

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE POSTGRADO**



**“ROL DE LOS MOVIMIENTOS OCULARES DURANTE
EL APRENDIZAJE POR IMITACIÓN”**

BETEL VALENTINA RIVERO CAMPOS

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS Y MÉDICAS
MENCION NEUROCIENCIAS**

**Director de Tesis: Prof. Dr. Pedro Maldonado
Prof. Dr. Pablo Burgos**

2017

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE POSTGRADO**

INFORME DE APROBACION TESIS DE MAGISTER

Se informa a la Comisión de Grados Académicos de la Facultad de Medicina, que la Tesis de Magister presentada por la candidata

BETEL VALENTINA RIVERO CAMPOS

Ha sido aprobada por la Comisión Informante de Tesis como requisito para optar al Grado de Magister en Neurociencias en el Examen de Defensa de Tesis rendido el día 8 de marzo del 2017

Prof. Dr.

Director de Tesis

Laboratorio de Neurosistemas, Programa de Fisiología y Biofísica, Facultad de Medicina, Universidad de Chile

Biomedical Neuroscience Institute, Facultad de Medicina, Universidad de Chile

Prof. Dr.

Director de Tesis

Departamento de Kinesiología, Facultad de Medicina, Universidad de Chile

COMISION INFORMANTE DE TESIS

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Presidente Comisión

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo a toda prueba, a mis hermanos por su humor y cariño, a mi esposo por su amor y comprensión en todo este proceso. A mis profesores Dr. Pedro Maldonado, gracias por su guía, por la inmensa generosidad en compartir sus conocimientos y Dr. Pablo Burgos por siempre mantener el espíritu en alto y darme el soporte necesario cuando la meta se veía lejana. A Kristopher Muñoz por su infinita paciencia.

ÍNDICE

1.- Resumen	3
2.- Abstract	4
3.- Introducción	5
3.1.- Aprendizaje motor por imitación	5
3.2.- Procesos neurales vinculados al aprendizaje motor por imitación	6
3.3.- Movimientos oculares durante la imitación	8
4.- Hipótesis	10
5.- Objetivos	10
5.1.- General	10
5.2.- Específicos	10
6.- Materiales y métodos	11
6.1.- Sujetos	11
6.2.- Setup experimental	11
6.3.- Tarea	12
6.4.- Identificación de movimientos oculares	15
6.5.- Análisis del rendimiento durante la ejecución de la tarea motora	15
6.6.- Análisis estadístico	15
7.- Resultados	16
7.1.- Movimientos oculares	16
7.2.- Desempeño motor	19
7.3.- Correlación entre movimientos oculares y desempeño motor	25
8.- Discusión	28
9.- Conclusión	30
10.- Bibliografía	31

1.- RESUMEN

El aprendizaje motor por imitación diferida, ha sido poco estudiado, sobre todo en secuencias espaciales largas, que involucren movimientos corporales globales, y particularmente en adultos sanos.

En la tarea propuesta, no hay estímulos rectores que permitan el aprendizaje por anticipación al estímulo, sino más bien la secuencia debe ser almacenada en la memoria. El diseño de la tarea consta de una primera etapa de presentación del estímulo, donde se permite una exploración visual libre del video, al tiempo que la conducta visual de los sujetos se registra mediante el sistema Eye Tracker, y una segunda etapa de ejecución de la secuencia de movimiento presentada, cuyo registro se realiza mediante el sistema 3D Myomotion de Noraxon y permite un análisis biomecánico cuantitativo concentrado en los rangos de movimiento. Se estudian 5 bloques sucesivos del procedimiento descrito, contemplando tanto la presentación del estímulo como su posterior ejecución. La secuencia de movimiento consta de 10 posiciones, que involucran distintos segmentos corporales y cuya duración es de 26 segundos, seguidos de un tiempo libre para la ejecución motora por parte del sujeto, se evalúa un total de 18 sujetos. El registro, y posterior análisis de los movimientos oculares se realiza sobre 4 áreas de interés implicadas en la tarea.

Se concluye que la preferencia de visualización por el blanco de la tarea, reflejado en el mapa de calor por la concentración de colores más cálidos en áreas de interés como cara, tronco y extremidades superiores, aumento en la duración de las fijaciones oculares, coincidencia en un mayor número de frames de la tarea entre el área de interés preferente para un movimiento dado y la posición ocular, y finalmente, un aumento en la distancia entre el área de interés y la posición del ojo, se correlaciona con un mejor rendimiento en la imitación de la tarea presentada, lo que refleja consolidación de aprendizaje motor, y refuerza el concepto de que la optimización de obtención de información mediante la vía visual, constituye un aspecto determinante en éste.

2.- ABSTRACT

The motor learning by deferred imitation, has been little studied, particularly in long space sequences involving global body movements, and particularly in healthy adults. In the proposed task, there are no guiding stimuli that allow learning by anticipation of the stimulus, but rather the sequence must be stored in memory. The design of the task consists of a first stage of presentation of the stimulus, where a free visual exploration of the video is allowed, while the visual behavior of the subjects is recorded through the Eye Tracker system, and a second stage of execution of the motion sequence presented, whose registration is done by the 3D system Myomotion of Noraxon and allows a quantitative biomechanical analysis concentrated in the ranges of movement. Five successive blocks of the described procedure are studied, contemplating both the presentation of the stimulus and its subsequent execution. The sequence of movement consists of 10 positions, involving different body segments and whose duration is 26 seconds, followed by a free time for the motor execution by the subject, a total of 18 subjects are evaluated. The recording and subsequent analysis of eye movements is performed on 4 areas of interest involved in the task.

It is concluded that the preference of visualization by the target of the task, reflected in the heat map by the concentration of warmer colors in areas of interest such as face, trunk and upper limbs, increased duration of ocular fixations, coincidence in a greater number of frames of the task between the area of preferential interest for a given movement and the ocular position, and finally, an increase in the distance between the area of interest and the position of the eye, correlates with a better performance in the imitation of the presented task, which reflects the consolidation of motor learning, and reinforces the concept that the optimization of obtaining information through the visual pathway, constitutes a determining aspect in this one.

3.- INTRODUCCIÓN

3.1.- Aprendizaje motor por imitación

La imitación se refiere a la abierta reproducción de una acción observada, y requiere que el observador traduzca aspectos percibidos en la conducta de otro individuo en comandos motores (Bunlon et al, 2015). Un tema central tratado en la literatura referida a imitación, denominado correspondencia, es como los códigos sensoriales se transforman en códigos motores (Prinz, 2005; Dautenhahn et al, 2002). Una solución propuesta a esta problemática es una codificación común entre la percepción y la acción, apoyada por ejemplo en la hipótesis de mapeo intermodal activo, y que postula un proceso de comparación entre la retroalimentación propioceptiva del observador y la información visual sobre el acto observado (Meltzoff, 2005). Tal mapeo intermodal es posible, porque las acciones percibidas y ejecutadas están codificadas dentro de un marco de representación común en términos de las relaciones entre los órganos relevantes. Al igual que la teoría ideo-motora, que también postula que la acción y la percepción cuentan con un formato de representación común (Prinz, 2005; Hommel et al, 2001; Shin et al, 2010). En este marco, dicha teoría supone que las acciones están controladas por representaciones de sus efectos perceptibles, incluida la información relacionada con el cuerpo (retroalimentación propioceptiva y la información visual acerca de la posición de los segmentos corporales durante y/o después del movimiento) y más distales, efectos asociados a acciones que provoquen cambios en el medio ambiente. Este enfoque se basa en el supuesto básico de que la ejecución reiterada de un movimiento y la percepción de sus efectos a corto plazo, implica asociaciones bidireccionales entre los códigos motores asociados a la acción y códigos sensoriales relacionados a los efectos de la acción (aprendizaje ideo-motor o vínculo acción-efecto) (Prinz, 2005; Nattkemper et al, 2010; Elsner et al, 2001). Es importante destacar que la teoría ideo-motora da cuenta de la imitación: al ver la acción de otra persona, y sus consecuencias, los planes de acción que conduzcan a esas consecuencias se activan en el observador (Iaconobi, 2009).

3.2.- Procesos neurales vinculados al aprendizaje motor por imitación

Por otra parte, a nivel neurofisiológico, el descubrimiento de las neuronas espejo en el área F5 de la corteza premotora del mono, proporciona evidencia de que la observación y la ejecución de la acción, comparten una representación neural común (Di Pellegrino et al, 1992). De hecho, estas neuronas responden más fuertemente durante la observación de una acción de agarre, cuando el sujeto es visible, en comparación a la observación de sólo la mano del sujeto, lo que indica que un área del lóbulo parietal inferior, está involucrada en la comprensión de la meta y la intención detrás de un acto motor observado (Ferri et al, 2015; Fogassi et al, 2005). Las neuronas en espejo disparan tanto cuando el mono realiza una acción, como cuando el mono observa la misma acción realizada por el experimentador. Un sistema similar parece estar presente en humanos, aunque la naturaleza y función de este sistema ha sido objeto de debate. Estudios neurofisiológicos (por ejemplo, en EEG y fMRI), han revelado un circuito que incluye la parte posterior del surco temporal superior, la parte rostral del lóbulo parietal inferior, la parte posterior de la circunvolución frontal inferior y corteza premotora ventral adyacente, que se activa cuando las personas observan a otra ejecutando una acción, y también cuando ellas mismas están realizándola (Rizzolatti et al; Iacoboni, 2009).

