

VALIDACIÓN METODOLÓGICA DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO 3D DEL CICLO DE PALADA EN EL PIRAGÜISMO DE VELOCIDAD. UN ESTUDIO PILOTO

Espinosa, M.

Unidad de Investigación en Cómputo Aplicado. Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN

La técnica de paleo en el piragüismo es un sistema de movimiento que se analiza sobre la base de cuatro posiciones corporales que el cuerpo adopta durante un ciclo de palada. Se presenta un caso de estudio con el propósito de establecer la metodología que pudiera utilizarse periódicamente en el análisis de la palada y con el fin de mejorar la eficacia en la propulsión del kayak. Los métodos utilizados son basados en los principios fotogramétricos del registro simultáneo de tres secuencias en vídeo de las cuales se capturan los puntos anatómicos que representan los ejes de rotación de hombros, codos y muñecas. Se comparan los valores de la cinemática en 3D izquierdos y derechos: tiempo, longitud de palada, ángulos y velocidades angulares de hombros y codos, y la inclinación de los brazos, además se calcula la frecuencia de palada y la velocidad de la embarcación. Los resultados obtenidos están dentro de los rangos reportados en la literatura, indicando las características del ciclo de palada del atleta, y de ser así, los fallos en la sincronía y simetría de los movimientos. La propuesta hace posible evaluar la técnica individual de los palistas dentro de un proceso global de entrenamiento.

Palabras clave: análisis tridimensional, fotogrametría, kayak, ciclo la palada

ABSTRACT

The technique in kayaking is a movement system that is analyzed on the basis of the four corporal positions that the body adopts during a paddling cycle. A case of study is presented in order of establishing the methodology that could be used periodically in the analysis of the paddling cycle to improve the effectiveness in the propulsion of the kayak. The used methods are based on photogrammetric principles of the simultaneous registry of three sequences in video of which are captured the anatomical points that represent the axes of rotation of shoulders, elbows and wrists. The kinematic values in 3D compared left and right: the time, the paddling length, the angles and angular velocities of shoulders and elbows, and the inclination of the arms, in addition the paddling frequency and the boat velocity are calculated. The results are within the reported ranks in Literature, indicating the characteristics of the paddling cycle of the athlete, and if so, indicating the failures in the synchrony and symmetry of the movements. The proposal make possible to evaluate the individual technique within a global process of training.

Key Words: three-dimensional analysis, photogrammetry, kayak, paddling cycle

Correspondencia:

Matilde Espinosa Sánchez
Unidad de Investigación en Cómputo Aplicado
Universidad Nacional Autónoma de México
Insurgentes Sur 3000, Zona Cultural
Ciudad Universitaria, Coyoacán
México D.F. 04510 México
matilde@unam.mx

Fecha de recepción: 03/09/2010

Fecha de aceptación: 28/03/2011

INTRODUCCIÓN

El piragüismo de aguas tranquilas, también llamado piragüismo de velocidad, es un deporte olímpico en el cual los hombres y las mujeres compiten en kayak individual, doble o cuádruplo en distancias rectas de 200, 500 y 1000 metros. El instrumento de propulsión y estabilización es una pala de paletas gemelas que el atleta sujeta con ambas manos ejecutando una y otra vez el mismo elemento o gesto técnico, que consiste en alternar los movimientos en el paleo: la secuencia de movimientos en el lado derecho de la embarcación seguidos por la secuencia de movimientos en el lado izquierdo. Juntas las dos secuencias de movimientos constituyen un ciclo de palada. Al ser ésta una secuencia motriz cíclica, es posible observarla con facilidad en forma repetida para luego hacer conclusiones sobre cómo el palista ejecuta los movimientos (Nitsch, et al, 2002).

Al repetir sistemáticamente la ejecución de los movimientos, en las sesiones de entrenamiento, el atleta no solamente alcanza la adaptación en la actividad muscular que estimula las modificaciones en los sistemas funcionales y morfológicos de su organismo, sino que también se producen las mejoras en las capacidades que aumentan el potencial motor y la técnica de ejecución de los movimientos (Viru, 2001).

La técnica podría definirse como el modelo ideal de una secuencia de movimientos (Grosser y Neumaier, 1982). Podría ser la representación de la solución perfecta de la tarea motriz, considerarla como patrón; debiendo permitir la aplicación de la fuerza y la velocidad de movimientos máximas (Nitsch, et al, 2002). Así, el objetivo de la técnica en el piragüismo, es obtener la máxima velocidad de desplazamiento que depende de la perfección del ciclo de palada (COE, 1993). En todos los aspectos del desarrollo del rendimiento y de la actividad deportiva de un atleta, la técnica en algunos deportes como el piragüismo, es un factor muy importante que incluso tiene un papel determinante para la obtención de resultados exitosos (Grosser y Neumaier, 1982).

Por otro lado, normalmente el entrenador tiene mucho interés en identificar los defectos de los movimientos durante su ejecución, como pueden ser: las posiciones del tronco, de la cabeza y de los hombros, la curvatura de la espalda, la empuñadura en la pala, los movimientos de las piernas, de los brazos, de la pala y el desplazamiento de la embarcación (Vinuesa, 1990). Este tipo de defectos pueden ser detectados con un análisis visual a partir de registros en video. Pero los objetivos del entrenamiento de la técnica requerirán además, que los movimientos del paleo sean eficaces, es decir, que consigan en el menor tiempo posible y con el menor esfuerzo posible el mejor resultado posible. El efecto de los entrenamientos deberá lograr que haya fiabilidad en la obtención de los resultados, que el atleta pueda reproducir los resultados teniendo la capacidad de regeneración, y este efecto eventualmente se expresará en el palista con una confianza en si mismo (Nitsch, et al, 2002).

