

[dx.doi.org/10.17488/RMIB.38.1.30](https://doi.org/10.17488/RMIB.38.1.30)

Segmentación automática del movimiento en la valoración funcional del miembro superior en niños con parálisis cerebral

Automatic movement segmentation in the upper limb functional assessment of children with cerebral palsy

Anaya-Campos L.E.¹, Quijano-González Y.¹, Quiñones-Urióstegui I.¹, Alessi-Montero A.¹, Bueyes-Roiz V.¹, Chong-Quero J.E.²

¹Laboratorio de Análisis de Movimiento, Instituto Nacional de Rehabilitación.

²Departamento de Mecatrónica, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Estado de México.

RESUMEN

La Parálisis Cerebral (PC) es un grupo de trastornos pre, post y perinatales permanentes del desarrollo, movimiento y postura debidos a alteraciones no progresivas ocurridas durante el desarrollo cerebral, producto de lesiones del Sistema Nervioso Central. Debido a la importancia del uso del miembro superior en las actividades de la vida diaria, es importante considerar formas eficientes de medir el desempeño motor de este miembro en los pacientes con PC. Una forma de obtener la evaluación del miembro torácico es grabando movimientos definidos y calculando la suavidad de los mismos, utilizando un tablero seleccionador de figuras instrumentado. Nuestro objetivo es desarrollar un protocolo de valoración para el miembro superior, que a su vez sea objetivo, eficiente y que otorgue una medición cuantitativa del grado de afectación motora de los niños con PC en un entorno clínico.

PALABRAS CLAVE: Parálisis cerebral, suavidad de movimiento, hemiparesia espástica.

ABSTRACT

Cerebral Palsy (CP) is a group of permanent pre, post and perinatal disorders of the motor and posture development due to non-progressive alterations in brain's natural development caused by injuries in the Central Nervous System. Due to the importance of the daily use of the upper limb members, it's important to consider more efficient ways to evaluate the performance in patients diagnosed with CP. One way to obtain an evaluation of the performance of the thoracic member is recording defined movements and calculating the smoothness, using an instrumented sorting block box. Our objective is to create a protocol of valuation for the upper member that is objective, efficient and that gives a quantitative feedback of the grade of the motor affectation of child with PC in a clinical environment.

KEYWORDS: Cerebral palsy, movement smoothness, spastic hemiparesis.

Correspondencia

DESTINATARIO: Leonardo Eliu Anaya Campos
INSTITUCIÓN: Laboratorio de Análisis de Movimiento,
Instituto Nacional de Rehabilitación
DIRECCIÓN: Czda. México-Xochimilco #289, Arenal
Tepepan, C.P. 14389, Ciudad de México, CDMX, México
CORREO ELECTRÓNICO: leo.anayac@yahoo.com

Fecha de recepción:

15 de octubre de 2016

Fecha de aceptación:

23 de diciembre de 2016

INTRODUCCIÓN

En estudios previos realizados sobre la valoración funcional del miembro superior de niños con parálisis cerebral (PC) con el dispositivo *Sorting Block Box* (SBB), se ha logrado cuantificar significativamente las diferencias en el grado de afección y control motor en sujetos sanos y con PC [1-4]. Este documento presenta la propuesta y resultados obtenidos al implementar un método de segmentación automática de tareas (los movimientos específicos de dicho experimento) para obtener un análisis de resultados más puntual y poder determinar con mayor sensibilidad el grado de afectación de cada individuo.

El SBB [5] consta de un tablero instrumentado con sensores de fuerza y presencia que detecta cuando 4 piezas de madera (cuadrado, triángulo, rectángulo, círculo) son introducidas en sus respectivos huecos, como se muestra en la Figura 1.



FIGURA 1. Tablero del *Sorting Block Box*.

Se utiliza un sensor inercial o IMU, por sus siglas en inglés (Shimmer 3®), colocado sobre una muñequera elástica, para obtener simultáneamente la velocidad angular y aceleración de la muñeca y mano del sujeto que se encuentra realizando el protocolo experimental. Los sujetos tienen que introducir las piezas al tablero tres veces por cada lado y posteriormente regresarlas a su lugar de origen.

Una vez capturados los datos, se procesan en una interfaz gráfica para obtener así la suavidad del movimiento del miembro superior utilizando 3 diferentes métricas [6]. En estudios previos, se ha demostrado su funcionamiento y aporte en la determinación de la capacidad funcional del miembro torácico [8-9].

