

Análisis Biomecánico de la palada de kayak en sujetos sanos sin experiencia

V. Bueyes-Roiz^{1,2*}, I. Quiñones Urióstegui¹, L. E. Anaya Campos¹

¹ Laboratorio Análisis de Movimiento, INR-LGII, CDMX, México.

² Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Iberoamericana, CDMX, México.
**vbueyes@hotmail.com*

Resumen

El kayak es un deporte que requiere de un alto grado de coordinación con el miembro superior mientras se mantiene el equilibrio sobre un asiento inestable, por lo que el mantenimiento de la postura cobra gran importancia y poco se ha estudiado. Recientemente ha surgido interés en el entrenamiento de kayak con ergómetro debido a que permite a poblaciones de adultos mayores o con discapacidades el entrenamiento del tronco para promover un mejor control postural, por lo que el objetivo de este trabajo es conocer las características cinemáticas y la activación muscular en el tronco durante la palada de kayak en personas sanas que no han realizado ejercicio de kayak anteriormente, y determinar si el movimiento es similar a aquellos que se dedican o han practicado kayak y por otro lado observar si existe activación muscular que permita a los sujetos mantenerse en equilibrio mientras realizan el ejercicio. Se reclutaron 6 sujetos sanos de 27 ± 3 años, todos deportistas ocasionales y sin entrenamiento previo en kayak. Con un equipo fotogramétrico VICON® se obtuvo la cinemática y para obtener la señal de electromiografía de superficie (sEMG) se utilizó un equipo Trigno Delsys® en los músculos del tronco. Como resultados se encontró que los sujetos sanos realizan un gesto motor de forma circular con un rango de movimiento similar a deportistas principiantes especialmente en la rotación del tronco ($23,59^\circ \pm 18,78$) mientras que las asimetrías en promedio fueron de 4,46%, su activación muscular presentó diferencias entre lados derecho e izquierdo superando el 18,52%. Se concluye que los sujetos sanos que no han entrenado en kayak cuentan con diferencias en la cinemática respecto a aquellos kayakistas profesionales. Asimismo los músculos del tronco se encuentran activos durante toda la palada de kayak, por lo que puede promover el equilibrio del tronco.

Palabras clave: Activación muscular, análisis de movimiento, biomecánica del deporte, cinemática, kayak.

1 Introducción

El kayak de aguas tranquilas es un deporte en el que el atleta va sentado en un bote utilizando una paleta de dos palas como medio de propulsión. El kayak requiere de un alto grado de coordinación, para desarrollar el movimiento de la palada es necesario realizar una serie de movimientos complejos con el miembro superior, mientras se mantiene el equilibrio sobre un asiento inestable, por lo que además del trabajo desarrollado por los músculos del brazo, el mantenimiento de la postura y el control del balance a nivel del tronco, cobra gran importancia. La palada de kayak involucra una serie de movimientos contralaterales de la parte superior del cuerpo divididos en tres fases para ambos lados del cuerpo (derecho e izquierdo). Fase de preparación (desde la pala elevada al frente hasta el punto donde entra al agua), Fase de empuje (desde donde entra al agua hasta cuando sale) y fase de recuperación (de donde sale la pala del agua al punto donde se eleva la pala al frente)[1]. Específicamente el atleta debe girar el tronco en el momento que la pala se encuentra bajando y “empujar” el agua, mientras que con el brazo contralateral se busca enderezar la pala y ponerla al centro del cuerpo esto se hace de forma cíclica y alternada. Una alternativa para el entrenamiento y evaluación de la palada