La función de la técnica puede variar dependiendo de la situación. El kayak de velocidad para una persona (K1) es una embarcación extremadamente inestable y en condiciones climáticas de viento y/o oleaje, en general el palista hace correcciones para estabilizar el sistema palista-embarcación con inclinar su cuerpo al frente o a un lado, y/o rotando acentuadamente la cadera, y/o elevando o bajando la dirección de un brazo, y/o abriendo o acortando la trayectoria de la pala en el agua. En estas condiciones se complica la formación técnica del atleta impidiendo el paleo simétrico (COE, 1993). Es importante considerar que en condiciones ambientales ideales, cuanto más simétricos sean los movimientos derechos e izquierdos, más fácil será que la embarcación se desplace en línea recta sin necesidad de corregir la dirección que haría un recorrido más largo con mayor gasto de energía. Esto es, cualquier asimetría en el desempeño del palista, puede afectar al desplazamiento del kayak (COE, 1993), sin embargo, en la práctica no existe el patrón de simetría total debido en general a las diferencias que provocan el agarre de la mano que controla la pala (Mann y Kearney, 1980), pero como regla entre más simétricos sean los movimientos derechos e izquierdos, más rápido se desplazará la embarcación y el valor de los parámetros del ciclo de palada indicarían una técnica correcta (Toro, 1986).

La dinámica de la frecuencia de palada (ciclos en un minuto) y de la velocidad de la embarcación depende de varios factores: las cualidades y el estilo del palista, el tipo de embarcación, el estado de entrenamiento del atleta y la longitud de la competencia. La velocidad varía durante de la ejecución de un ciclo de palada, se incrementa debido a las fuerzas propulsoras que actúan en la paleta, y entre las paladas la resistencia del agua frena al kayak (Mann y Kearney, 1980). Son entonces, los parámetros de la palada y los cambios de velocidad de la embarcación, variables importantes en la predicción del tiempo de la palada (Michael et al., 2009).

A pesar de una velocidad promedio alta del kayak y una alta frecuencia de palada, no existe una relación entre estos dos parámetros, pero si se distingue más el buen desempeño por una alta frecuencia de palada que por una palada larga (Kendal y Sanders, 1992). La frecuencia de palada es muy importante y es posible establecerla después de monitorear diferentes opciones al incorporarla al entrenamiento, por lo que este concepto puede utilizarse perfectamente como parámetro de la preparación tanto técnica como funcional de los atletas (Toro, 1986). La velocidad promedio en la distancia recorrida es la media de las velocidades promedio de cada palada, si se desea incrementar la potencia en la palada se puede usar una paleta de mayor área de contacto al agua, que exige un esfuerzo superior y disminuye la frecuencia del ciclo de palada; así para una frecuencia y longitud de palada dadas, existe una demanda de esfuerzo determinado durante cada palada (Michael et al., 2009). El atleta requiere ejercer su máximo esfuerzo a lo largo de toda la distancia a reco-

rrer en una competición, y si pretende maximizar la velocidad del kayak será necesario generar una potencia promedio mayor durante cada palada, que las fuerzas promedio sean grandes, y exhibir también importantes habilidades técnicas, además de utilizar la máxima capacidad metabólica (Michael et al., 2009).

El análisis sistemático y la medición de los parámetros biomecánicos determinan las características cuantitativas que diferencia el estilo de los palistas y los relaciona con la técnica «ideal» teórica, documentada o que el entrenador propone a los alumnos (Toro, 1986). Los intentos para evaluar la técnica se han llevado a cabo con la ayuda de procedimientos biomecánicos (Nitsch, et al, 2002). La técnica en el kayak de velocidad se ha seguido depurando y adecuando a las modificaciones hechas a las embarcaciones, al cambio en los materiales, a los diseños de las palas, y consiste, considerando la literatura publicada desde años atrás, (Vacek, 1971; Csonka, 1974; Plagenhoef, 1979; Mann y Kearney, 1980; Toro, 1986; COE, 1993; Qiu et al., 2005; Michael et al., 2009), de dos fases principales: la transferencia de la paleta en el agua y la transferencia de la paleta en el aire, y como parte de éstas, cuatro posiciones principales de la pala en el espacio:

1. Extensión: en la fase de la transferencia en el aire, toda la pala está en el aire y su eje longitudinal es horizontal.
2. Entrada: la paleta hace contacto con el agua, termina la fase de transferencia de la paleta en el aire e inicia la fase de la transferencia de la paleta en el agua.
3. Vertical: en la fase de la transferencia en el agua, la paleta está dentro del agua y el eje longitudinal de la pala es vertical.
4. Salida: la paleta comienza a salir del agua, para terminar la fase de transferencia de la paleta en el agua e iniciar la fase de transferencia de la paleta en el aire.

Entre las cuatro posiciones se tienen cuatro secuencias de movimientos o sub-fases:

- Preparación: Entre la posición 1 y la posición 2, se ejecuta después de la recuperación, el palista se prepara buscando alcanzar la mayor distancia al frente para una palada larga rotando el tronco, adelantando el hombro y extendiendo el codo antes de hacer contacto con la paleta en el agua.
- Tirón: Entre la posición 2 y la posición 3, la paleta entra en el agua y el palista tira de la paleta rotando el tronco y llevando el hombro hacia atrás.
- Potencia: Entre la posición 3 y la posición 4, la paleta se encuentra dentro del agua y el palista trata de prolongar esta orientación de la pala para llevar a una palada de mayor potencia. En estos instantes la fuerza de propulsión aplicada por el palista debe ser máxima.

- **Recuperación:** Entre la posición 4 y la posición 1, el palista deja de tirar sacando rápidamente la paleta del agua, se recupera y lleva la paleta de ese lado al frente.

Para cada lado, derecho e izquierdo, el trabajo en la fase de transferencia de la paleta en el aire incluye las sub-fases de preparación y de recuperación, y el trabajo en la fase de transferencia de la paleta en el agua incluye las sub-fases de tirón y de potencia. Es decir, el ciclo de palada consta de las dos fases principales del lado derecho más las mismas dos fases principales del lado izquierdo.