También, se ha analizado el desempeño del tablero midiendo el tiempo en completar cada actividad de llenado/vaciado de piezas [5, 7-8], así como el control motor que tienen los sujetos para realizar los movimientos, utilizando diferentes métricas de suavidad de movimiento. Se ha observado que el análisis de suavidad de las señales es suficientemente sensible para distinguir impedimentos motores. Se comprobó que se logra tener diferencias entre niños con PC y sin historial clínico de afectaciones neuromotoras.

Se han elegido tres métricas de suavidad de movimiento como la base del análisis de los datos capturados en los protocolos experimentales. A continuación, se abordan brevemente.

SALM

La métrica de longitud de arco espectral (*Spectral Arc Length Metric*) [6] se define como la longitud de la curva del espectro de Fourier del perfil de rapidez de un movimiento (Ecuaciones 1 y 2):

$$\eta_{sal} \triangleq - \int_0^{\omega_c} \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_c}\right)^2 + \left(\frac{d\hat{V}(\omega)}{d\omega}\right)^2} d\omega \quad (1)$$

$$\hat{V}(\omega) \triangleq \frac{V(\omega)}{V(0)} \quad (2)$$

Donde $\omega_c = 20 \text{ Hz}$, es la banda de frecuencias que abarca los movimientos humanos normales y anormales [9].

PM

La métrica de picos (*Peaks Metric*), cuantifica el número (expresado por el símbolo # en la Ecuación 3) de máximos locales en el perfil de velocidad de un movimiento [9]:

$$\eta_{pm} \triangleq -\#\{v_{maxima}\} \quad (3)$$

$$v_{maxima} \triangleq \left\{ v(t): \frac{dv}{dt} = 0, y, \frac{d^2v}{dt^2} < 0 \right\} \quad (4)$$

LDJM

La métrica *Jerk* logarítmico adimensional (*Log Dimensionless Jerk Metric*), se define como el logaritmo negativo de la tercera derivada de la posición respecto al tiempo (*Jerk*) normalizada [9] (Ecuación 5 y 6):

$$\eta_{ldj} \triangleq -\ln \left(\frac{(t_2 - t_1)^3}{v_{peak}^2} \int_{t_1}^{t_2} \left| \frac{d^2v}{dt^2} \right|^2 dt \right) \quad (5)$$

$$v_{peak}^2 \triangleq \max_{t \in [t_1, t_2]} v(t) \quad (6)$$

Cada una de estas métricas fue implementada en un programa de MATLAB basado en [5]. El programa incluye modificaciones en la interfaz gráfica y un método de segmentación automático que detecta cada fase de los movimientos de llenado y vaciado de piezas.

Previamente [5,7], fueron consideradas 4 actividades base denominadas *tasks* (llenado y vaciado de piezas, utilizando cada brazo), para determinar la afectación del miembro superior de cada niño. Sin embargo, este método pondera las calificaciones (resultado de las métricas de suavidad) obtenidas al llenar/vaciar el tablero con las 4 piezas. Este método omite información del control motor de cada sujeto al intentar colocar/regresar las piezas de madera a sus lugares corres-

pondientes, a que no se tiene el análisis individual de cada una de ellas.

La Figura 2 nos muestra el proceso utilizado previamente para cuantificar los movimientos. Se promedian los resultados de todas las piezas y se divide en el vaciado o llenado del tablero. Para el llenado, se completan los pasos 1-2-3 (todas las piezas), y para el vaciado, se sigue el orden 3-2-1 (todas las piezas).

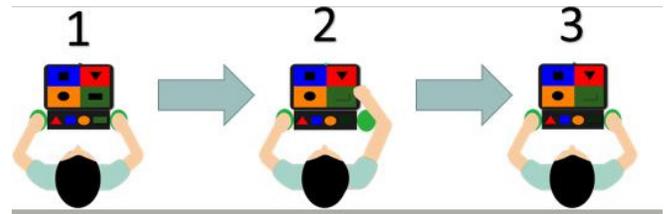


FIGURA 2. Fases de las tareas experimentales reportadas previamente utilizando el SBB.

De esta forma, el vaciado y llenado del tablero se contabilizaban como un intento. Se completaban tres intentos por cada lado y se promediaban los resultados, para su posterior análisis. La Figura 3 muestra un diagrama a bloques del procedimiento de obtención y procesamiento de datos, utilizando LabVIEW (National Instruments, 2014) para la adquisición de datos de los sensores inerciales y del SBB, así como MATLAB para su procesamiento.