A nivel de comportamiento, la teoría ideo-motora, predice que la ejecución de la acción o su iniciación, se ve facilitada por la observación de una acción similar, mientras que la observación de una acción diferente interfiere con la ejecución de la acción. Lo que reafirma, el rol crucial que juega la observación durante la imitación y la ejecución de las acciones, y que ha sido demostrado previamente en estudios que se centran en distintos tipos de acciones, como la apertura y cierre de la mano, movimientos de la boca y brazo (Brass et al, 2000; Sturmer et al 2000; Leighton et al 2010; Bouquet et al 2011). Otro supuesto principal de la teoría ideo-motora, es que la asociación entre los efectos perceptivos y los códigos motores, se construye a través de la experiencia: aprendemos a asociar nuestra acción con sus efectos (Elsner et al, 2001; Herwig et al, 2009; Waszak et al, 2007). Asociar efectos ambientales remotos con una acción, puede jugar un rol importante en la imitación (Elsner 2007; Paulus 2014). Estudios en niños han demostrado la importancia de las metas en la imitación (Elsner 2007; Wohlschlagel et al 2003; Hauf et al 2004). Al imitar las acciones dirigidas a metas, la percepción de las consecuencias de la acción en el entorno, activa la acción

más fuertemente asociada con este efecto de forma remota, sin necesariamente, imitar los movimientos exactos del modelo (Elsner 2007). Sin embargo, también somos capaces de imitar movimientos sin sentido o acciones no dirigidas a metas (por ejemplo: gestos comunicativos, movimientos de baile, etc.), al imitar este tipo de acción, el movimiento en sí es la meta y nuestro objetivo es replicar la parte motora de la acción (Elsner 2007).

En este caso se asume que la percepción de los movimientos del cuerpo desencadena los comandos motores correspondientes, lo que permite los movimientos exactos del modelo a copiar. Este mapeo de los movimientos observados en los comandos motores del observador, se conoce como resonancia motora. Algunas teorías actuales consideran que la copia de los movimientos es el núcleo del proceso de imitación, y de acuerdo con los modelos más recientes, la resonancia motora es fundamental para el aprendizaje imitativo (Paulus, 2014; Paulus et al, 2011).

Estudios en niños sobre la imitación de acciones dirigidas a un objetivo, prestan especial atención al papel de los dos componentes observables de una acción, el movimiento en sí mismo y los efectos que produce dicha acción. La evidencia disponible, concluye que el ser humano desde la infancia se beneficia más de una demostración completa de ambos, el movimiento y sus efectos. Si el movimiento se demuestra de forma aislada, los niños pueden codificar la información, pero pueden reproducirla preferentemente si las acciones conllevan efectos sobresalientes. Por otra parte, si se presentan los efectos de las acciones de forma aislada, los niños menores de 19 meses, en general, no son capaces de emular los movimientos que no fueron visibles, necesarios para producir estos efectos. Sin embargo, la capacidad del ser humano de predecir los efectos de una acción o inferir los movimientos requeridos para producir dicho efecto, mejora sustancialmente al final del segundo año de vida. Se concluye que la capacidad de aprender las correlaciones entre movimientos y efectos de la acción, mediante la observación y el conocimiento acerca de las relaciones entre el movimiento y efectos adquiridas hasta ahora, pueden ser factores importantes que subyacen a los cambios de desarrollo en la imitación de las acciones dirigidas a objetivos (Elsner, 2007). En nuestro estudio la tarea consiste en una secuencia de movimientos arbitraria, no dirigida a un objetivo, más que la imitación del movimiento en sí mismo, y que no constituye un patrón de uso cotidiano para los participantes, por lo que el interés está centrado en la exactitud con la que será replicada dicha secuencia por parte de los sujetos. El problema principal del presente trabajo, es determinar si hay un patrón

espacial y temporal de movimientos oculares, con el cual examinamos una tarea motora, que constituya una estrategia más eficiente en cuanto a la extracción de información sensorial, y se correlacione por tanto, con una reproducción más fiel por parte del imitador, de los movimientos del modelo.

Por otra parte, la imitación intencional implica, una reproducción abierta, voluntaria de la acción o movimiento de otro. Es conocido que la observación de una acción con la intención de imitar, implica diferentes procesos cerebrales que no participan necesariamente en la observación pasiva de una acción (Decety et al, 1999). Además de la implicancia del sistema de neuronas espejo fronto-parietal, ya descrito, también pueden estar participando áreas prefrontales, lo que podría reflejar la mantención de las representaciones motoras o control top down de representaciones asociadas a la acción (Herwig et al, 2009; Bien et al, 2009).

3.3.- Movimientos oculares durante la imitación

Los movimientos son necesarios para participar en el mundo, pero cada movimiento resulta en una ambigüedad sensoriomotora. Los movimientos de nuestro propio cuerpo, causan cambios en el flujo de entrada sensorial, así como también, cambios en las posiciones relativas de los objetos para los efectores motores (ojos y extremidades). De ahí que el cerebro necesita monitorear los movimientos del propio cuerpo, y una manera de lograrlo, es enviando copias de los comandos motores a las estructuras apropiadas. Estas señales, conocidas como descargas corolarias, permiten la compensación de las consecuencias sensoriales por el movimiento y actualización preventiva de representaciones espaciales. Estas operaciones se producen con una velocidad y precisión que implica una dependencia de la predicción, lo que permite concluir que las descargas corolarias, contribuyen a la predicción, permitiendo la armonía sensoriomotora (Crapse et al, 2008).

Comprender y reproducir las acciones de otras personas (es decir, imitar), es crucial para el aprendizaje de nuevos comportamientos a lo largo de toda la vida útil (Kolling et al, 2014). El aprendizaje por imitación, requiere que un agente observe adecuadamente acciones específicas realizadas por un modelo (humano), codifique, represente estas acciones y finalmente, adicione los mapas de estas acciones a su propio repertorio motor. Uno de los principales problemas para un aprendiz durante la

imitación es extraer los aspectos relevantes de una corriente de percepción de una serie de actividades que constituyan una acción de un agente.

Evidencia disponible de imitación diferida selectiva en niños de 12 meses y evaluación con Eye Tracker de su conducta visual durante la demostración de la acción, revela que los niños tienden a imitar acciones predominantemente funcionales por sobre las arbitrarias (efecto funcionalidad). Los datos de rastreo ocular muestran que, los niños no tienen tiempos de fijación ocular significativamente más prolongados en las acciones funcionales versus las acciones arbitrarias, sin embargo la cantidad de fijaciones y el número de sacadas difieren entre acciones funcionales y arbitrarias, indicando diferentes mecanismos de codificación (Kolling et al, 2014).

Estudios realizados en sujetos adultos donde se analiza la imitación de gestos motores que involucran la extremidad superior y se registra paralelamente el comportamiento ocular con Eye Tracker, demuestran que para distintos movimientos las fijaciones oculares tienden a concentrarse en el segmento distal de la extremidad involucrada (la mano), independientemente si la observación es pasiva o si hay imitación. Los resultados dan una idea de la conexión entre la percepción visual y el control motor, lo que sugiere que: las personas analizan los movimientos del brazo humano en gran medida por el seguimiento de la mano o el punto final, incluso si el movimiento se realiza con todo el brazo al mismo tiempo, que las personas usan modelos internos innatos y aprendidos de movimiento, para recrear los detalles de la postura de todo el brazo y el movimiento de las trayectorias del punto final (Mataric et al, 1998).

4.- HIPÓTESIS

El patrón de movimientos oculares ejecutado durante una tarea de imitación diferida, determina el grado de aprendizaje motor.

5.- OBJETIVOS

5.1.- General

- Describir el patrón de movimientos oculares durante el aprendizaje por imitación diferido y posteriormente, relacionarlo con el desempeño durante la ejecución de la tarea motora.

5.2.- Especificos

- Aprender la formulación e implementación de experimentos con Eye Tracker.
- Describir el patrón de movimientos oculares durante el aprendizaje de una tarea de imitación motora.
- Identificar distintos patrones espaciales de movimientos oculares. Evaluar el desempeño de la tarea, posterior a la presentación del estímulo.
- Establecer correlaciones entre patrones de movimientos oculares y grados de aprendizaje motor.

6.- MATERIALES Y MÉTODO

6.1.- Sujetos

Se reclutó un total de 18 sujetos, de entre 18 y 30 años de edad, pertenecientes a la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, sin relación jerárquica entre el probando y el investigador responsable, los cuales fueron previamente informados sobre el propósito, características, beneficios y potenciales riesgos de la investigación en desarrollo. El experimento y procedimientos se realizaron bajo la aprobación del Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile.

Se establecieron los siguientes criterios de exclusión:

- Padecer patología neurológica, psiquiátrica y/o músculo-esquelética que impida la correcta ejecución de la tarea
- Referir uso de drogas o medicamentos que alteren la coordinación visomotora
- Referir antecedente de déficit atencional
- Padecer defectos visuales no corregidos

6.2.- Setup experimental

Los sujetos se ubicaron en posición bípeda a 1 mt de distancia del monitor, con 7 sensores que utilizan la tecnología de sensor inercial correspondiente al sistema de análisis 3D Myomotion de Noraxon, que basado en los denominados algoritmos de fusión, utiliza la información de un acelerómetro 3D, giroscopio y magnetómetro, para medir el ángulo de rotación de cada sensor en el espacio. El *Software* MR3 de Noraxon convierte los datos en ángulos anatómicos utilizando un modelo de cuerpo rígido.

Los movimientos oculares del ojo derecho, fueron registrados mediante un dispositivo de seguimiento ocular (Eye Tracker) Pupil Pro, con una tasa de muestreo de 30 Hz, con una agudeza de 0.6° y una precisión de 0.08°, el patrón de movimientos oculares será examinado sobre los componentes de la tarea (sujeto modelo), particularmente sobre 4 áreas de interés, sin considerar distractores. La tarea fue presentada en un monitor LED de 22" (NEC Multisync E222W), con una resolución de 1680 x 1050 pulgadas y un tamaño de 30 cms x 48 cms.

6.3.- Tarea

La tarea está compuesta por dos etapas, la primera consiste en la presentación de un video de 26 segundos, en el que se visualiza una secuencia de movimientos integrada por 10 posiciones que involucran distintos segmentos corporales, con uso preferente del plano frontal y donde se permite la exploración visual libre por parte del sujeto, como se muestra en la Figura 1.

En un primer trial se solicita sólo la observación pasiva de la tarea, posteriormente se realizan 5 trials donde la observación va seguida de la imitación de la secuencia de movimiento presentada.