de kayak es el uso de ergómetros. La investigación de Fleming et al [2] concluye que la cinemática y el reclutamiento muscular se mantienen cuando se utiliza un ergómetro. La mayoría de los estudios biomecánicos de la palada de kayak se enfocan en la técnica y en la articulación del hombro[3][4], sin embargo poco se ha estudiado sobre la cinemática y la activación muscular del tronco y de los músculos que mantienen el equilibrio durante el paleo. Limonta et al [5], compara la cinemática en tres grupos de kayakistas: principiantes, intermedios y elite, encontrando que los kayakistas elite mostraron una amplitud significativamente mayor en las trayectorias del brazo y un nivel de asimetría menor que en los otros grupos. En contraste, los kayakistas menos experimentados mostraron movimientos más acentuados en el asiento del kayak y la pelvis en el plano frontal. Recientemente ha surgido interés en el entrenamiento de kayak con ergómetro debido a que permite a poblaciones de adultos mayores o con discapacidades el entrenamiento del tronco para promover un mejor control postural, pero aún hace falta establecer los parámetros cinemáticos y de activación muscular para entender los efectos que pudiera tener en dichas poblaciones en su capacidad para mantener el control de tronco y la postura. Por lo tanto el objetivo de este trabajo es el de conocer las características cinemáticas y la activación muscular en el tronco durante la palada de kayak en personas sanas que no han realizado ejercicio de kayak, y determinar si el movimiento es similar a aquellos que se dedican o han practicado kayak y por otro lado, observar si existe activación muscular que permita a los sujetos mantenerse en equilibrio mientras realizan el ejercicio.

2 Materiales y métodos

Todas las mediciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Análisis de Movimiento del Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra en la Ciudad de México.

2.1 Sujetos

Se reclutaron 6 sujetos sanos (3 hombres, 3 mujeres) el promedio de edad se encuentra en 27 ± 3 años, su estatura promedio es de 1.66 ± 0.05 m con un peso promedio de 67.5 ± 14 kg. Todos los sujetos son deportistas ocasionales y ninguno ha entrenado o se ha subido a un kayak previo al estudio.

2.2 Instrumentación

Antes de iniciar la prueba los sujetos firmaron Carta de Consentimiento Informado de acuerdo al protocolo de investigación autorizado INR:20/16, posteriormente los sujetos fueron pesados y medidos en una báscula, también fue necesario realizar algunas mediciones antropométricas como anchos de articulaciones y largos de piernas, obligatorios para el post procesamiento en el cálculo de las variables cinemáticas. A los participantes se les solicitó utilizar ropa ajustada en las piernas (short o licras), mientras que en el miembro superior los hombres realizaron la prueba con el torso desnudo y las mujeres con top deportivo, esto con el propósito de reducir el movimiento y por tanto el error que pudieran tener los marcadores con el movimiento de la ropa. Para la medición de los datos cinemáticos se instrumentó a los sujetos siguiendo el modelo biomecánico Plug-in Gait Full Body [6] desarrollado por VICON® (Oxford, Reino Unido), el cual coloca marcadores reflectivos en la cabeza, cuerpo axial y apendicular del sujeto, en este caso los marcadores que se utilizaron fueron de 14 mm de diámetro. Para la medición de la señal de electromiografía de superficie (sEMG): se colocaron sensores Trigno Delsys® (Massachusetts, EEUU) modelo IM y Quattro en los músculos: oblicuo interno, oblicuo externo, recto abdominal, erector longissimus, erector iliocostal, multifidus, trapecio ascendente y trapecio transversal, en ambos lados del cuerpo, la colocación de los sensores se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones del “Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles” SENIAM [7] previo a su colocación la piel de los sujetos fue limpiada con alcohol. Para la ejecución de la palada de kayak se utilizó un ergómetro comercial modelo SpeedStroke de KayakPro (Miami Beach, EEUU), la resistencia en el ergómetro para todos los sujetos fue cero.