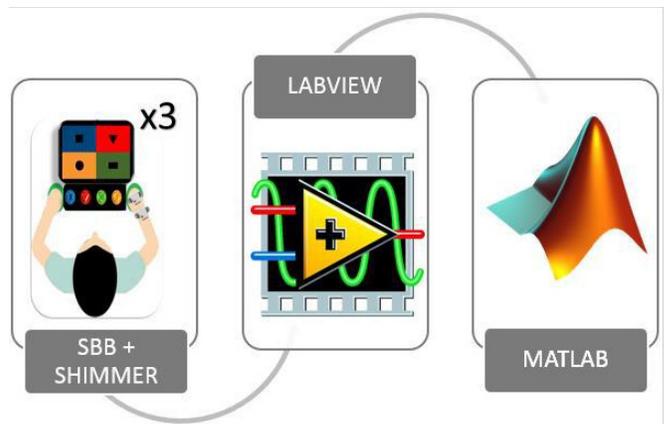


FIGURA 3. Diagrama de obtención y procesamiento de datos experimentales.

METODOLOGÍA

Para entender la naturaleza del análisis de este estudio es importante delimitar cada movimiento que se realizará y se comparará entre los sujetos de estudio, para así lograr un resultado más exacto (al no omitir la información puntual en el manejo de cada pieza). La diferencia entre esta propuesta y el análisis previo, es el post-procesamiento de los datos, al incluir más sub-fases del movimiento estudiado.

El experimento consta de dos parámetros, que son el llenado y vaciado de piezas del tablero, que, a su vez, se replican por cada una de las cuatro piezas (Figura 4). Como propuesta de análisis, se realizó la segmentación automática de cada una de estas tareas primarias. Para lograrlo, se utilizaron los datos obtenidos del SBB (botones de posición inicial y sensores de posición de piezas). Cuando se detecta que la mano de un sujeto se ha separado del tablero, comienza una sub-tarea (*subs*) de llenado o vaciado. Para determinar esto, se detecta el orden con el que se presionan o liberan los sensores de posición de cada pieza. La Figura 4 muestra las diferencias metodológicas entre el método previo (usando *tasks*) y el propuesto (separando con *subtasks*).



FIGURA 4. Tasks (izquierda) y Subtasks (derecha). El método propuesto resulta de la segmentación automática de movimientos utilizando los sensores del SBB.

Los *subtasks* obtenidos con el método propuesto fueron agrupados en pares según el color y la geometría de la pieza. Dichos sub-movimientos pueden ser de dos tipos:

- › Colocación de pieza en tablero.
- › Regreso de la mano a la posición inicial.

La Figura 5 muestra el procedimiento experimental que siguen los sujetos para completar las tareas de llenado o vaciado de piezas. Utilizando los datos obtenidos con los botones y sensores del tablero, se determina el segmento (izquierdo/derecho, llenado/vaciado) de cada uno de los sub-movimientos.

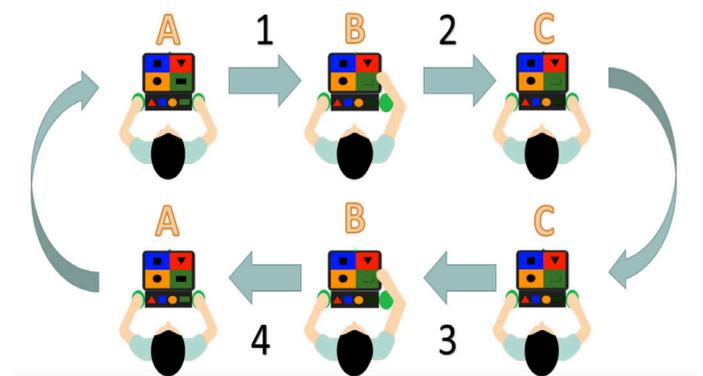


FIGURA 5. Fases del protocolo experimental de valoración funcional del miembro superior, usando el SBB.

A continuación, se describe el protocolo mostrado en la Figura 5. La figura 5 ilustra el software diseñado.

a) El sujeto tiene sus manos colocados en los botones verdes a los costados del SBB. En el momento en que el botón cambia de 1 (siendo presionado) a 0 (no siendo presionado) inicia la partición de datos para ese sub-movimiento.

b) El paciente debe tomar la pieza correspondiente al orden de la mano que se está utilizando y colocarla en el hueco correspondiente. En el momento en que el

sensor cambia de 0 a 1 (0 estado en reposo y 1 la pieza presionando el sensor) se registra el final de ese sub-movimiento.

c) El sujeto, después de haber colocado la pieza, debe regresar a presionar el botón verde para dar como concluido el sub-movimiento de regreso a la posición inicial.