La tarea se puede dividir fundamentalmente en 4 etapas (Figura 2):

- Calibración: El sistema Pupil Pro, tiene la opción de calibración manual al inicio del registro, el procedimiento se repite además al comienzo de cada trial durante la tarea.
- Instrucciones: Posterior a la calibración manual, aparecen en la pantalla durante 3 segundos las instrucciones a seguir, un primer trial consiste en la observación pasiva del estímulo, seguido de 5 trials de observación y posterior imitación de la tarea.
- Tarea: Luego, se realiza la exposición de un video de 26 segundos, donde un modelo realiza una secuencia de 10 movimientos corporales, realizados en el plano frontal y donde se utilizan fundamentalmente las articulaciones de hombro y cadera.
- Imitación: Finalmente el sujeto deberá imitar la tarea observada, con la mayor exactitud posible.

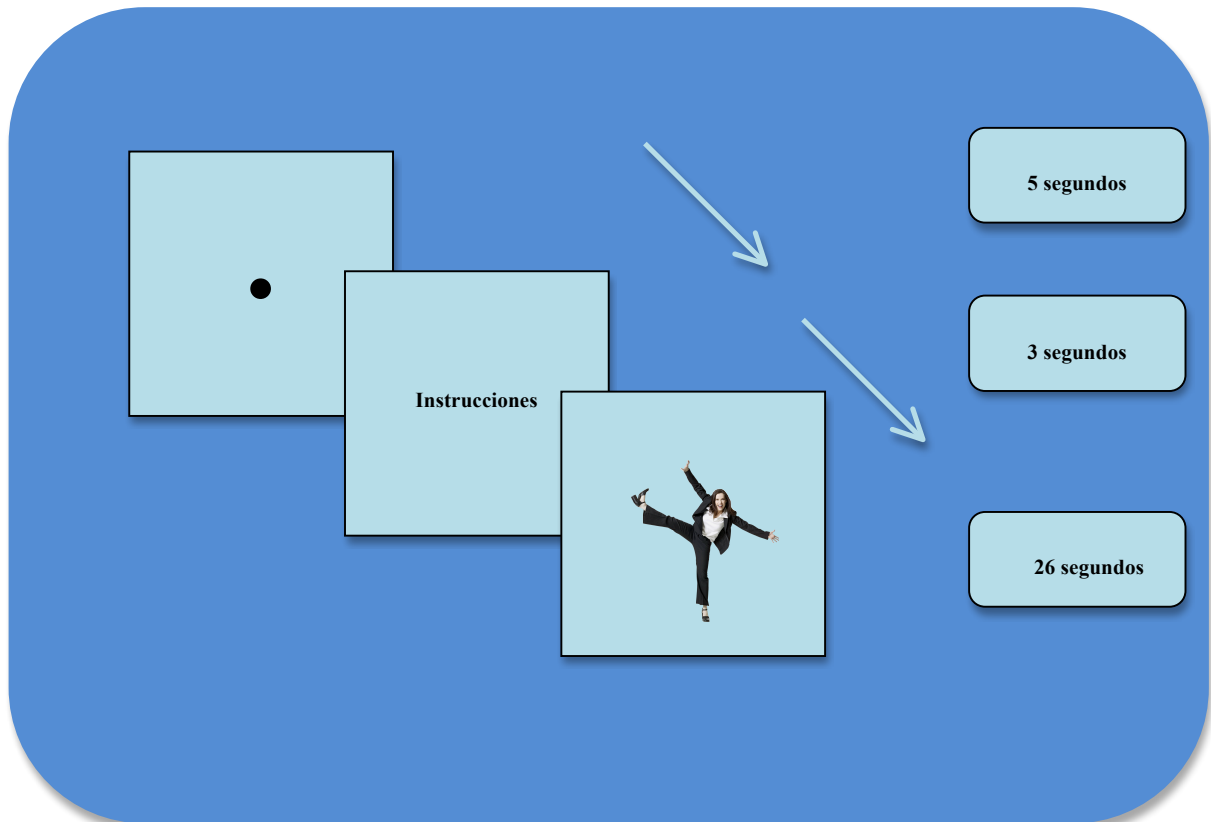


Fig.1. Estructura de un trial de la tarea, compuesto por una primera etapa de calibración manual del Eye Tracking a través de 5 puntos en la pantalla, seguido de una etapa de instrucciones de 3 segundos y finalmente del video del modelo ejecutando los movimientos a imitar por los sujetos registrados, de una duración de 26 segundos.

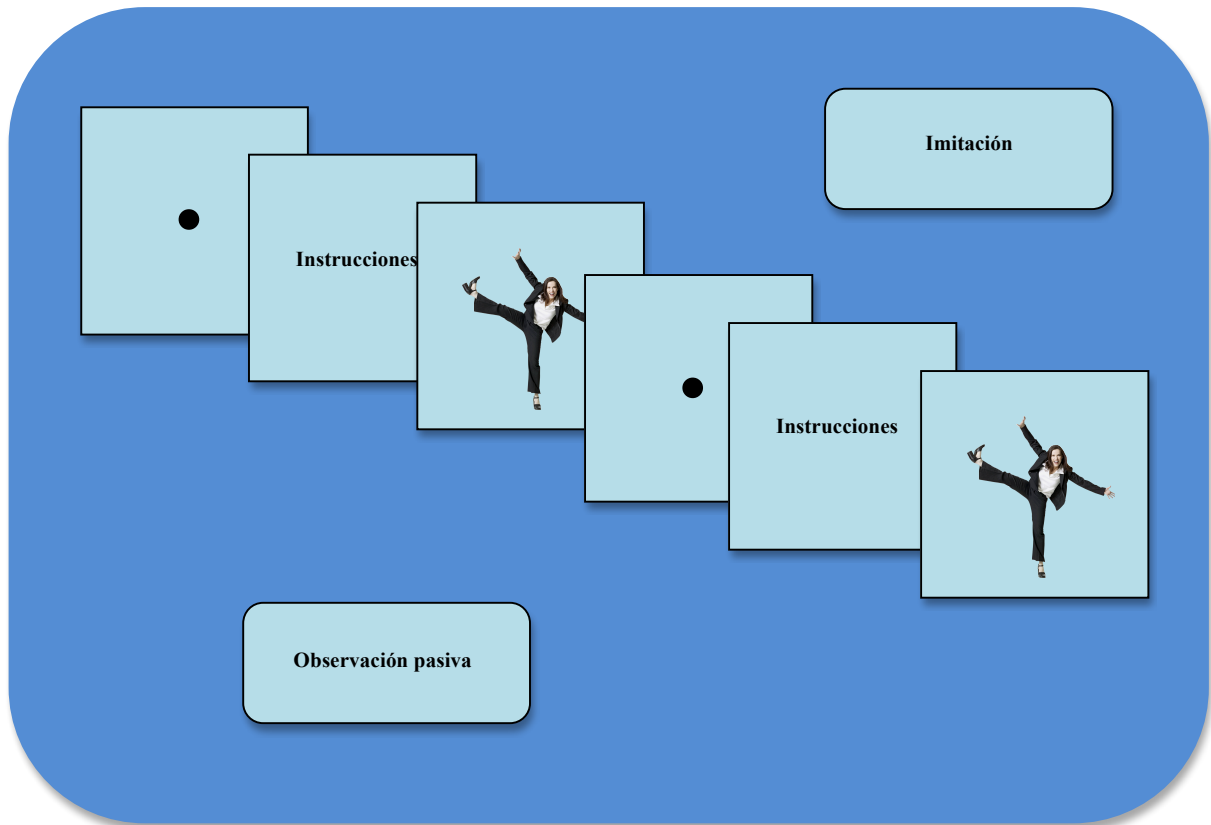


Fig.2. Estructura de la tarea compuesta por un primer trial que sólo exige la observación pasiva del video, seguida de 5 trials donde posterior a la observación de los movimientos ejecutados por el modelo, se solicita la imitación más exacta posible por parte de los sujetos registrados.

6.4.- Identificación de movimientos oculares

Se identificaron a través del registro por Eye tracker las fijaciones oculares (Komogortsev & Karpov, 2013; Salvucci & Goldberg, 2000). Para describir la conducta ocular general durante la tarea, se determinaron el número y duración de las fijaciones, la cantidad de frames donde hubo coincidencia entre el área de interés y la posición ocular y la distancia de separación entre ambas a lo largo de los 5 trials de la tarea, con el fin de caracterizar los patrones de inspección visual empleados por los sujetos. Se establecieron áreas de interés en cada posición, estableciéndose la articulación o segmento distal de la extremidad en movimiento en un determinado momento de la tarea (Mataric et al, 1998), y se analizaron las preferencias de los movimientos oculares hacia dichas áreas corporales. Se considera que estos elementos fueron visualizados funcionalmente (la fovea retiniana se posicionó sobre el elemento), cuando la distancia entre el centro de la mirada y el centro de alguno de los elementos fue menor a 3° visuales (Johansson et al., 2001; Terao et al., 2002).

6.5.- Análisis del rendimiento durante la ejecución de la tarea motora

La secuencia de movimiento presentada durante el video contempla 10 posiciones, que incorporan distintos segmentos corporales, ejecutadas de forma preferente en el plano frontal. La evaluación se realizó en un laboratorio de análisis de movimiento, fundamentalmente considerando los planos y rangos de movimiento ejecutados por los sujetos registrados respecto al modelo. Se realizó un análisis de correlación cruzada para el promedio de los sujetos en cada trial y para cada una de las 4 articulaciones mayormente implicadas en la tarea.

6.6.- Análisis estadístico

Para el análisis y cálculos estadísticos de los registros de movimientos oculares y desempeño motor se utilizó Matlab R2011a (MatWorks, Inc. 1984-2011). Para analizar el comportamiento de ambas variables durante la tarea, se utilizó Wilcoxon signed-rank test a modo de identificar las diferencias entre los 5 trials de la tarea.