2.3 Prueba

Previo a realizar la prueba en el ergómetro de kayak y posterior a colocar los sensores de electromiografía se realizó la medición de la Contracción Isométrica Máxima Voluntaria (MVC, por sus siglas en inglés), para cada uno de los músculos instrumentados, esta medición se realizó siguiendo las recomendaciones del manual muscular, esto se hizo con la intención de normalizar los valores de electromiografía y poder compararlos entre individuos. Una vez que los sujetos fueron instrumentados se tomó un archivo de calibración donde se le pidió a los sujetos quedarse quietos durante 3 segundos, posteriormente se colocaron en el ergómetro de kayak con las piernas flexionadas entre 20° y 30° y se les explicó en qué consiste la técnica de la palada, posteriormente se les dieron 5 minutos para que cada sujeto se acondicionaran a la técnica y se les dio retroalimentación sobre la misma, una vez que el sujeto se mostró seguro con el movimiento se pidió que peleará a cadencia libre durante 10 minutos. La captura de las variables cinemáticas y de sEMG se llevó a cabo con el software Nexus 2.10.3 de VICON® y un Lock VICON® donde se sincronizaron las señales, el sistema cuenta con 14 cámaras infrarrojas para el cálculo cinemático (combinación de VERO y VANTAGE) y 2 cámaras de referencia visual VUE. En total se capturaron datos durante 5 minutos con intervalos de 15 segundos de medición cada 45 segundos.

2.4 Procesamiento

Posterior a las pruebas los archivos con las posiciones de los marcadores colocados en los sujetos, fueron procesados en Nexus para limpiar, nombrar y realizar interpolaciones de posición según fuera necesario, después se aplicó el modelo biomecánico Plug in Gait Full Body[6] para obtener las variables cinemáticas del cuerpo en 3D (ángulo de hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla, tobillo, tronco y cuello) y los archivos fueron exportados en formato c3d para manejarlos posteriormente en Visual3D (C-Motion, Maryland, EEUU), en este último se definieron los eventos del gesto motor que fueron definidos como los puntos de entrada y salida de la pala al “agua”, con base en la posición respecto del eje anteroposterior del marcador que se encontraba en el dedo índice de cada mano de los sujetos, siendo la posición más alejada anteriormente como “entrada” y la más alejada posteriormente como “salida”. Por medio de dichos eventos las señales fueron segmentadas entre los eventos “entrada” a “entrada” de manera ipsilateral, y con ello se calcularon los promedios de los rangos articulares de cuello, tronco, hombros, codos, muñecas, caderas, rodillas y tobillos. Para las señales de sEMG cada una fue procesada para quitar el “offset” restando el promedio de la señal, posteriormente fueron filtradas con un filtro pasa altas con una frecuencia de corte en 50 Hz, un filtro pasa bajas tipo butterworth con una frecuencia de corte en 200 Hz y se calculó el RMS, los máximos de las pruebas de MVC fueron calculados y las señales de las pruebas fueron normalizadas a estos valores para cada músculo. Finalmente se calculó el tiempo de palada entre los eventos “entrada” a “entrada” de forma ipsilateral. Para los rangos articulares bilaterales (hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla y tobillo) y para la activación muscular se calculó el porcentaje de asimetría utilizando la siguiente fórmula[5]:

$$ASI\% = \left[\frac{|derecho - izquierdo|}{\min(derecho, izquierdo)} * 100 \right] \quad (1)$$

Por lo tanto, la asimetría se mide tomando los valores absoluto de la variable biomecánica de interés de los hemisferios derecho e izquierdo, entre el valor mínimo de dichos valores.

3 Resultados y discusión

3.1 Datos cinemáticos

Los sujetos en promedio daban 30 ± 7 paladas por minuto, siendo el 50 ± 2 % del ciclo en fase de empuje es decir de “entrada” a “salida” con un tiempo promedio de 1.04 ± 0.21 s. Los resultados de los rangos articulares, así como su asimetría se muestran en la Tabla 1, mientras que el movimiento del cuerpo axial y el centro de masa se muestran en la Tabla 2. Las trayectorias que describieron los dedos

de los sujetos es similar a las trayectorias realizadas por la pala, como se muestra en la Fig. 1, donde se pueden observar los ciclos promedio de cada una de las trayectorias producidas por los sujetos que participaron en el experimento.