Dadas las condiciones ambientales muchas veces difíciles de las pistas de competencias o lugares para el entrenamiento, es complicado contar con un lugar para la colocación apropiada de los instrumentos que permitan capturar la ejecución de movimientos en condiciones cercanas a las reales, es decir, paleando un kayak en un recorrido parecido al de competencia. Las facilidades que pueda brindar un canal más angosto que la pista montada en un lago, canal o río, son valiosas para la metodología propuesta en este trabajo.

El propósito de este estudio es establecer una metodología por medio de la cual sea factible realizar el análisis cinemático en tres dimensiones (3D) de la técnica del ciclo de palada. Esta metodología tendría como propósito estudiar periódicamente la técnica de los atletas de esta especialidad deportiva: calcular los tiempos relativos de las fases y sub-fases, la frecuencia de la palada, la velocidad de la embarcación, e identificar la asimetría entre la ejecución de los movimientos a la derecha y a la izquierda de la embarcación.

MÉTODO

Con este estudio se ha querido validar una propuesta metodológica para lo que se consideró suficiente analizar el desempeño de un atleta de alto rendimiento que tuviera un nivel competitivo semejante al de los atletas analizados en trabajos previamente reportados en la literatura. El palista es un atleta de alto nivel, varón (masa = 83 kg; altura = 187 cm; edad = 24 años, longitud biacromial = 44 cm, longitud brazo der. / izq. = 34.2 cm / 34.2 cm, longitud antebrazo der. / izq. = 27.3 cm / 26.4 cm, longitud del muslo der. / izq. = 42.3 cm / 42.6 cm, longitud de pierna der. / izq. = 46.4 cm / 47.2 cm, altura sentado = 96.5 cm) que después de ser informado sobre los objetivos del estudio, aceptó voluntariamente a participar dando su consentimiento para hacer la colección de datos y el registro de los vídeos (PEI, 2010). Las grabaciones se llevaron a cabo durante el periodo de entrenamiento de preparación del macrociclo anual.

En la Ciudad de México, la Pista Olímpica de Remo y Canotaje «Virgilio Uribe» es un curso artificial de 2.2 km. de largo que tiene un canal lateral de 1.2 km con un

ancho de 30 m donde en uno de los extremos y en las orillas se colocaron tres cámaras de vídeo con las que se registró en forma simultánea al palista en kayak individual (K1) desde tres puntos de visión diversos. Se eligió la hora más tranquila para tener las condiciones atmosféricas óptimas para grabar. El atleta hizo un recorrido de aproximadamente 60 m de paleo continuo a velocidad de competencia en varias ocasiones. Se registraron la proyección de los movimientos en los planos sagital (cámara 1), frontal (cámara 2) y uno diagonal (cámara 3) (Figura 1). Para el análisis en este trabajo se ha considerado que el ciclo de la palada inicia y termina en la posición de extensión.

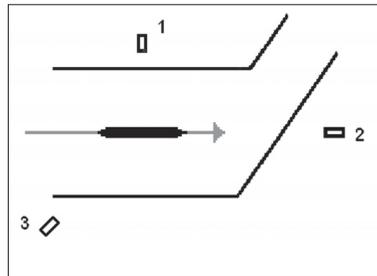


Figura 1. Montaje de las cámaras.

Los procedimientos utilizados son fotogramétricos basados en los datos fuente que se pueden extraer de registrar los movimientos en video (Gruen, 1996; Maas, 1996). Los vídeos fueron grabados a 60 hertzios con tres cámaras Panasonic AG-EZ30DV fijas en trípodes, que graban a 30 cuadros en un segundo en sistema NTSC de 512 líneas. La distancia de las cámaras a la ruta por donde se desplazó el palista fue de más de 20 m, distancia que minimiza el efecto del error de perspectiva, además se ajustaron las lentes de las cámaras para maximizar el tamaño de las imágenes a grabar con un acercamiento (zoom) tal que cupiera dentro del campo de visión un ciclo de palada completo (movimientos del lado derecho más movimientos del lado izquierdo) (Miller y Nelson, 1973, p. 136; Dainty y Norman, 1987, p. 77), y el obturador (shutter) se ajustó a 1/8000 para evitar que en las imágenes de vídeo grabadas estuvieran borrosas por la velocidad de movimiento del atleta. Se seleccionó la secuencia grabada cuyo inicio coincidiera con el inicio del ciclo: extensión derecha. Los vídeos fueron transferidos a una PC como archivos de video tipo AVI usando el SW suministrado por el fabricante de las cámaras. Por medio del programa Ulead MediaStudio Pro©, se separaron los videos en cuadros: archivos de imagen a color en formato BMP. Estas imágenes se desinterlazaron con el objeto de duplicar los datos, esto es: la imagen de las líneas impares del vídeo y la imagen de las líneas pares del vídeo, por medio del programa Adobe Photoshop©. El número de imágenes por el ciclo de palada registrado por cada cámara fue el mismo.