7.- RESULTADOS

7.1- Movimientos oculares

Se grafica a través de un mapa de calor (Figura 3), la agrupación de los movimientos oculares de los 18 sujetos estudiados, durante la visualización de la tarea. Se aprecia que los colores más cálidos, que indican una mayor agrupación de los movimientos oculares, se concentran en la cara, tronco y extremidades superiores del modelo, con una tendencia hacia el lado izquierdo de la imagen, que coincide con un desplazamiento en el espacio hacia el lado derecho del modelo, durante la tarea.



Fig.3. Mapa de calor: colores más cálidos indican mayor número de movimientos oculares en ese punto; colores más fríos indican comparativamente menor número de movimientos oculares realizados. Se aprecia que los movimientos oculares se agrupan en torno a la cara, tronco y extremidades superiores del sujeto, con una tendencia hacia el lado izquierdo de la imagen.

Como se observa en la Figura 4, al analizar la duración promedio de las fijaciones para todos los sujetos en los 5 trials (primer trial 562 ms., segundo trial 602 ms., tercer trial 616 ms., cuarto trial 683 ms., y quinto trial 759 ms.), se observa un aumento progresivo desde el primer hasta el quinto trial, si bien, la diferencia es estadísticamente significativa sólo para la comparación entre el primer y tercer trial ($p=0.027$), a diferencia de la comparación entre el primer y quinto trial ($p=0.14$). Al

mismo tiempo el número de fijaciones en promedio realizadas por todos los sujetos registrados disminuye desde el primer (33.39) a quinto trial (20.83), con una diferencia estadísticamente significativa ($p=0.002$). Es importante destacar que la duración de las fijaciones encontradas en nuestro estudio, sobrepasa la clásicamente descrita (100 ms.), por lo que resulta interesante hacer un análisis diferenciado de la contribución de los movimientos de seguimiento lento a estos valores.

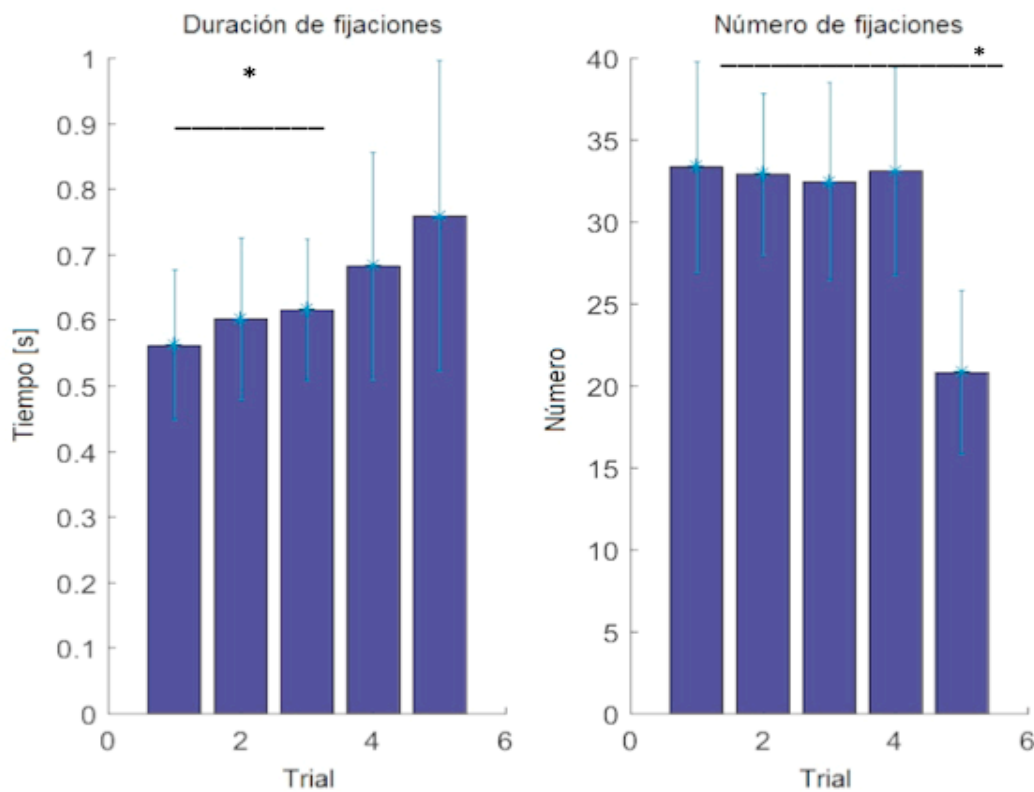


Fig.4. Se grafica en la imagen de la izquierda el tiempo promedio de las fijaciones, en la imagen de la derecha se representa el número promedio de fijaciones, para todos los sujetos, en los 5 trials de la tarea. Las barras de error representan el error estándar.

Para cada movimiento implicado en la tarea (abducción de hombro derecho e izquierdo y cadera derecha e izquierda), se definieron áreas de interés en las articulaciones distales de cada extremidad, que según estudios previos son áreas que muestran preferencia en la visualización durante la presentación de una tarea de imitación (Mataric, 1998).

En la figura 5, se grafica el promedio de frames para todos los sujetos en cada trial, donde la posición del ojo está dentro del área de interés implicada en el movimiento. En primer lugar podemos constatar una diferencia estadísticamente significativa en el número de frames donde hay coincidencia en movimientos de

extremidades superiores, respecto a movimientos de extremidades inferiores ($p=0,0003$). Al analizar de forma específica el comportamiento de cada sensor encontramos una diferencia estadísticamente significativa entre el primer y segundo trial ($p=0.040$) y primer y quinto trial ($p=0.040$) del sensor de abducción de hombro izquierdo, al igual que entre el primer y quinto trial ($p=0.016$) del sensor de abducción de hombro derecho. Por otra parte en cuanto a los sensores de extremidades inferiores se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre el primer y tercer trial ($p=0.031$), y primer y cuarto trial ($p=0.031$), del sensor de abducción de cadera izquierda. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los trials del sensor de cadera derecha.

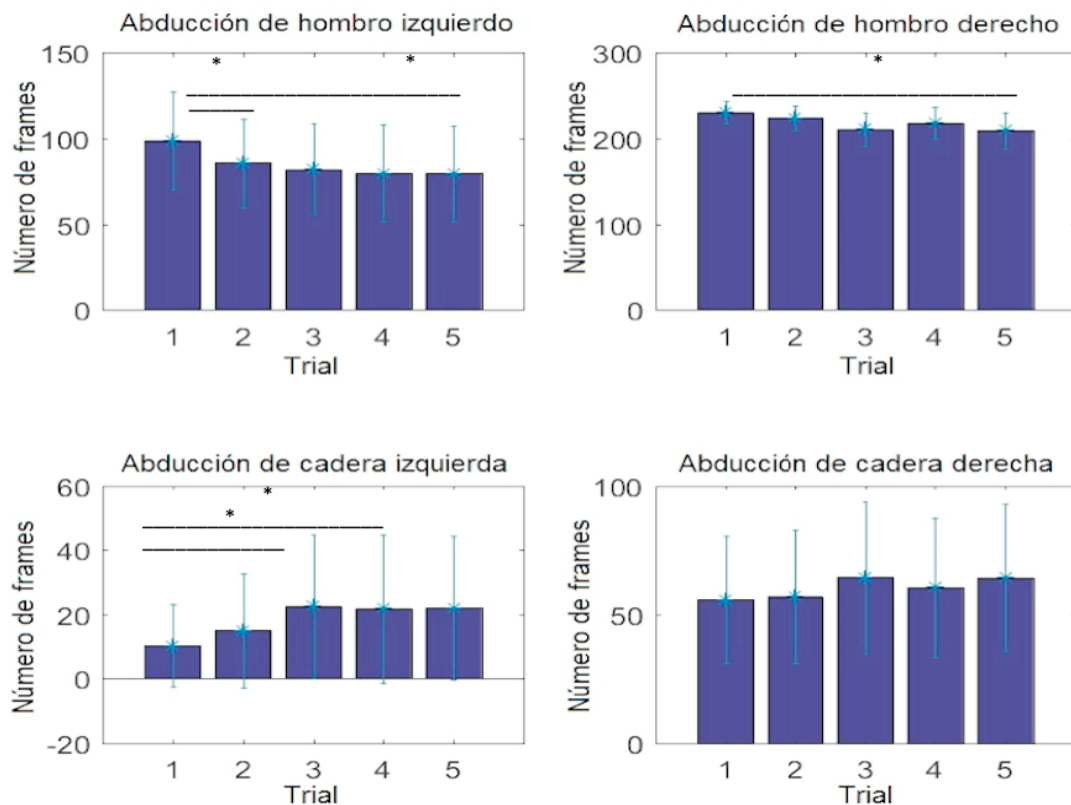


Fig.5. Se grafica el número de frames donde la posición del ojo está dentro del área de interés, para cada uno de los movimientos, durante los 5 trials. Las barras de error representan el error estándar.

Otro parámetro utilizado para estudiar la distribución espacial de la mirada respecto a las áreas de interés durante la visualización de la tarea, es la distancia entre ambas en los frames en los cuales no hay coincidencia. En la figura 6, se observa que hay una menor distancia medida en pixeles entre el área de interés y la posición del ojo, cuando los movimientos son ejecutados en las extremidades superiores, existiendo una diferencia estadísticamente significativa en comparación con la distancia entre el área

de interés y la posición del ojo en movimientos que comprometen las extremidades inferiores ($p=0.001$). Además encontramos diferencia estadísticamente significativa entre el primer y segundo trial ($p=0.038$), primer y tercer trial ($p=0.031$), primer y cuarto trial ($p=0.042$), y primer y quinto trial ($p=0.022$), para el sensor de abducción de hombro izquierdo, así como entre el primer y tercer trial ($p=0.010$), y primer y quinto trial ($p=0.013$), para el sensor de abducción de hombro derecho. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los trials de los sensores de extremidades inferiores.