Tabla 1: Promedio de rango de movimiento articular bilateral al realizar la palada de kayak. ROM (Rango de Movimiento por su siglas en Inglés)

Articulación	Derecha		Izquierda		ASI%
	Promedio	DS	Promedio	DS	
Hombro Flexión-Extensión ROM ($^{\circ}$)	83.31	5.81	80.76	8.38	3.16
Hombro Abducción-Aducción ROM ($^{\circ}$)	78.57	12.85	76.85	13.26	2.24
Codo Flexión-Extensión ROM ($^{\circ}$)	96.72	6.39	94.65	7.49	2.19
Muñeca Flexión-Extensión ROM ($^{\circ}$)	44.20	13.03	41.80	3.59	5.73
Cadera Flexión-Extensión ROM ($^{\circ}$)	4.25	1.11	4.45	1.67	4.66
Rodilla Flexión-Extensión ROM ($^{\circ}$)	6.11	3.09	5.71	3.27	6.97
Tobillo Flexión-Extensión ROM ($^{\circ}$)	20.67	9.54	21.97	9.76	6.28

Tabla 2: Promedio de rango de movimiento de cuerpo axial y movimiento del centro de masa. ROM (Rango de Movimiento por su siglas en Inglés)

Articulación	Rango	
	Promedio	DS
Cuello Rotación ROM ($^{\circ}$)	33.32	43.85
Tronco Rotación ROM ($^{\circ}$)	23.59	18.78
Tronco Flexión-Extensión ROM ($^{\circ}$)	39.43	6.47
CM CP desplazamiento (m)	0.02	0.00
CM Lateral desplazamiento (m)	0.02	0.01

En relación a los resultados cinemáticos y tomando los valores presentados por Limonta [5] se puede observar que el rango articular que se muestra en el codo se encuentra por arriba de los sujetos principiantes (en su caso 1 año de experiencia en kayak), y cercanos que los sujetos clasificados como intermedios ($95^{\circ} \pm$ ASI 5.6%, [5]), con una asimetría menor (ASI% = 2.19), mientras que el rango de movimiento reportado para la rodilla se encuentra por debajo de los principiantes ($24^{\circ} \pm 6$ ASI 12.5% [5]), nuestros sujetos presentaron poco movimiento en el miembro inferior siendo el tobillo la articulación que presenta mayor movimiento.

Es interesante notar que las asimetrías encontradas en nuestros datos se encuentran por debajo del 10%, indicando que no existen diferencias entre ambos lados y no se hace notoria la lateralidad de los sujetos, aunque el ROM (Rango de Movimiento por su siglas en Inglés) para el miembro superior derecho es más grande por 2° en promedio. Donde sí encontramos diferencias fue en la rotación de la cabeza con una desviación estándar de 43.85° , por lo que se puede apreciar un intervalo muy amplio del ROM con una rotación del cuello desde 121° hasta 8° donde la cabeza está prácticamente inmóvil, por otro lado el rango de rotación de tronco encontrado con nuestros sujetos es similar a los sujetos principiantes ($24^{\circ} \pm 5$, [5]) reportados por Limonta. Mientras que el desplazamiento del centro de masa fue muy similar en todos los sujetos con una desviación estándar de 0 en el eje anteroposterior y 0.01 para el mediolateral, de acuerdo con Limonta y Mann los sujetos que realizan kayak de manera profesional presentan un desplazamiento significativo del centro de masa durante la ejecución de la palada [5], [1]. Respecto de la trayectorias de la palada obtenidas entre los sujetos se puede decir que son similares entre sí, y éstas tienden a ser circulares especialmente en el lado izquierdo, esto coincide con lo reportado por Limonta para kayakistas principiantes, por el momento esta información