Con esta propuesta, al procesar los datos y segmentarlos de manera automática, se cuenta con 16 sub-movimientos: 8 de colocación (llenado) de la pieza y 8 de regreso (detectado al presionar el botón verde) considerando ambos brazos. Estos sub-movimientos son explicados a detalle en la Tabla 1.

TABLA 1. Submovimientos por pieza y tarea.

SUBMOVIMIENTOS			
L L E N A D O	ST I	COLOCACIÓN	NARANJA
	ST II	BOTÓN	
	ST III	COLOCACIÓN	VERDE
	ST IV	BOTÓN	
	ST V	COLOCACIÓN	ROJO
	ST VI	BOTÓN	
	ST VII	COLOCACIÓN	AZUL
	ST VIII	BOTÓN	
V A C I A D O	ST IX	COLOCACIÓN	AZUL
	ST X	BOTÓN	
	ST XI	COLOCACIÓN	ROJO
	ST XII	BOTÓN	
	ST XIII	COLOCACIÓN	VERDE
	ST XIV	BOTÓN	
	ST XV	COLOCACIÓN	NARANJA
	ST XVI	BOTÓN	

29 niños, entre 3 y 14 años participaron en el estudio. Se incluyó a 16 niños con hemiparesia espástica y 13 niños sanos, bajo consentimiento informado firmado por el padre o tutor. Dicho consentimiento informado fue otorgado al padre/tutor, por un médico residente del Departamento de Rehabilitación Pediátrica del Instituto Nacional de Rehabilitación, bajo previa revisión y autorización del Comité de Ética del Instituto.

La Tabla 2 muestra a los sujetos de prueba con sus respectivos años de vida, género, talla, peso, grupo al que pertenece y diagnóstico clínico.

TABLA 2. Lista de sujetos de prueba.

Sujeto	Fecha Nac.	Edad	Talla	Peso	Género	Grupo
SBB-00-01	07/06/2004	11	145	44	F	Control
SBB-00-02	29/05/2008	7	129	20.5	M	PC
SBB-00-03	28/02/2010	5	106.5	16	M	PC
SBB-00-04	02/01/2008	7	129	25	F	Control
SBB-01-05	24/06/2003	10	127	25.1	F	Control
SBB-01-06	10/11/2000	14	159	50	F	Control
SBB-01-07	24/08/2010	4	107	17	M	Control
SBB-01-08	17/01/2003	12	159	45.5	F	Control
SBB-01-09	14/08/2007	8	135	32	F	Control
SBB-01-10	12/02/2008	7	129	25	F	Control
SBB-01-11	10/09/2005	9	149	47.4	M	Control
SBB-01-12	23/07/2002	13	164	70	F	Control
SBB-01-13	10/05/2005	10	141	48	M	Control
SBB-01-14	06/03/2009	6	121	23	M	Control
SBB-01-15	23/06/2011	4	103	19	F	Control
SBB-01-16	21/06/2005	10	141	34	F	Control
SBB-01-17	03/10/2007	7	122.5	24.1	F	Control
SBB-01-18	10/07/2007	8	131	31	F	Control
SBB-01-19	14/11/2004	10	145	30	F	PC
SBB-01-20	29/02/2008	7	120	21	F	PC
SBB-01-21	25/09/2010	5	111	17.5	F	PC
SBB-01-22	26/08/2008	7	117	20.5	M	PC
SBB-01-23	02/02/2008	7	124	21.7	M	PC
SBB-01-24	09/02/2002	13	151	32.7	M	PC
SBB-01-25	16/08/2009	6	112	18.2	F	PC
SBB-01-26	20/08/2011	4	101	14.5	M	PC
SBB-01-27	10/12/2007	8	134	33.5	M	PC
SBB-01-28	19/09/2006	9	138	28	M	PC
SBB-01-29	30/11/2009	6	109	16	F	PC

Las variables de interés fueron:

1.- Medición de niños sanos.

- › Inerciales: aceleración, fuerza.
- › Presencia: sensado de las piezas en el tablero.

2.- Medición de niños con hemiparesia espástica.

- › Inerciales: aceleración, fuerza.
- › Presencia: sensado de las piezas en el tablero.
- › Escalas de valoración clínica: Ashworth Modificado, Tardieu, MACS y BFMF.