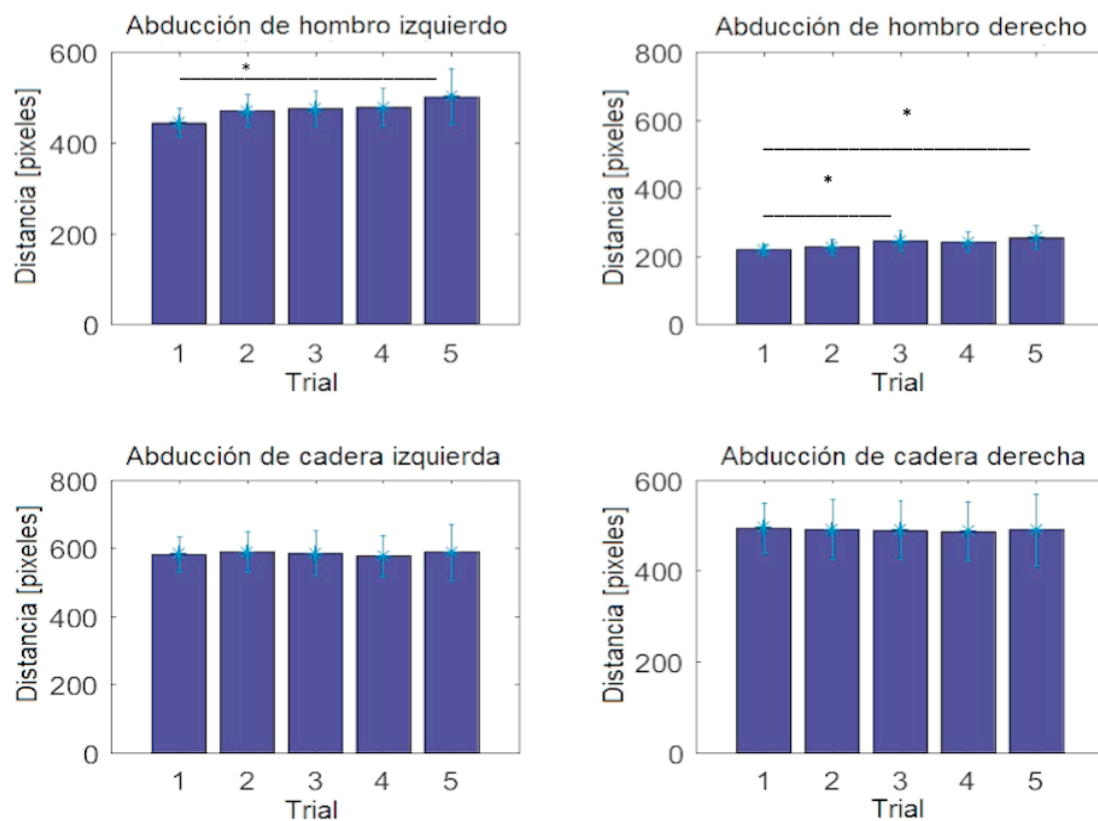


Fig.6. Se grafica la distancia en pixeles entre el área de interés y la posición del ojo, para cada uno de los movimientos durante los 5 trials. Las barras de error representan el error estándar.

7.2.- Desempeño motor

El análisis de desempeño motor de los sujetos se realizó a través de las señales emitidas por el sistema MyoMotion tanto del modelo como del sujeto de estudio, quitando la temporalidad a ambas señales. Posteriormente, se realizó un análisis de correlación cruzada entre ambas, donde la mayor correlación entre las señales

representará el desempeño de ese sujeto, para un movimiento dado, en un trial específico de la tarea, como se visualiza en los figuras 7 a la 10.

Como se observa en la figura 7 y 8, que representan el comportamiento de un sujeto para los movimientos de abducción de hombro izquierdo y derecho durante el primer, tercer y quinto trial, contrastado con la ejecución del modelo, existe una mayor coincidencia en la amplitud de las señales durante el quinto trial, así como la aparición de un comportamiento anticipatorio de la señal.

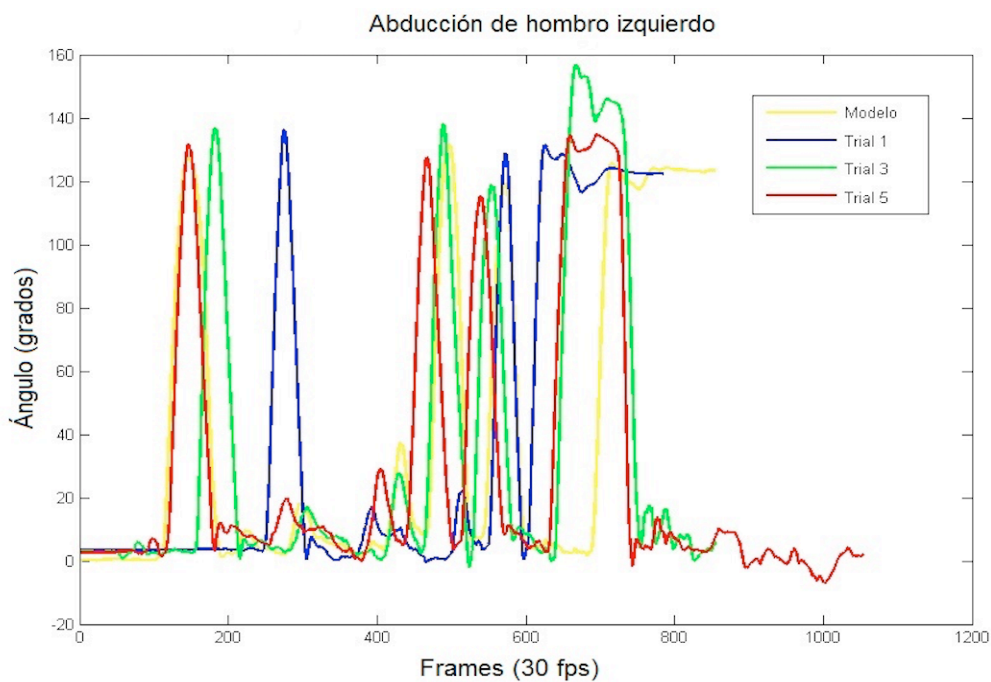


Fig.7. Gráfico representa la señal del desempeño motor del modelo versus la de un sujeto para el trial 1, 3 y 5, durante la ejecución de la tarea específicamente traduce los movimientos de abducción de hombro izquierdo.

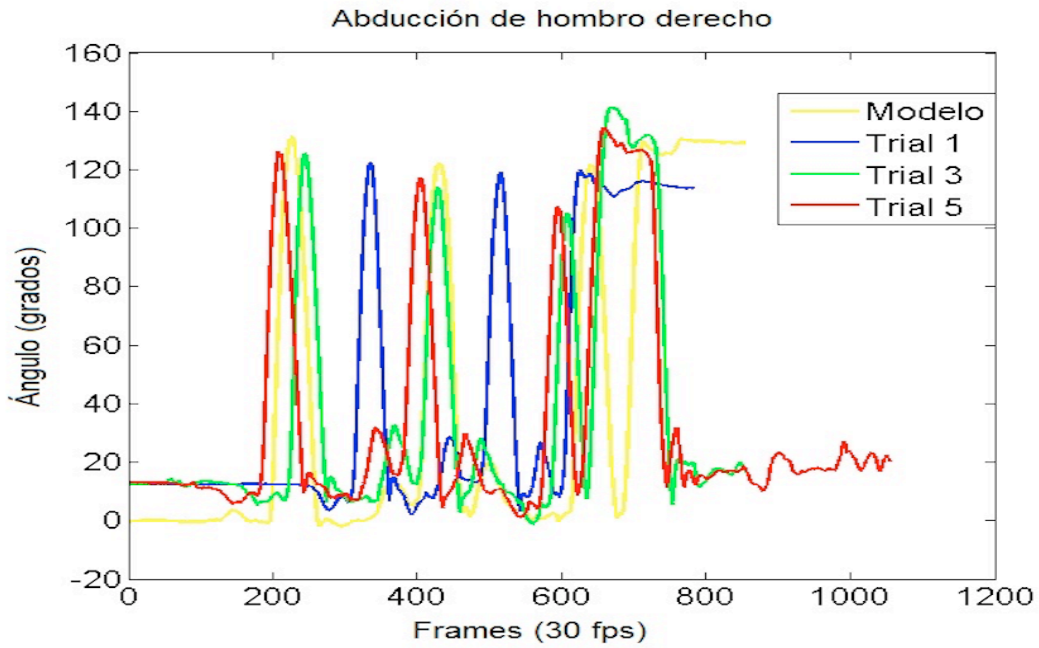


Fig.8. Gráfico representa la señal del desempeño motor del modelo versus la de un sujeto para el trial 1, 3 y 5, durante la ejecución de la tarea específicamente traduce los movimientos de abducción de hombro derecho.

Las figuras 9 y 10, representan el comportamiento de un sujeto para los movimientos de abducción de cadera izquierda y derecha, si bien la forma de la señal de un sujeto para los 3 trials esquematizados, es más caótica que para los movimientos previamente comentados, se puede observar de todas maneras la aparición de un comportamiento anticipatorio conforme el sujeto avanza en la ejecución de la tarea.

