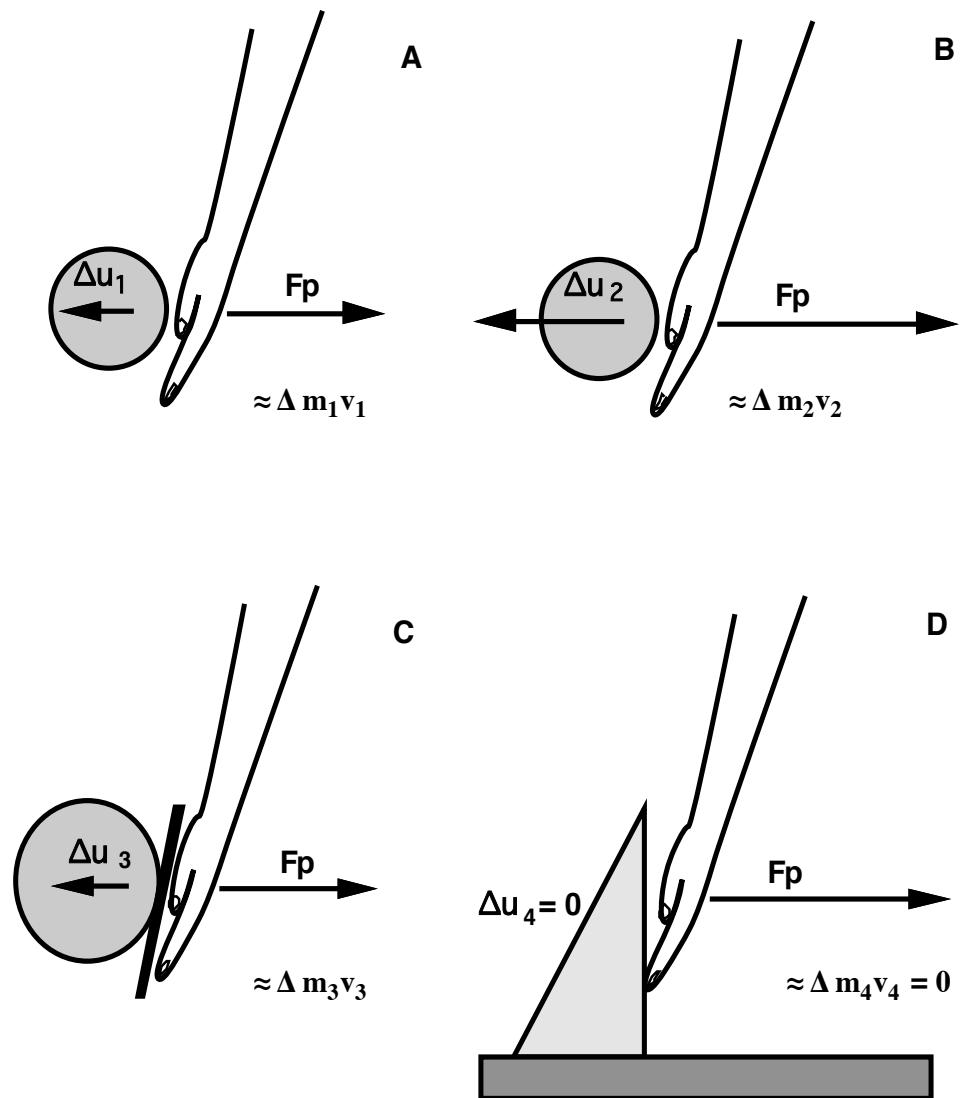


Figura 2.8: Fuerzas que aplica la mano al propulsarse en: a) natación libre; b) natación a velocidad cero; c) natación con palas en las manos; d) natación aplicando la fuerza en un punto fijo.  
(Adaptado de Toussaint y col., 1988)

unas palas que aumentan su superficie impulsiva o por último cuando el nadador aplica fuerza sobre unos apoyos sumergidos fijos.

En el primer caso nos encontramos en la situación planteada anteriormente, la fuerza impulsiva es utilizada para vencer la resistencia y para acelerar el agua que se encuentra la mano (ver figura 2.8.A). En el segundo caso al ser la velocidad de desplazamiento igual a cero, la resistencia al avance es cero y por tanto toda la fuerza impulsiva se utiliza para acelerar el agua. En este caso las mediciones experimentales han demostrado que su valor es mayor al de la fuerza impulsiva en velocidad libre (ver figura 2.8.B). En el tercer caso la fuerza aplicada para conseguir avanzar a la misma velocidad es ligeramente superior, debido a que aunque la resistencia a vencer sea la misma, el agua es acelerada en mayor cantidad, por tanto la eficiencia mecánica aumenta (ver figura 2.8.C). En el último caso el nadador aplica una fuerza sobre el soporte, que le sirve para vencer la resistencia del agua, pero no acelera en absoluto agua con su mano. Este procedimiento ha permitido medir la resistencia activa del nadador, aunque no su fuerza impulsiva aplicada total. (Ver figura 2.8.D)

Las teorías que explican los fenómenos impulsivos aquí descritos, han sido simplificadas con el fin de que con un razonamiento básico, puedan entenderse los principios, sin entrar en la complejidad matemática que su desarrollo conlleva. El objetivo a conseguir aquí, no era otro que una exposición elemental de los principios, y sobre todo expresar que a pesar de la complejidad de éstos, el nadador, con suficiente percepción motriz, es capaz de sacar partido de todos estos principios, sin saberlo, sin que se lo enseñen y como pasaba hace años, a pesar de sus entrenadores. Esto, que desde hace años se ha denominado "*sentido del agua*" por los entrenadores, llevó a que un número relativamente grande de investigadores (a pesar de tratarse de una actividad deportiva) se dedicaran a su estudio y difusión, en este sentido quiero destacar y agradecer desde estas líneas a Robert Schleihauf el esfuerzo que ha dedicado en profundizar sobre este tema, su lucidez ha servido para que personas como el que aquí escribe nos hayamos interesado por esta línea de investigación, que tantas aplicaciones tiene en áreas que utilizan el medio acuático para su desarrollo como la rehabilitación motriz, fisioterapia, natación de competición y todas aquellas actividades que tratan de que el hombre se integre y aproveche más un medio para el que la naturaleza no le ha dotado.