SBB: SORTING BLOCK BOX

APELLIDO PATERNO

EDAD

CLAVE

FECHA

APELLIDO MATERNO

FECHA DE NACIMIENTO

DIAGNÓSTICO

LUGAR

NOMBRE (S)

SEXO

MIEMBRO AFECTADO

DE VISITA

CARGAR DATOS MANO IZQUIERDA

CARGAR DATOS MANO DERECHA

MAPEO DE

- PIEZA NARANJA
- PIEZA VERDE
- PIEZA ROJA
- PIEZA AZUL

LLENADO

- SUBTASK I
- SUBTASK II
- SUBTASK III
- SUBTASK IV
- SUBTASK V
- SUBTASK VI

VACIADO

- SUBTASK IX
- SUBTASK X
- SUBTASK XI
- SUBTASK XII
- SUBTASK XIII
- SUBTASK XIV

ANALIZAR MANO IZQUIERDA

ANALIZAR MANO DERECHA

GUARDAR INTENTO IZQ.

CREAR FICHA

GUARDAR INTENTO DER.

FIGURA 6. Interfaz gráfica en MATLAB del programa de segmentación de tareas del SBB.

La segmentación de las tareas se logra mediante un programa desarrollado en MATLAB (Mathworks, 2014), mostrado en la Figura 5. Este *software* realiza el procesamiento de manera automática al introducir los archivos de datos en crudo del sensor inercial y del SBB (generados por el programa elaborado en LabVIEW), dividiéndolo por mano derecha o izquierda.

El programa, además de dar el resultado promediado de los intentos de los lados izquierdo y derecho, permite el análisis individual por intento. También se puede analizar el resultado de cada uno de los *subtasks* y analizar el tiempo dedicado a cada sub-movimiento, como se muestra en las Figuras 6 y 7.

Se puede crear una ficha que permite al médico observar los resultados de los 16 submovimientos promediados y comparar las diferencias entre lados izquierdo y derecho, entre los individuos del grupo de control y los individuos con PC, como se muestra en la Figura 8.

Con esta ficha, se pueden comparar los resultados obtenidos de la segmentación de tareas del movimiento de cada sujeto, contra los rangos obtenidos del grupo de control (promedio \pm desviación estándar), hacer un análisis por pieza, lado o métrica de suavidad.

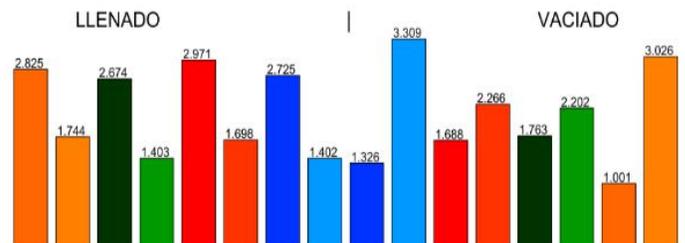


FIGURA 7. Ejemplo de gráfico del tiempo que tardan los sujetos en completar los sub-movimientos. Cada color representa una pieza diferente en el tablero.

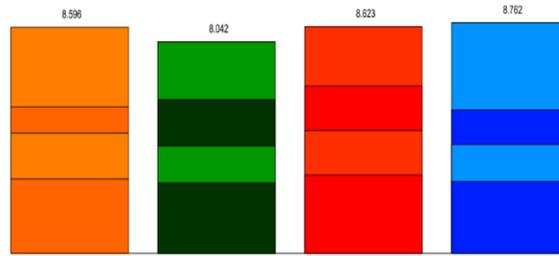


FIGURA 8. Ejemplo de gráfico de tiempos acumulados por pieza. Los tonos oscuros representan los sub-movimientos de llenado/vaciado, y los tonos claros, los de regreso.

SBB: SORTING BLOCK BOX

FICHA DEL PACIENTE

APELLIDO PATERNO:	ANAYA	CLAVE:	SBB-000
APELLIDO MATERNO:	CAMPOS	DIAGNÓSTICO:	SANO
NOMBRE (S):	LEONARDO ELIU	FECHA:	12/09/2016
EDAD:	26	LUGAR:	INR
FECHA DE NAC:	02/06/1990	MIEMBRO DOMINANTE:	NA
SEXO:	M	# DE VISITA:	TEST