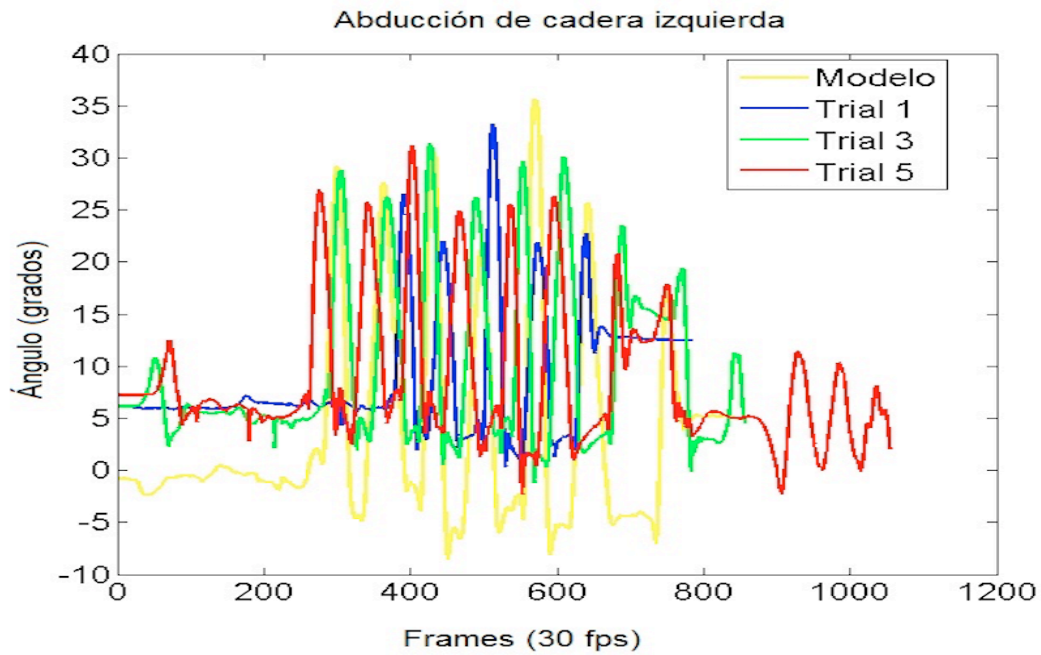


Fig.9. Gráfico representa la señal del desempeño motor del modelo versus la de un sujeto para el trial 1, 3 y 5, durante la ejecución de la tarea específicamente traduce los movimientos de abducción de cadera izquierda.

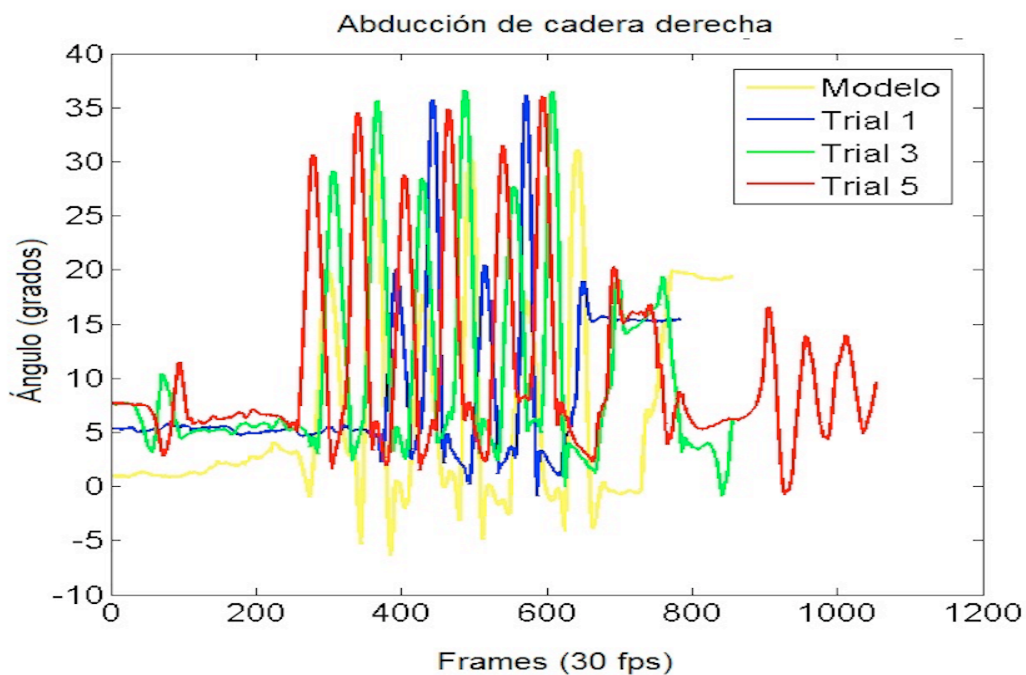


Fig.10. Gráfico representa la señal del desempeño motor del modelo versus la de un sujeto para el trial 1, 3 y 5, durante la ejecución de la tarea específicamente traduce los movimientos de abducción de cadera derecha.

Los gráficos representados en la figura 11, muestran que en promedio los sujetos presentan una progresión en los valores de rendimiento motor desde el primer al quinto trial, con una diferencia estadísticamente significativa para los movimientos de abducción de hombro izquierdo entre el primer y cuarto trial ($p=0.017$), y primer y quinto trial ($p=0.004$). En tanto para la abducción de hombro derecho se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre el primer y tercer trial ($p=0.021$), primer y cuarto trial ($p=0.027$), y primer y quinto trial ($p=0.002$). Por otra parte para el sensor de abducción de cadera izquierda sólo hay diferencia estadísticamente significativa entre el primer y quinto trial ($p=0.014$), y para el sensor de cadera derecha hay diferencia estadísticamente significativa entre el primer y cuarto trial ($p=0.049$), y para el primer y quinto trial ($p=0.006$). La progresión observada es indicativa de aprendizaje motor y va en línea con los hallazgos descritos previamente en cuanto a la distribución espacial de la conducta ocular de los sujetos de estudio, donde los movimientos oculares se concentran fundamentalmente en cara, tronco y extremidades superiores, lo que favorece una mayor extracción de información sensorial de los movimientos observados en esos segmentos corporales durante la tarea y por lo tanto la aparición de aprendizaje motor más tempranamente en los sensores de extremidades superiores.

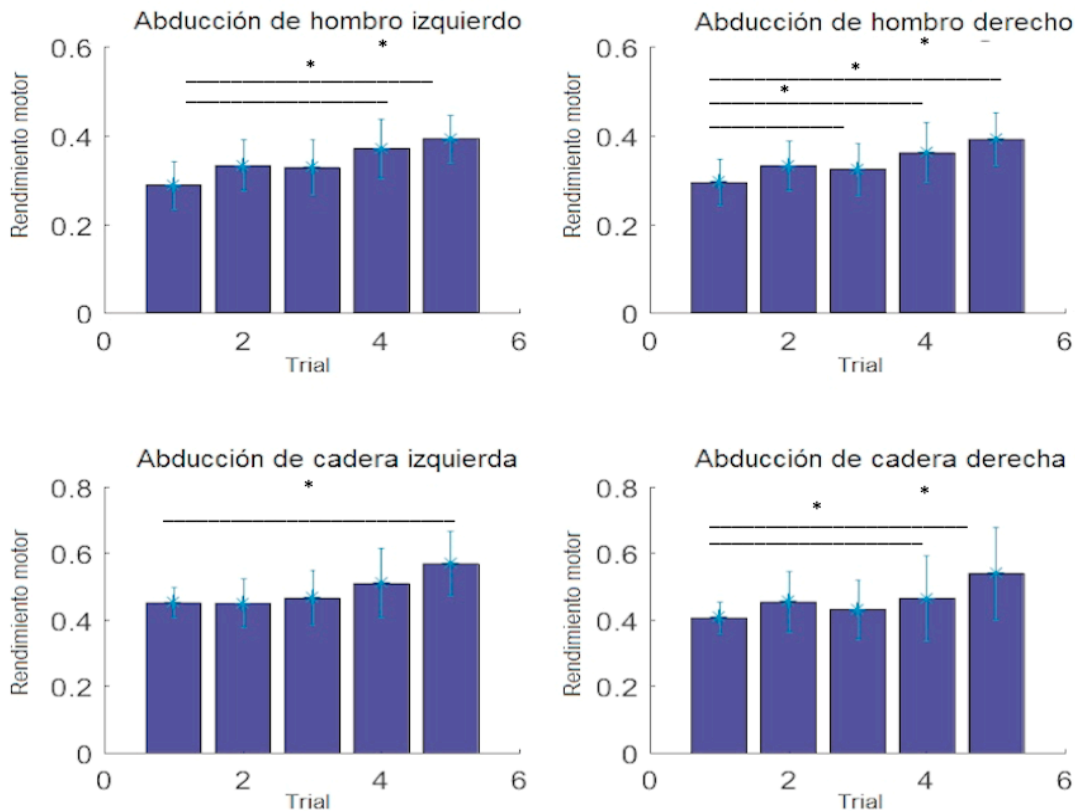


Fig.11. Los gráficos representan el rendimiento motor promedio de los sujetos, para cada trial y movimiento realizado durante la tarea. Las barras de error representan el error estándar.

En la figura 12, se grafican los histogramas de rendimiento motor de los sujetos para cada uno de los movimientos estudiados. Se aprecia en los histogramas de rendimiento motor para movimientos de extremidades superiores menor cantidad de sujetos que presentan rendimientos motores promedio durante la tarea superiores a 0.5, en comparación con los histogramas que representan los movimientos de extremidades inferiores, es importante mencionar que los grados de movimiento para la abducción de cadera son menores en comparación con la articulación de hombro. Sin embargo, es la progresión con tendencia a una mejoría significativa desde el punto de vista estadístico del rendimiento motor a lo largo de la tarea, lo que define un aprendizaje motor más temprano para la abducción de hombro derecho e izquierdo.