Los datos que se capturaron de cada imagen son los puntos anatómicos que representan los ejes de giro que corresponden a las uniones articulares de los hombros, los codos y las muñecas, proyectados en cada imagen. Los brazos, antebrazos y tronco son representados por líneas rectas: del hombro al codo, del codo a la muñeca, y de la vértebra cervical atlas (C1, a la altura del lóbulo de la oreja en vista sagital y a la altura de la punta de la nariz en vista frontal) a la vértebra lumbar más inferior localizable (L5). El atleta tenía el tórax descubierto y no se utilizaron marcas en la piel para identificar los puntos anatómicos. La captura de las coordenadas de estos puntos es posible hacerla por medio del programa Adobe Photoshop®. Los movimientos fueron reconstruidos a tres dimensiones (3D) en una PC usando el procedimiento de DLT (Direct Linear Transformation) (Abdel-Aziz y Karara, 1971; Marzan y Karara, 1975; Woltring, 1980), que consiste en calcular las coordenadas tridimensionales (x, y, z) de los puntos capturados, a partir de una serie de puntos en el espacio de coordenadas tridimensionales (3D) conocidas. Para aplicar este procedimiento matemático fue necesario grabar una estructura con puntos conocidos que hace las veces de sistema de referencia que en la literatura especializada se conoce como comparador (Gruen, 1996; Woltring, 1980) (Figura 2). Se hizo el registro en vídeo del comparador con las tres cámaras, situado y sujetado a la mitad del trayecto a recorrer por el palista, retirándose después. Las coordenadas de los puntos anatómicos se interpolaron y suavizaron para así tener datos calculados de instantes no grabados y corregir posibles desviaciones erróneas en la localización de los puntos de giro, para esto se utilizó el método matemático de beta-splines cúbicos. Con el fin de reducir los valores extremos, se limpiaron los datos por medio de un filtro (Low Pass Filter). Finalmente con los datos interpolados, suavizados, y limpios, se calcularon los desplazamientos angulares de la amplitud de hombros, codos e inclinación de brazos del palista en la ejecución de un ciclo de palada.

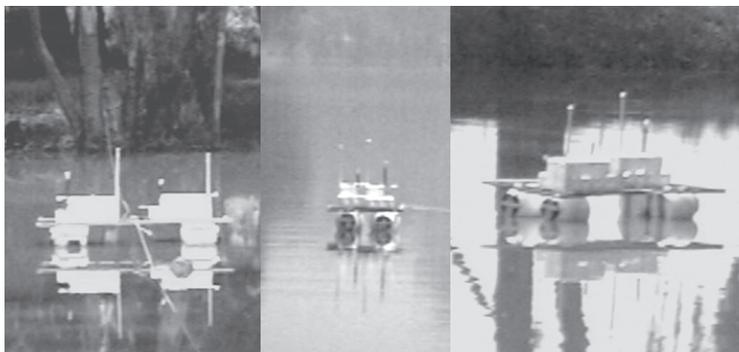


FIGURA 2. Las tres vistas (sagital, frontal y diagonal) de la estructura utilizada como sistema de referencia, con puntos de coordenadas conocidas.

El recorrido analizado consta de 66 imágenes, cuyos datos interpolados equivalen a haber grabado 154 cuadros con duración de 1.1 s. La precisión de las coordenadas depende del tamaño de las imágenes (número de píxeles) en este caso es de 640x480, y la precisión de los tiempos depende del número de imágenes grabadas por segundo, en este caso una imagen cada 0.0333 segundos.

El cálculo de los ángulos θ entre segmentos en el espacio se hace con la ecuación que calcula el ángulo entre dos rectas (tronco-brazo y brazo-antebrazo), donde una recta pasa por los puntos $P_0(x_0, y_0, z_0)$ y $P_1(x_1, y_1, z_1)$, y la segunda recta pasa por los puntos $P_2(x_2, y_2, z_2)$ y $P_3(x_3, y_3, z_3)$. Los puntos P_0, P_1, P_2 y P_3 corresponden a los puntos anatómicos capturados. La ecuación usada es la siguiente (Lehmann, 1999):

$$\cos \theta = \frac{(x_1-x_0)(x_3-x_2) + (y_1-y_0)(y_3-y_2) + (z_1-z_0)(z_3-z_2)}{\sqrt{(x_1-x_0)^2 + (y_1-y_0)^2 + (z_1-z_0)^2} \sqrt{(x_3-x_2)^2 + (y_3-y_2)^2 + (z_3-z_2)^2}}$$

El cálculo del ángulo de inclinación de los brazos se hace con las ecuaciones de dirección de una recta en el espacio (Lehmann, 1999), ésta está dada por tres ángulos (α, β y γ) que son medidos en un sistema 3D de ejes cartesianos considerando al punto proximal del brazo (el eje de rotación del hombro) como el punto de origen del sistema (P_1), y al punto distal (el eje de rotación del codo) la dirección de la línea (P_2). Los ángulos (α, β y γ) son los ángulos directores de la línea, y corresponden al valor de la amplitud entre la línea y los ejes X, Y y Z respectivamente. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\cos \alpha = \frac{(x_2 - x_1)}{d}, \quad \cos \beta = \frac{(y_2 - y_1)}{d}, \quad \cos \gamma = \frac{(z_2 - z_1)}{d}.$$

donde d es la distancia entre los dos puntos:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

A partir de la reconstrucción de la secuencia de movimientos en 3D, y representando los segmentos corporales con líneas rectas, se hace la identificación de las 8 posiciones del ciclo de la palada. En la Figura 3 se representa gráficamente la secuencia de las posiciones, los tiempos y el número de cuadros interpolados.

Para identificar las diferencias entre el ciclo que inicia con la extensión derecha (CD) y el ciclo que inicia con la extensión izquierda (CI) se hizo el cálculo de los

coeficientes de correlación de Pearson. Las gráficas conocidas como ángulo-ángulo (Enoka et al., 1982) que son útiles para comparar la actitud derecha-izquierda y que visualmente muestran la relación que existe entre la amplitud de ángulos, son utilizadas para identificar la simetría del movimiento de los brazos.