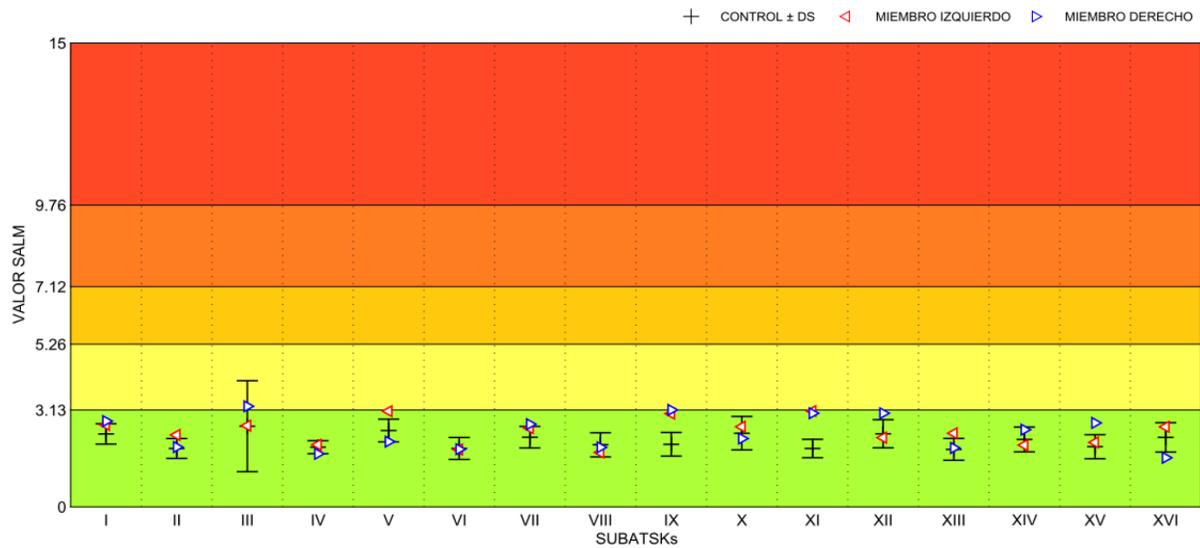


FIGURA 9. Comparativa gráfica de resultados entre sujetos sanos y con PC. Se muestra una simulación de resultados de 16 subtasks, para la métrica SALM.

RESULTADOS

Con las métricas de suavidad (SALM, PM y LDJM) obtenidas del grupo control, se calculó un *rango de normalidad de movimiento* por cada sub-movimiento realizado en la prueba. Estos rangos se definieron por el promedio de cada métrica \pm una desviación estándar. Para los resultados de los niños con PC, se dividieron en dos: miembro afectado y miembro no afectado.

Las Figuras 9-13 muestran ejemplos de los resultados obtenidos, al comparar al grupo de control (rectángulo acotado en gris), con diferentes sujetos del grupo experimental, tanto de su lado no afectado, como de su lado afectado (espástico). En estos gráficos, el rectángulo gris es el *rango de acción normal* para cada métrica (rango de normalidad) y en cada tarea; por su parte, cada punto representa el resultado de un sujeto con PC.

De la Figura 9, se observa que SALM tiene un 42.8% de resultados dentro del rango de suavidad normal, lo mismo para PM (42.8%) y para LDJM un 14%; esto se debe a que las calificaciones de suavidad fueron obtenidas utilizando la metodología previa (sin segmentación de tareas). Este resultado es consistente con estudios de revisión de métricas de suavidad, como el realizado en [6], donde se menciona la necesidad de separar las tareas de movimiento dependiendo de su tipo (ejemplo: flexión y extensión de brazo) para obtener resultados consistentes. En el presente caso, esto se traduce en la mejora de los resultados obtenidos por la métrica SALM y en menor medida PM. Las Figuras 10-13 muestran este cambio de forma gráfica y se aprecia cómo se incluyen más casos en la región de normalidad; fenómeno que no ocurre en la Figura 9, al no considerar la segmentación de tareas.

Con la información recolectada, resulta poco trivial determinar cuál pieza (de las cuatro) es la que da aporta resultados más contundentes en la diferenciación del control motor y/o afectación motora del miembro superior; esto, a su vez, implica que no se puede prescindir de alguna de ellas para reducir el tiempo de duración de las pruebas.