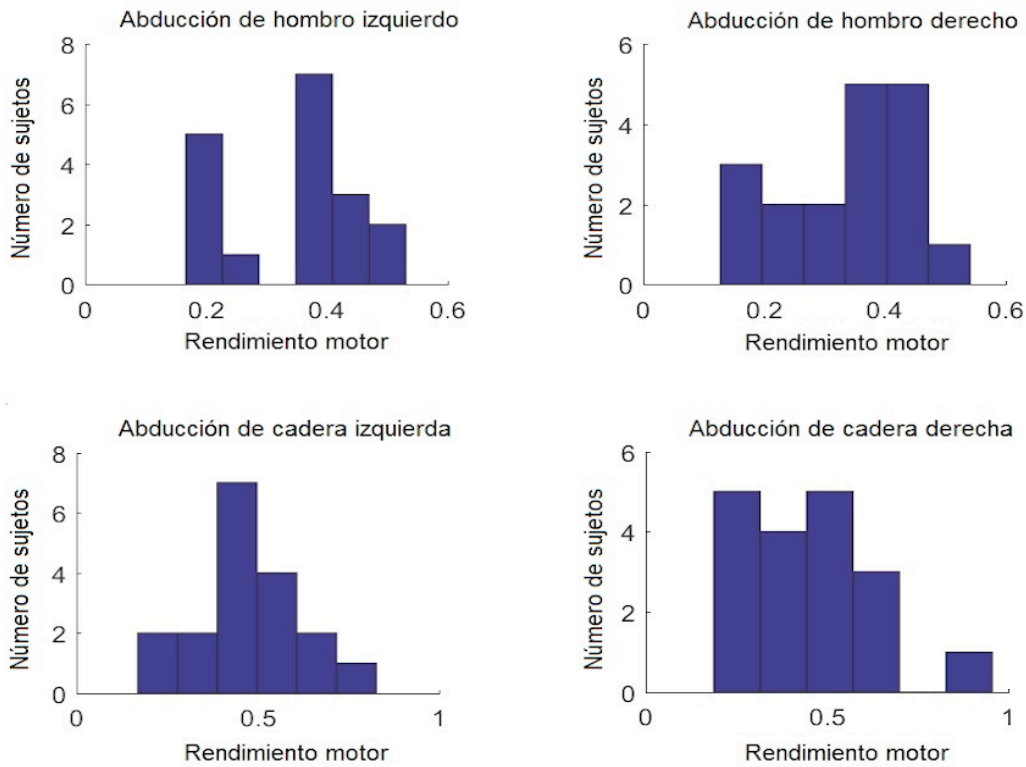


Fig.12. Las figuras corresponden a histogramas de rendimiento motor para todos los sujetos, en promedio para los 5 trials y para cada movimiento realizado durante la tarea.

7.3.- Correlación entre movimientos oculares y desempeño motor

En la figura 13, se grafica la correlación entre el rendimiento motor promedio de los sujetos durante la ejecución de la tarea y la duración de las fijaciones en el transcurso de la misma, donde se obtiene una relación directa entre ambas variables dado un coeficiente de correlación de 0.99.

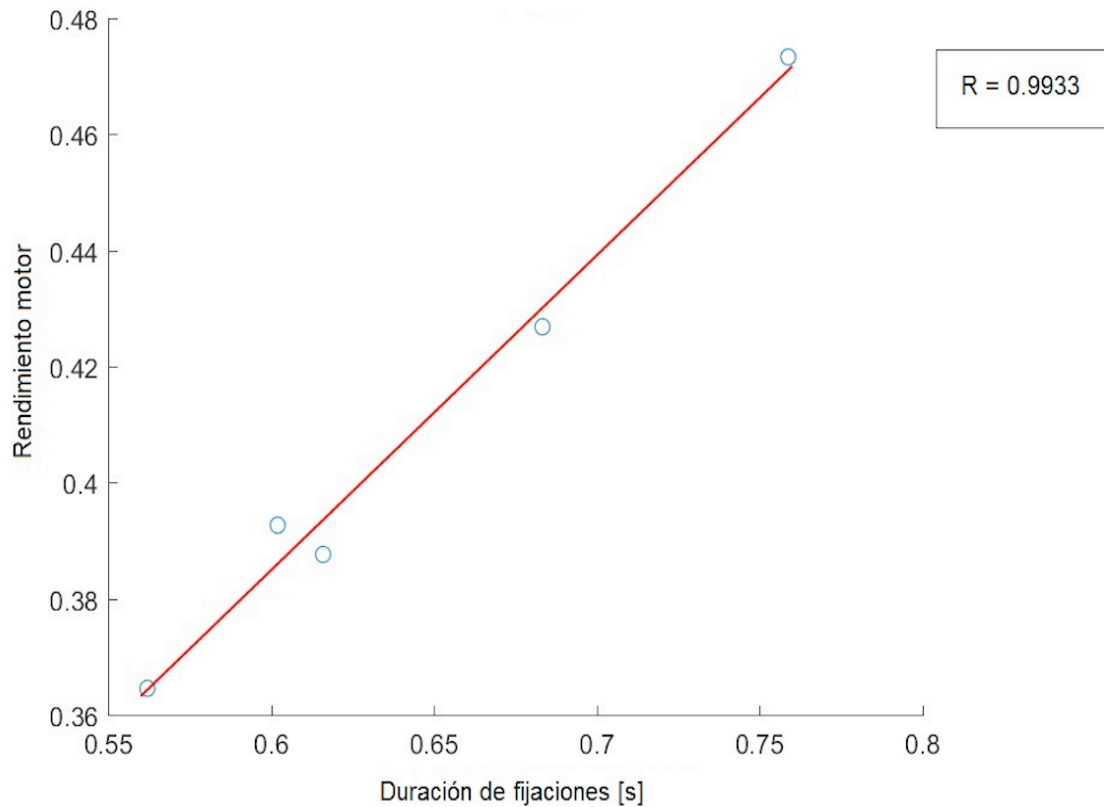


Fig.13. El gráfico muestra en el eje de las Y, el rendimiento motor promedio de todos los sujetos para cada trial, y en el eje de las X, la duración de las fijaciones durante la tarea. Se observa una relación lineal entre ambas variables.

Finalmente, en la figura 14, se grafica la correlación entre el rendimiento motor promedio de los sujetos para cada trial durante la ejecución de los 4 movimientos analizados, y la distancia entre el área de interés implicada durante este movimiento y la posición del ojo, se observa que entre mejor sea el rendimiento del sujeto, esta distancia aumenta en forma directa dado un coeficiente de correlación de 0.95 para la abducción de hombro izquierdo, y 0.87 para la abducción de hombro derecho, lo que podría interpretarse como una menor necesidad de extracción de información sensorial cuando el aprendizaje de la tarea motora ya ha sido consolidado.

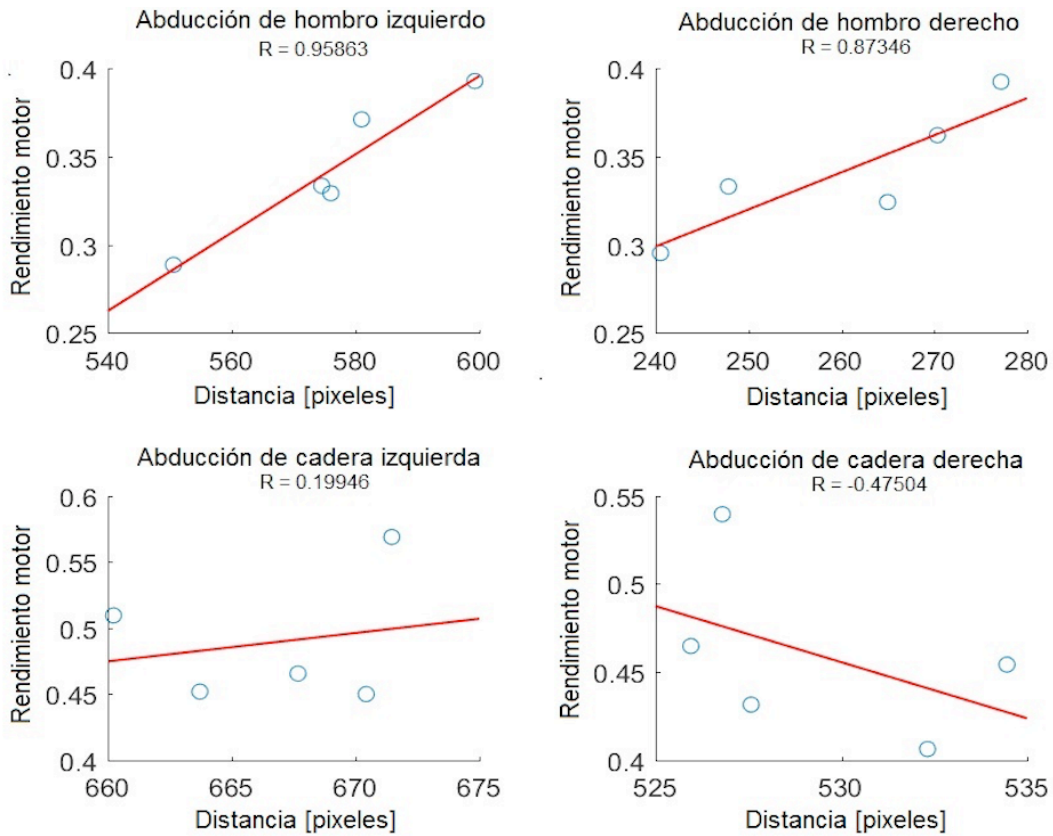


Fig.14. El gráfico muestra en el eje de las Y, el rendimiento motor promedio de los sujetos para cada trial, y en el eje de las X, la distancia entre el área de interés y la posición del ojo. Se observa una relación lineal entre ambas variables para los movimientos de abducción de hombro derecho e izquierdo.

8.- DISCUSIÓN

El presente estudio aborda la búsqueda de una correlación entre el patrón de movimientos oculares ejecutados por un grupo de sujetos y el rendimiento durante una tarea de imitación motora. Para esto se registraron los movimientos oculares e información cinemática de 4 articulaciones implicadas en la tarea ejecutada por un modelo y replicada por 18 sujetos estudiados.

En primera instancia y referente a los datos obtenidos para conducta ocular, parece interesante mencionar, que mientras el número de fijaciones presenta una disminución estadísticamente significativa entre el primer y el quinto trial, la duración de las fijaciones aumenta, alcanzando significancia estadística entre el primer y tercer trial de la tarea. Aún así, la mayor duración de las fijaciones oculares obtenidas en nuestro estudio que podría estar enmascarando la contribución de los movimientos de seguimiento lento en los valores obtenidos, y que en estudios previos se han visto implicados en un mejor desempeño en tareas de imitación (Mataric et al, 1998), esta arista podría profundizarse en futuros estudios al respecto.