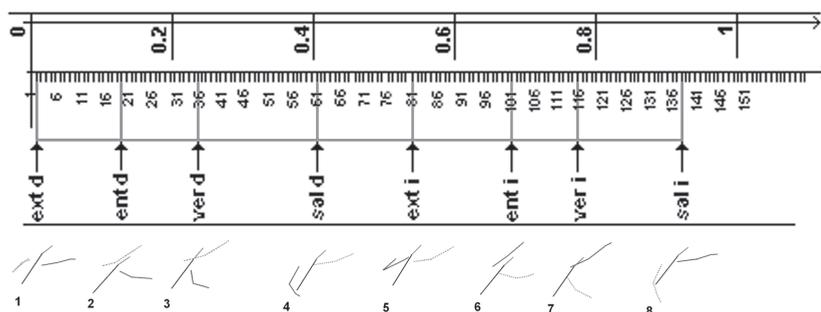


FIGURA 3. Representación de las ocho posiciones en la secuencia del ciclo de la palada reconstruida a 3D. La primera escala corresponde al tiempo en segundos, la siguiente escala corresponde al número de cuadros interpolados. Se marcan en seguida las posiciones del cuerpo y finalmente se presentan estas posiciones representando con líneas rectas los segmentos: cabeza, tronco, brazo, antebrazo y mano derechos e izquierdos (línea punteada).
(ext = extensión, ent=entrada, ver = vertical, sal = salida, d = derecho, i = izquierdo)

RESULTADOS

El método permite obtener los resultados que se muestran en las siguientes tablas y figuras. En la Tabla 1 se muestran las características de las sub-fases derechas e izquierdas del ciclo de palada. La distancia recorrida por la embarcación del lado izquierdo es 8 cm más larga que la distancia a la derecha, y tarda el mismo tiempo en ambos recorridos. El porcentaje de las distancias en la fase de transferencia en el aire ($0.47 + 0.85 + 0.63 + 0.94 = 2.89$ m) es de 52.16% y el porcentaje de las distancias en la fase de transferencia en el agua ($0.63 + 0.78 + 0.60 + 0.64 = 2.65$ m) es de 47.83%, esto es, la distancia recorrida por la embarcación en la fase de transferencia en el aire es un poco mayor que la distancia recorrida en la fase de transferencia en el agua. Los tiempos de las fases son para la transferencia en el aire ($0.11 + 0.16 + 0.13 + 0.18$) 0.58 s que es el 52.73% del tiempo total, y para la transferencia en el agua ($0.14 + 0.14 + 0.11 + 0.13$) 0.52 s, que representa el 47.27% del tiempo total en ejecutar un ciclo de palada. Es factible calcular la velocidad del kayak en metros recorridos en un segundo = $5.54 \text{ m} / 1.10 \text{ segundos} = 5.04 \text{ m/s}$, y también la frecuencia de ciclos de palada ejecutados en un minuto = $60 \text{ segundos} / \text{minuto} * \text{ciclo} / 1.10 \text{ segundos} = 54 \text{ ciclos/min}$.

TABLA 1. Características del ciclo de palada: distancias, porcentajes y tiempos de las sub-fases derechas e izquierdas. Los valores se redondean a dos décimas.

Posición Inicial	Posición Final	distancia [m]	% del total	tiempo [s]	% del total
extensión derecha	entrada derecha	0.47	8.46	0.11	10.13
entrada derecha	vertical derecha	0.63	11.31	0.14	13.05
vertical derecha	salida derecha	0.78	14.04	0.14	13.05
salida derecha	extensión izquierda	0.85	15.40	0.16	14.49
	Subtotal	2.73	49.21	0.55	50.72
extensión izquierda	entrada izquierda	0.63	11.31	0.13	11.60
entrada izquierda	vertical izquierda	0.60	10.92	0.11	10.13
vertical izquierda	salida izquierda	0.64	11.62	0.13	11.60
salida izquierda	extensión derecha	0.94	16.93	0.18	15.95
	Subtotal	2.81	50.79	0.55	49.28
	TOTAL	5.54	100.00	1.10	100.00

El desplazamiento angular de los miembros superiores durante el paleo continuo se puede observar en la Figura 4. Se puede ver que en ambos lados, derecho e izquierdo, si el codo y el hombro se sincronizan conforme la amplitud de los ángulos se incrementan hasta alcanzar los valores máximos, en la sub-fase de preparación, entre las posiciones 1 y 2.

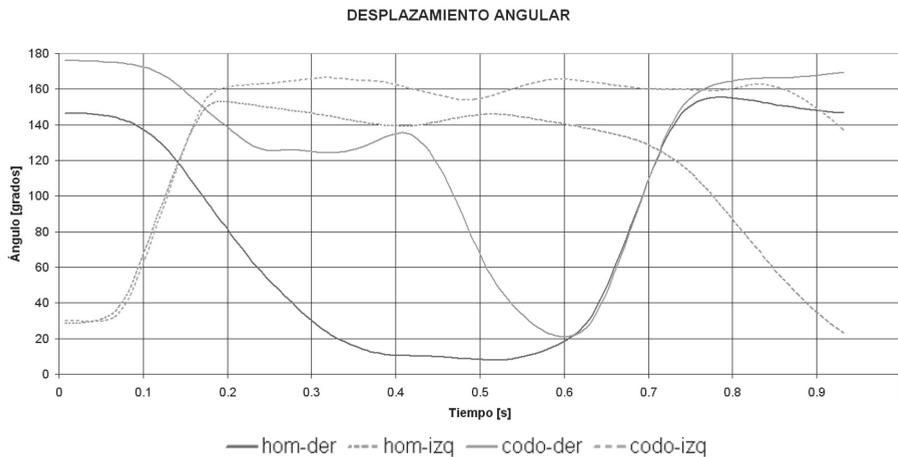


FIGURA 4. Desplazamiento angular de las uniones articulares involucradas en el ciclo de la palada.

Los valores de la cinemática angular se resumen en la Tabla 2, donde se presentan los valores de la estadística descriptiva básica del ángulo de desplazamiento (q) y de la velocidad angular instantánea (w) de hombros y codos. En esta tabla se identifican las mayores diferencias, que son el mayor rango de movimiento en el codo derecho, y el valor mínimo de la velocidad angular del codo. También hay mayor rango de movimiento en el hombro derecho.