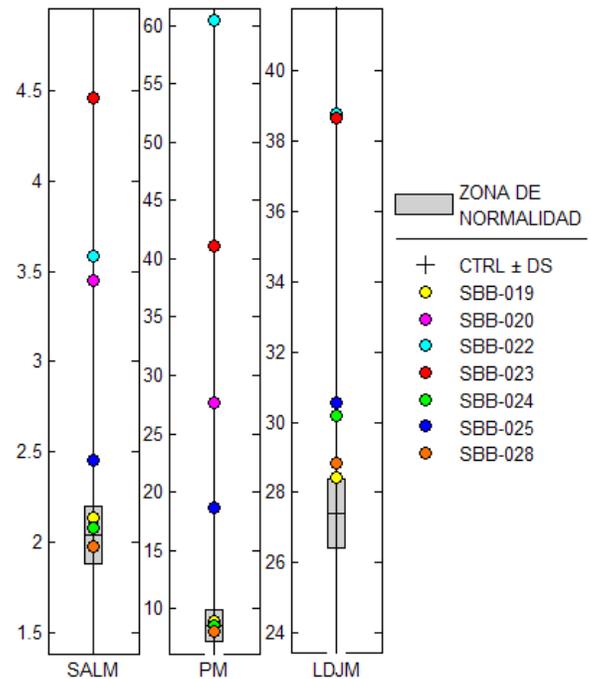


FIGURA 10. ejemplo de comparativa de resultados utilizando la metodología antigua (sin segmentación de tareas).

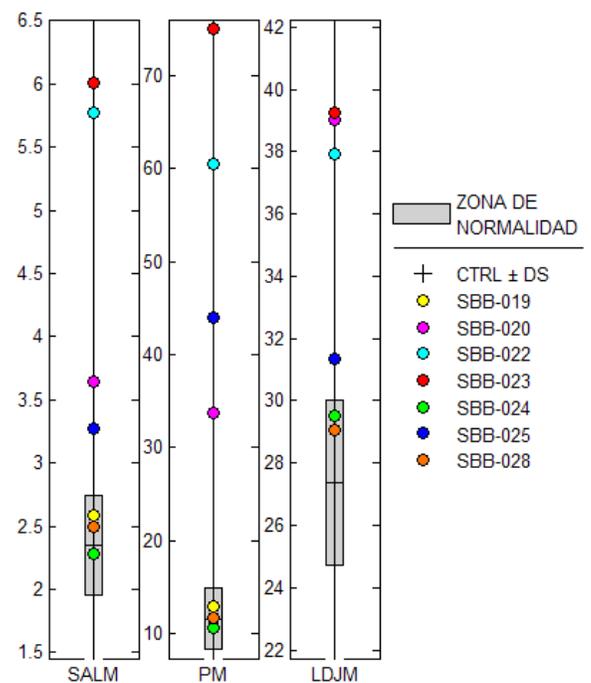


FIGURA 11. Comparativa de resultados al considerar la segmentación de tareas automática: Pieza naranja, al ser colocada por los sujetos con PC.

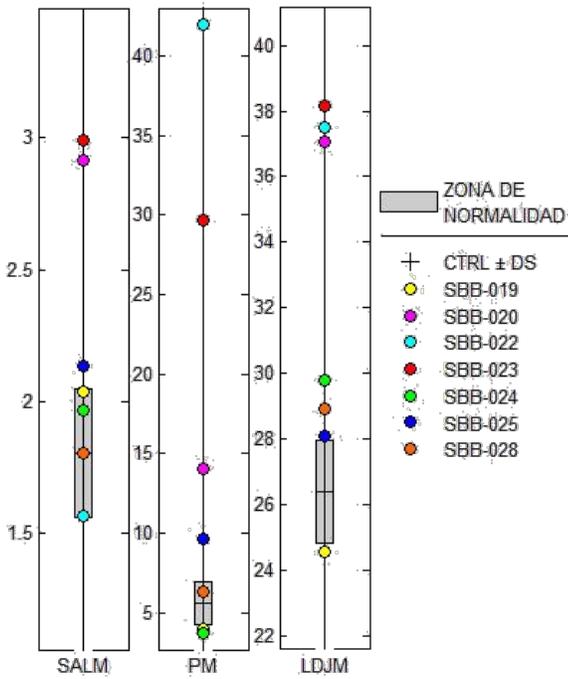


FIGURA 12. Comparativa de resultados al considerar la segmentación de tareas automática: Regreso a la posición inicial, después que los sujetos con PC colocan la pieza.