También se analizaron componentes espaciales de la conducta ocular, observándose una diferencia estadísticamente significativa en el número de frames durante la tarea donde hay coincidencia entre la posición ocular y el área de interés, a favor de los movimientos de extremidades superiores versus extremidades inferiores. De todas maneras al analizar el comportamiento por separado de los 4 movimientos involucrados en la tarea, el número de frames donde ocurre dicha coincidencia aumenta en los 4 sensores, a medida que se avanza en los trials.

Por otra parte, al analizar los casos donde no hay coincidencia entre área de interés y posición ocular y medir la distancia entre ambas, se constata una diferencia significativa con una menor distancia para los sensores de extremidades superiores, que a su vez presentan una progresión a lo largo de la tarea, lo que relacionado con la información obtenida de rendimiento motor, se explicaría por un aprendizaje motor más temprano para los movimientos de extremidades superiores, y por lo tanto, una menor necesidad de extracción de información sensorial en las áreas de interés involucradas.

Los datos fueron analizados para ciertas áreas de interés, que corresponden a los segmentos distales de las extremidades implicadas en un movimiento específico de la tarea, que según estudios previos presentan preferencia en su visualización durante tareas de imitación (Mataric et al, 1998), sin embargo estos estudios están diseñados con

observación sólo del segmento implicado en el movimiento a imitar y pudiesen, por lo tanto, tener alcances limitados en nuestro estudio en cuanto a los criterios de selección para dichas áreas de interés, donde la observación es sobre el modelo completo y hay una mayor variabilidad y complejidad de la tarea desde el punto de vista motor. Sería por lo tanto interesante, realizar posteriormente el análisis a un mayor número de áreas de interés y estudiar si hay una relación en los parámetros temporales y espaciales que exhiben los movimientos oculares sobre ellas y el rendimiento motor del sujeto.

Así mismo, se descartaron del presente estudio datos relacionados a movimientos oculares sacádicos por limitaciones técnicas del instrumento de registro, EyeTracker con una tasa de muestreo de 30 Hz, y la dificultad en la identificación que esto implica. Por lo que una futura investigación, podría dedicarse a estudiar parámetros como número, duración y velocidad de las sacadas, y su relación con el desempeño motor en una tarea de imitación motora.

Por otra parte y en cuanto a los datos obtenidos en rendimiento motor, observamos en la comparación de señales de los sujetos estudiados versus el modelo, la aparición de una conducta anticipatoria a medida que transcurren los trials de la tarea, además de una mayor coincidencia en la amplitud de la señal mucho más evidente durante la ejecución de los movimientos de las extremidades superiores.

Al mismo tiempo se observa una mejoría estadísticamente significativa del rendimiento motor para los 4 movimientos involucrados en la tarea, sin embargo el aprendizaje motor aparece más tempranamente en los movimientos de abducción de hombros, lo que se correlaciona con la información obtenida acerca de los parámetros espaciales de la conducta ocular durante la tarea.

Se establece finalmente una relación directa entre el rendimiento motor y la duración de las fijaciones durante toda la tarea, y por otra parte, el rendimiento motor y la distancia en píxeles entre el área de interés y la posición del ojo, específicamente en los movimientos de abducción de hombro derecho e izquierdo, esta última observación se justifica en un menor necesidad de extracción de información sensorial cuando el aprendizaje motor se ha consolidado.

Finalmente resulta interesante incorporar al análisis otras métricas asociadas a los movimientos oculares, por ejemplo, el estudio de la secuencia principal sacádica, lo que además estaría aportando información acerca del procesamiento a nivel cognitivo de la información visual (Luigi Di Stasi et al, 2011).

9.- CONCLUSIÓN

Lo primero que se constata es una progresión entre el primer y quinto trial de la tarea, del rendimiento motor resultante del análisis de correlación entre el modelo y la muestra estudiada, este aumento es estadísticamente significativo para todos los movimientos involucrados en la tarea, sin embargo aparece más tempranamente en los sensores de extremidades superiores, lo que coincide con la información preliminar obtenida del mapa de calor, y del posterior análisis de parámetros temporales y espaciales de la conducta ocular. Esta mejoría del desempeño representa aprendizaje motor de la tarea.

Por otra parte, en cuanto a la distribución espacial de la mirada durante la observación de la tarea, encontramos que hay una diferencia estadísticamente significativa en el número de frames donde la posición del ojo coincide con el área de interés del movimiento ejecutado, mayor en la abducción de hombro derecho e izquierdo, en comparación con la abducción de cadera derecha e izquierda, lo que refuerza los datos preliminares. Al mismo tiempo, cuando no hay coincidencia entre estos dos parámetros la distancia de separación en píxeles es significativamente menor para los movimientos de extremidades superiores, en estos sensores además muestra una progresión a lo largo de la tarea lo que se correlaciona con la aparición de aprendizaje motor más tempranamente. Se comprueba, además una correlación entre una mejoría en el rendimiento de los sujetos durante la tarea y un aumento en la duración de las fijaciones por una parte, y de la distancia entre el área de interés y la posición del ojo, que interpretamos como adaptación en las estrategias de extracción de información sensorial, a medida que se consolida el aprendizaje motor.

En suma, los resultados apoyan la hipótesis propuesta. Efectivamente los datos aportados por nuestro estudio, indican que ciertos movimientos oculares caracterizados por propiedades temporales y espaciales específicas, se correlacionan con un mejor rendimiento motor, pero creemos que sería de utilidad continuar la investigación a partir de la información aportada, e incorporando en el análisis distintos movimientos oculares y métricas que los caractericen, y su relación con el desempeño motor de los sujetos.

10.- BIBLIOGRAFÍA

- Bien N, Roebroek A, Goebel R, Sack AT. The brain's intention to imitate: The neurobiology of intentional versus automatic imitation. *Cereb Cortex*. 2009; 19: 2338–2351.
- Brass M, Bekkering H, Wohlschläger A, Prinz W. Compatibility between observed and executed finger movements: Comparing symbolic, spatial, and imitative cues. *Brain Cogn*. 2000; 44: 124–143.
- Bunlon F., Marshall P., Quandt L., Bouquet C.. Influence of action-effect associations acquired by ideomotor learning on imitation. *Plos one*. 2015.
- Crapse, T. B., & Sommer, M. a. Corollary discharge across the animal kingdom. *Nature Reviews. Neuroscience*. 2008; 9(8), 587–600.
- Dautenhahn K, Nehaniv CL. *Imitation in Animals and Artifacts*, MIT Press. 2002.
- Decety J, Grèzes J. Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends Cogn Sci*. 1999; 3: 172–178.
- Di Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G. Understanding motor events: a neurophysiological study. *Exp Brain Res*. 1992; 91: 176–180.
- Elsner B, Hommel B. Effect anticipation and action control. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 2001; 27: 229–240.
- Elsner B. Infants' imitation of goal-directed actions: the role of movements and action effects. *Acta Psy- chol*. 2007; 124: 44–59.
- Ferri S., Peeters R., Nelissen K., Vanduffel K., Rizzolatti G., Orban G.A. A human homologue of monkey F5c. *NeuroImage*. 2015; 111:251-266.
- Fogassi, L., Ferrari, P.F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F., Rizzolatti, G., 2005. Parietal lobe: from action organization to intention understanding. *Science* 308, 662–667.

- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., Rizzolatti, G., 1996. Action recognition in the premotor cortex. *Brain* 119 (pt 2), 593–609.
- Herwig A, Waszak F. Intention and Attention in Ideomotor Learning. *Q J Exp Psychol.* 2009; 62: 219–227.
- Johansson, R. S., Westling, G., Bäckström, a, & Flanagan, J. R. (2001). Eye-hand coordination in object manipulation. *The Journal of Neuroscience*, 21(17), 6917–32.
- Karatekin, C. (2007). Eye-tracking studies of normative and atypical development. *Developmental Review*, 27, 283–348.
- Kolling T., Óturai G., Knopf M.. Is selective attention the basis for selective imitation in infants? An eye-tracking study of deferred imitation with 12-month-olds. *Journal of Experimental Child Psychology* 124 (2014) 18–35.
- Komogortsev, O. V, & Karpov, A. (2013). Automated classification and scoring of smooth pursuit eye movements in the presence of fixations and saccades. *Behavior Research Methods*, 45(1), 203–15.
- Luigi Di Stasi L., Antolí A., Cañas J. Main Sequence: An index for detecting mental workload variation in complex tasks. *Applied Ergonomics.* 2011; 42: 807-813.
- Mataric J. M., Pomplun M. Fixation behavior in observation and imitation of human movement. *Cognitive Brain Research.* 1998; 8: 191-202.
- Meltzoff AN. Imitation and Other Minds: The 'Like Me' Hypothesis. In: Hurley S, Chater N, editors. *Perspectives on Imitation: From neuroscience to Social Science: Vol. 2: Imitation, human development, and culture.* Cambridge (Massachusetts): MIT Press. 2005; 55–77.
- Paulus M, Hunnius S, Vissers M, Bekkering H. Bridging the gap between the other and me: The functional role of motor resonance and action effects in

infants' imitation. *Dev Sci.* 2011; 14: 901–910.

- Paulus M. The ideomotor approach to imitative learning (IMAIL) in infancy: Challenges and future perspectives. *Eur J Dev Psychol.* 2014; 11: 662–673.
- Prinz W. An ideomotor approach to imitation. In: Hurley S, Chater N, editors. *Perspectives on Imitation: From Neuroscience to Social Science.* Cambridge (Massachusetts): MIT Press. 2005; 141–156.
- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 71–78.
- Terao, Y., Andersson, N. E. M., Flanagan, J. R., & Johansson, R. S. (2002). Engagement of Gaze in Capturing Targets for Future Sequential Manual Actions. *Journal of Neurophysiology*, 88, 1716–1725.
- Waszak F, Herwig A. Effect anticipation modulates deviance processing in the brain. *Brain Res.* 2007; 1183: 74–82.