TABLA 2. Valores máximos, mínimos, rango, media y desviación estándar de la amplitud de los ángulos (θ) [grados] y de la velocidad angular (ω) [grados/s], en un ciclo de palada en kayak individual.

θ	hom-der	hom-izq	codo-der	codo-izq
MAX	155.39	153	175.91	166.48
MIN	7.93	24.63	21.13	29.49
RANGO	147.47	128.37	154.78	136.99
MEDIA	85.96	105.01	128.49	137.87
DEV STD	59.54	47.89	47.9	43.46
ω	hom-der	hom-izq	codo-der	codo-izq
MAX	1098.59	1104.89	1153.86	1183.4
MIN	-628.37	-557.93	-874.57	-1238.49
RANGO	1726.96	1662.82	2028.43	2421.89
MEDIA	-1.43	0.26	-1.55	0.89
DEV STD	406.8	370.54	435.92	461.91

Se puede observar también el comportamiento angular como el que se muestra en la Figura 5, velocidades angulares instantáneas de hombros y codos, donde es posible identificar en el gráfico si existe acoplamiento de hombro-codo derechos y hombro-codo izquierdos durante el incremento de la velocidad angular hasta el máximo y después el decremento, se podría identificar asimetría.

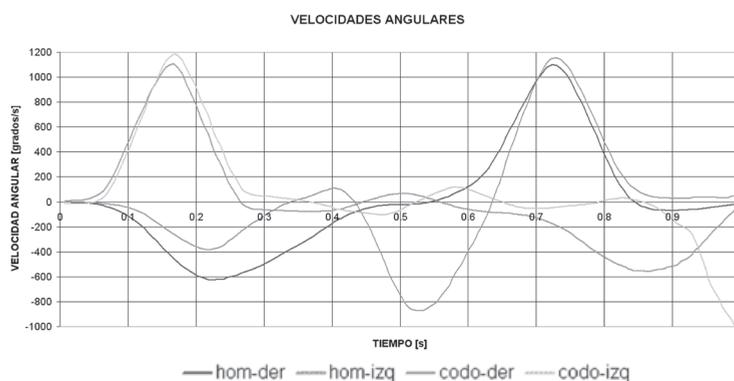


FIGURA 5. Representación gráfica del comportamiento de la velocidad angular de la amplitud de hombros y codos.

Es posible identificar las diferencias en el comportamiento de hombros y codos haciendo el mismo recorrido en el ciclo que inicia con la extensión del lado derecho (CD) y en el ciclo que inicia con la extensión del lado izquierdo (CI), en este caso se muestra que los movimientos son muy cercanos entre el hombro derecho del CD y el hombro izquierdo del CI con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.908, y entre el hombro izquierdo del CD y el hombro derecho del CI la correlación es de 0.930. En el caso de los codos, el codo derecho del CD y el codo izquierdo del CI tienen un

coeficiente de 0.797, y el codo izquierdo del CD y codo derecho del CI la correlación es de 0.913. En la Figura 6 se pueden identificar gráficamente las diferencias.

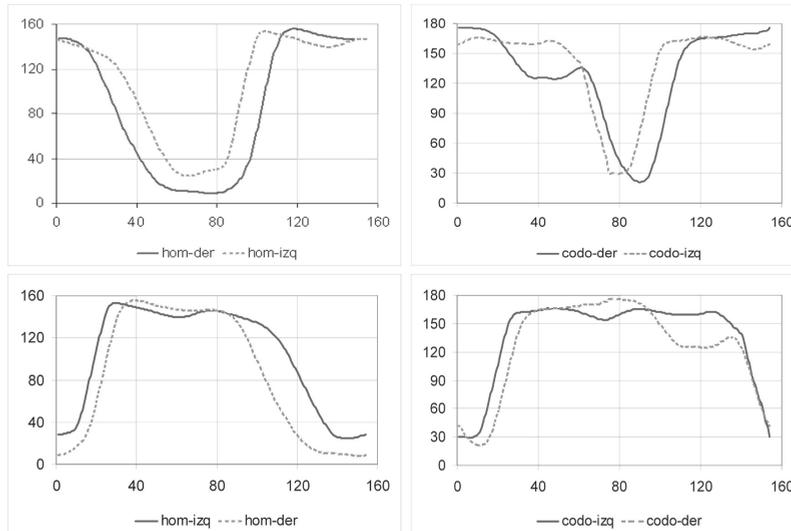


FIGURA 6. Relación entre las secuencias de dos ciclos, el que inicia con la extensión derecha en línea continua (CD) y el que inicia con la extensión izquierda en línea punteada (CI).

Se identifica que tan simétrica es la inclinación de los brazos buscando la relación del ciclo de la palada del lado derecho (CD) con el ciclo del lado izquierdo (CI). En la Figura 7 se muestra gráficamente, el comportamiento de la inclinación de los brazos (a, b y g). Los ángulos a tienen un coeficiente de correlación de Pearson de 0.676, los b de 0.460 y los g de 0.834. Estos últimos, que corresponden a la amplitud del ángulo que forman la línea que representa al brazo y la vertical, son los más cercanos. Los ángulos del brazo con respecto a la horizontal: hacia la dirección de la embarcación (a) y lateralmente (b), son menos cercanos.

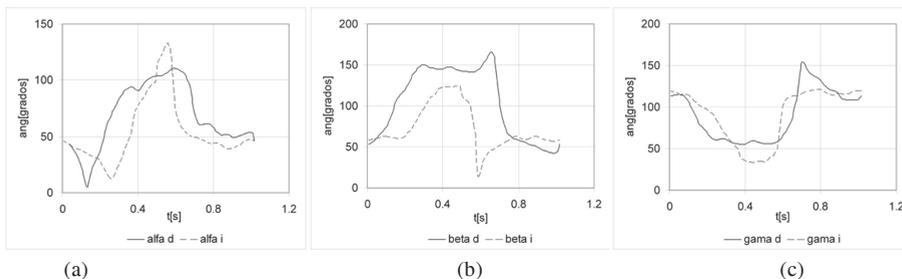


FIGURA 7. Relación de los ángulos de inclinación de los brazos: a (a), b (b) y g (c), del ciclo que inicia con la extensión del lado derecho (CD, línea continua) y del ciclo que inicia con la extensión del lado izquierdo (CI, línea punteada).