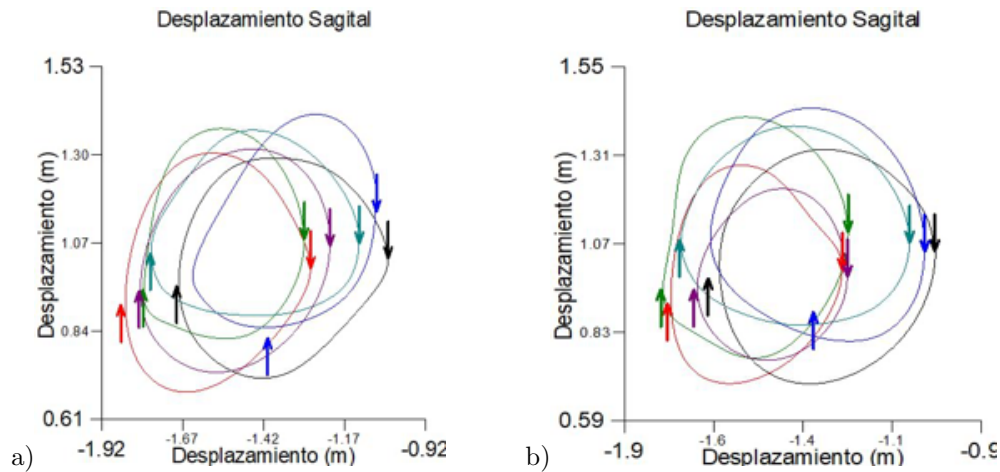


Fig. 1. Dentro de la imagen se muestran las trayectorias en el plano sagital que presentaron los diversos sujetos, cada color es un sujeto diferente. Dentro de la imagen a) se muestran las trayectorias seguidas por el brazo derecho mientras que en la imagen b) aquellas que realizó el lado izquierdo. Cada sujeto cuenta con una flecha con dirección hacia abajo que indica el momento que “entra” al agua, mientras que la flecha que apunta hacia arriba indica el momento en el que “sale” del agua.

es suficiente, pero para un análisis cuantitativo de las trayectorias en donde se quiera dar seguimiento a entrenamientos posteriores esto sería necesario.

3.2 Activación muscular

La activación muscular fue dividida en fase de empuje y fase de recuperación para cada lado y posteriormente normalizada al MVC de los sujetos, el promedio de todos los sujetos se muestra en la Fig. 2, mientras que la asimetría de la activación muscular en cada fase se muestra en la Tabla 3.

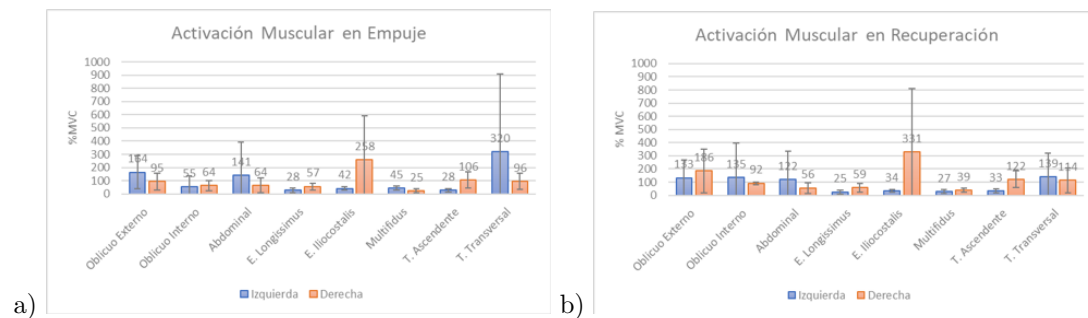


Fig. 2. Activación muscular dentro de las fases de palada de kayak, en ambas imágenes se muestra el promedio de los sujetos normalizado a la MVC de cada uno con su respectiva desviación estándar para ambos lados en la parte superior de cada barra se muestra en número el promedio de la activación. Imagen a) muestra la activación en la fase de empuje que en este caso se midió entre los eventos “entrada” a “salida” del agua, mientras que en la imagen b) se muestra la fase de recuperación que va de “entrada” a “salida” del agua.

Tabla 3: ASI % de la activación muscular entre lado derecho e izquierdo en fases de la palada.