En la Figura 8 se puede observar la relación de los ángulos de inclinación de los brazos en gráficos ángulo-ángulo. Es posible analizar las proyecciones a los planos de las relaciones tridimensionales de ambos ciclos. Si los movimientos fueran completamente simétricos, la línea que corresponde a los movimientos del brazo derecho sería la imagen en el espejo de la línea que corresponde a los movimientos del brazo izquierdo.

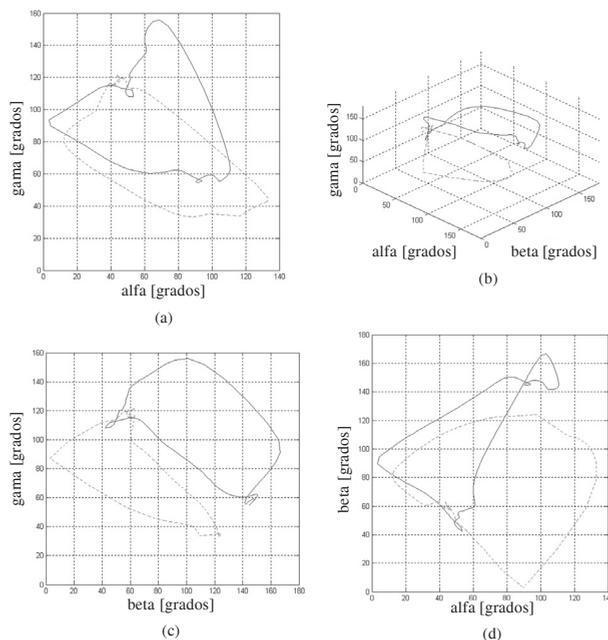


FIGURA 8. Graficas ángulo-ángulo de relación entre los ángulos de inclinación de los brazos (α , β y γ). La línea continua corresponde a los movimientos del brazo derecho, la línea punteada a los movimientos del brazo izquierdo.

DISCUSIÓN

El que durante la palada del lado izquierdo el recorrido de la embarcación sea de mayor distancia (por 8cm), que las distancias de los recorridos de las sub-fases de recuperación y preparación sean menores del lado derecho (0.47 m + 0.85 m) que del izquierdo (0.63 m + 0.94 m), y que además el tiempo empleado en la recuperación izquierda (0.18 s) sea también superior al derecho (0.16 s), podrían indicar que la fuerza y potencia ejercidas del lado derecho fueron mayores. Si las distancias en la fase de transferencia en el aire son mayores que las distancias en la fase de transferencia en el agua, es porque probablemente el efecto en el agua tiene la fuerza y la potencia necesarias para que la embarcación no disminuya su velocidad. Los resultados de la velocidad de la embarcación y la frecuencia de la palada ejercida por el

atleta están dentro de los rangos de valores reportados para varones en K1 a 500 m: velocidad entre 4.9 y 5.4 [m/s], frecuencia de ciclo entre 55 y 73 [ciclos/min], o para varones en K1 a 1000 m velocidad entre 4.2 y 5.2 [m/s], y frecuencia de ciclo entre 48 y 68 [ciclos/min] de acuerdo a propuestas publicadas para evaluar la eficiencia del atleta (Alacid et al., 2005; Cezard, 1989). En palistas de elite se reportaron velocidades promedio entre 4.63 y 5.38 [m/s] haciendo mención sobre la calidad asimétrica para la mayoría de los palistas, con longitudes de palada de entre 2.32 y 2.55 m (Kendal y Sanders, 1992). En el ciclo de palada se muestra sincronía en el desplazamiento y la velocidad angulares de hombro-codo, de forma semejante en ambos lados aun cuando el rango de los valores de θ y de w muestran diferencias. A pesar de que los movimientos en el ciclo que inicia del lado derecho (CD) son muy cercanos a los movimientos del ciclo que inicia del lado izquierdo (CI), no son imagen en el espejo uno del otro. La diferencia en la inclinación de los brazos con respecto a la horizontal, indica que la desigualdad entre las paladas derecha e izquierda probablemente se deben al movimiento lateral de los codos al sacar la paleta del agua. Habría que discutir, si en general los movimientos de este palista pudieran considerarse dentro del criterio de simétricos, la pregunta que quedaría por hacer a los entrenadores es qué tantas diferencias cuantitativas se podrían tolerar para considerar ciclos simétricos. Los resultados cinemáticos obtenidos del ciclo de palada estudiada sugieren que la metodología propuesta es apropiada para hacer la evaluación de la técnica.

Los instrumentos utilizado en este trabajo son accesibles, no se necesitan cámaras profesionales, el comparador se construye con barras de aluminio y placas de unisel y algún material que lo ayude a flotar, el SW no es sofisticado y fácilmente se codifican utilerías para recrear la secuencia de los movimientos y calcular los ángulos, para hacer la reconstrucción a 3D existe en la red información disponible (Kwon3d, 2010). Una vez establecido el método, ciertamente el tiempo para la obtención de resultados sería más rápido que el invertido en esta investigación. El entrenamiento de la técnica deportiva debiera ser un factor importante en el proceso global de entrenamiento de los palistas de todo nivel competitivo, tanto principiantes como atletas de elite. Los entrenadores podrían dar alguna orientación científica (biomecánica) a los programas de entrenamiento, al considerar que es factible describir a la técnica mediante parámetros biomecánicos, que por medio de investigaciones biomecánicas se puede identificar los movimientos óptimos y personalizados (Nitsch, et al, 2002). Este estudio aporta una herramienta a los entrenadores que normalmente no tienen acceso a este tipo de información, mediante la comunicación entre el científico, el entrenador y el atleta (Nitsch, et al, 2002).

Se puede concluir entonces que el método para del análisis y evaluación de la palada en el kayak de velocidad es aplicable, repetible y confiable en la depuración

de la técnica de los palistas, y que es factible una planeación del entrenamiento que incorpore la depuración de la técnica mediante procedimientos biomecánicos.

REFERENCIAS

- Abdel-Aziz Y.I. y Karara H.M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry. *Proceedings of the ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry*, Urbana, Illinois, pp. 1-18.
- Alacid, F.; Ferrer, V.; Martínez, E. y Carrasco, L. (2005). Análisis cuantitativo de la técnica de paleo en kayakistas infantiles, *Motricidad.European Journal of Human Movement*, 13, pp. 133-146.
- Cezard, T.P. (1989). La frecuencia de la palada en Canoe-Kayak, *Comunicaciones Técnicas* Vol. V, No. 5 – 1989, Federación Española de Piragüismo, España. Escuela Nacional de Entrenadores. pp. 41-50.
- COE (1993). *Piragüismo I*, Federación Española de Piragüismo, Escuela Nacional de Entrenadores. 19, Comité Olímpico Español, Impresos Izquierdo, S.A.
- Csonka, F. (1974). *Trainingslehre im Kanusport*. Deutschland. Eigenverlag.
- Dainty,D.A. y Norman, R.W. (1987). *Standardizing Biomechanical Testing in Sport*. Human Kinetics Publishers, Inc. Champaign, IL.
- Enoka, R. M., Miller, D.I. y Burgess, E.M. (1982). Below-Knee Amputee Running Gait, *American Journal of Physical Medicine*, 61, pp. 66-84.
- Grosser, M. y Neumaier, A. (1982). *Techniktraining*, München: BLV.
- Gruen, A. (1996). Fundamentals of videogrammetry. *Human Movement Science* ,Vol.16 (2-3), pp. 155-187.
- Kendal, S.J. y Sanders, R.H. (1992). The Technique of Elite Flatwater Kayak Paddlers Using the Wing Paddle, *International Journal of Sport Biomechanics*, 8, pp. 233-250.
- Kwon3d (2010). *DLT Method*. Recuperado en agosto de 2010 de <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html>.
- Lehmann, CH. (1990). *Geometría Analítica*, México, Editorial Limusa.
- Maas, H.G. (1996). Concepts of realtime photogrammetry. *Human Movement Science* ,Vol.16 (2-3), pp. 189-199.
- Mann, R. V. y Kearney, J.T. (1980). A biomechanical analysis of the Olympic stilette flatwater kayak strokes. *Medicine and Science in Sport and Exercise*, Vol.12, No.3, pp.183-188.
- Marzan, G.T. y Karara, H.M. (1975). A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition, and some applications of it. *Proc. Symp on close-range Photogrammetric Systems*, American Society of Photogrammetry, pp. 420-476.
- Michael, J.S., Smith, R., and Rooney, K.B. (2009). Determinants of kayak paddling performance. *Sports Biomechanics*. June, 8(2): 167-179.
- Miller, D.I. y Nelson, R.C. (1973). *Biomechanics of Sport, A research Approach*. LEA & FEBIGER, Philadelphia.
- Nitsch, J.R., Neumaier, A., de Marées, H., Mester, J. (2002), *Entrenamiento de la técnica*. Contribuciones para un enfoque interdisciplinario. Editorial Paidotribo, Barcelona, España.

- PEI (2010). *Pautas Éticas Internacionales para la Investigación y Experimentación Biomédica en Seres Humanos*, Declaración de Helsinki de la (Asociación Médica Mundial, 1964). Recuperado en noviembre de 2010 de http://www.bioetica.uchile.cl/doc/exper_2.htm.
- Plagenhoef, S. (1979). Biomechanical Analysis of Olympic Flatwater Kayaking and Canoeing, *Research Quarterly*, Vol.50, No.3, pp.443-459.
- Qiu, Y., Wei, W., Liu, A. y Cao, J. (2005). Comparative research on the stroke rhythm of men and women kayakers in the international competition. *XXIII International Symposium on Biomechanics in Sports*. pp. 943-946. Editado por Qing Wang. The China Institute of Sports Science. Beijing, China.
- Toro, A. (1986). *Canoeing: An Olympic sport*. San Francisco, California. First edition, by Olympian Graphics.
- Vacek, V. (1971). *Manual de Canotaje*. Supervisión de Rafael Gayol Vélez, México. D.F. México. Editado por el Comité Olímpico Mexicano.
- Vinuesa, J.C., (1990). Modelo analítico de valoración de la técnica de canoa y kayak, en *Comunicaciones Técnicas*, número especial. I Jornadas de Perfeccionamiento Técnico Superior de Piragüismo de Castilla y León. Federación Española de Piragüismo, España. Escuela Nacional de Entrenadores. pp. 77-78.
- Viru, A. (2001). Algunos aspectos actuales de la teoría del entrenamiento. En *Comunicaciones Técnicas*, Vol. XV, No. 15 julio 2001, Federación Española de Piragüismo, España. Escuela Nacional de Entrenadores. pp. 19-49.
- Woltring, H.J. (1980). Planar control in multi-camera calibration for 3-D gait studies. *Journal of Biomechanics*, Vol. 13, pp. 39-48.

AGRADECIMIENTOS

La autora quiere agradecer a Luis Ramírez y a Verónica García, por ayudar en la grabación, a Bernardo Escalona por el programa de LPF, y muy especialmente a Branislav Jrámek, palista checo, que entrenó a un invierno en la Ciudad de México.