Músculo	Empuje	Recuperación
Oblicuo Externo	72.1	39.9
Oblicuo Interno	16.2	47.2
Abdominal	120.8	118.9
E. Longissimus	105.4	133.1
E. Iliocostalis	513.4	868.6
Multifidus	81.8	47.8
T. Ascendente	284.0	265.0
T. Transversal	233.0	22.0

Respecto de la activación muscular, al igual que reportó Brown [8] encontramos diferencias en el promedio de activación entre lados derecho e izquierdo de cada músculo, como se puede ver en la Tabla 3, las asimetrías se encuentran en todos los músculos por arriba de 18.52%, en estudios de Análisis de Movimiento las asimetrías por lo general se encuentran alrededor del 5%. De acuerdo a los resultados mostrados por Brown los músculos con mayor activación deberían de ser los oblicuos externos donde se puede ver que tanto en fase de empuje y recuperación son los músculos que bilateralmente cuentan con mayor activación dentro de nuestros resultados.

4 Conclusiones

Se obtuvieron las características cinemáticas y la activación muscular del tronco y el miembro superior durante la palada de kayak en persona sanas sin experiencia en la palada de kayak, como se esperaba los sujetos sanos que no han entrenado en kayak cuentan con diferencias en la cinemática respecto a aquellos kayakistas profesionales. Es interesante que en esta muestra de sujetos el rango articular del codo superó a los sujetos principiantes reportados por Limonta. así como también las asimetrías encontradas en este trabajo son menores a las reportadas por otros autores. A pesar de que el ergómetro de kayak proporciona una guía para el gesto motor y aplica una tensión constante a la pala se puede observar que las trayectorias obtenidas no son idénticas entre sí. Por otro lado, respecto de la evaluación de la electromiografía de superficie, existen diferencias en la activación muscular en cada una de las fases de la palada, así como diferencias entre los lados derecha e izquierda, lo que coincide con lo reportado en la literatura. Respecto de la asimetría para la señal de sEMG, éstas fueron mayores al 39.9%. Con los resultados obtenidos se puede concluir que los músculos que se encuentran en el tronco se encuentran activos durante todo el gesto motor de palada de kayak, por lo que este gesto motor puede promover el equilibrio del tronco.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés para este trabajo.

Agradecimientos

A la alumna Ana Cristina Betán de la Licenciatura de Sistemas Biomédicos de la UNAM, por la ayuda en la medición de pacientes y limpieza de datos.

Referencias

- [1] Y. Qiu, W. We, A. Liu, & Jingwei Cao. Comparative Research on the Stroke Rhythm of Men and Women. *Int. Symp. Biomech. Sport.*, pp. 943–946, 2005.
- [2] Fleming, N., Donne, B., & Fletcher, D. (2012). Effect of kayak ergometer elastic tension on upper limb EMG activity and 3D kinematics. *Journal of Sports Science and Medicine*, 430–437.
- [3] Trevithick, B. A., Ginn, K. A., Halaki, M., & Balnave, R. (2007). Shoulder muscle recruitment patterns during a kayak stroke performed on a paddling ergometer. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 74–79.
- [4] McDonnell, L. (2013). The effect of stroke rate on performance in flat-water sprint kayaking. <http://aut.researchgateway.ac.nz/handle/10292/6028>, visto agosto 2020.
- [5] Limonta, E., Squadrone, R., Rodano, R., Marzegan, A., Veicsteinas, A., Merati, G., & Sacchi, M. (2010). Tridimensional kinematic analysis on a kayaking simulator: key factors to successful performance. *Sport Sciences for Health*, 27–34.
- [6] VICON. (n.d.). Plug-in Gait Reference Guide. <https://docs.vicon.com/display/Nexus27/Plug-in+Gait+Reference+Guide>, visto abril 2020.
- [7] Hermens, H. J., & Freriks, B. (n.d.). The SENIAM Project. <http://seniam.org/>, agosto 2020.
- [8] Brown, M. B., Lauder, M., & Dyson, R. (2010). Activation and contribution of trunk and leg musculature to force production during on-water sprint kayak performance. <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/issue/view/ISBS2010>, visto abril 2020.