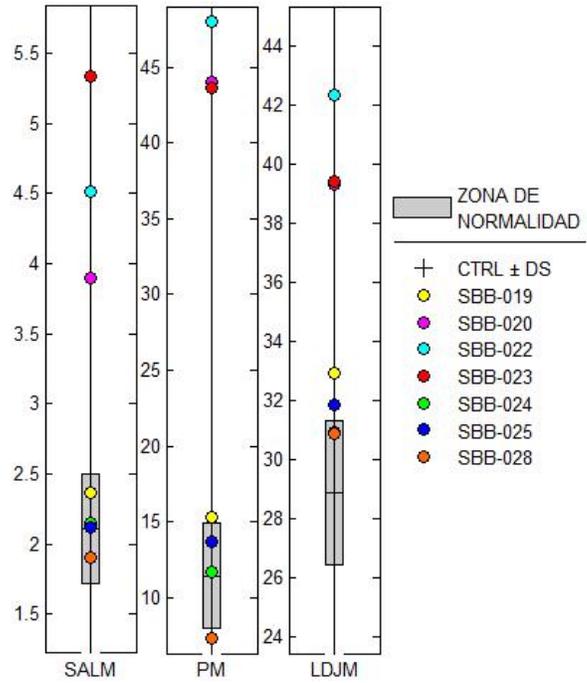


FIGURA 14. Comparativa de resultados al considerar la segmentación de tareas automática: Regreso a la posición inicial, después de regresar la pieza naranja a su contenedor (vaciado de tablero), por los sujetos con PC.

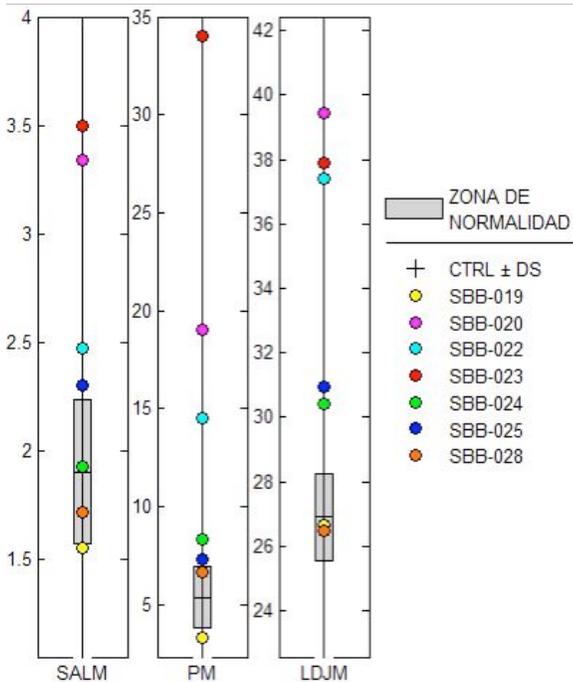


FIGURA 13. Comparativa de resultados al considerar la segmentación de tareas automática: Pieza naranja, al ser regresada a su posición inicial por los sujetos con PC.

Al obtener las métricas de suavidad, para la pieza naranja (ilustrada en las figuras previas), el 50% de los valores se encontraron dentro de un rango de resultados normales, tanto como para la métrica SALM como para la métrica PM (39.62%). En cuanto a la métrica LDJM, se aumentó de un 14.28% de datos dentro del rango normal hasta un 28.7%. Este análisis se realizó para las demás piezas en todos los sujetos del grupo de control y del grupo de PC. La Tabla 3 muestra la cantidad de resultados que se encuentran en el rango de valores considerados como sanos (suavidad normal), para todas las piezas, dividido en tareas del movimiento.

TABLA 3. Porcentajes de calificaciones contenidas en el rango de normalidad para cada métrica analizada.

MÉTRICAS DE SUAVIDAD	SUBTASK			
	I	II	III	IV
SALM	42%	57%	28%	57%
PM	42%	14%	14%	28%
LDJM	42%	0%	28%	28%

Para el lado no afectado del miembro superior, de 576 comparaciones individuales de cada subtask, el 47.22% se encontró dentro de un rango de suavidad normal. Si no se considerara el análisis utilizando la segmentación automática de tareas, el 38.19% de los movimientos estarían dentro de un rango aceptable.

La métrica SALM obtuvo un 64.76% de sub-movimientos en un rango normal, 43.74% para PM y sólo 33.33% para LDJM. En promedio, los casos anormales se encuentran a 0.45 desviaciones estándar alejadas del rango normal. Por otro lado, para el miembro afectado, de las 576 comparaciones individuales de cada subtask, el 67.88% aparece fuera del rango de normalidad establecido para cada acción.

De igual forma, si no se considerara la segmentación automática de tareas, el 78.47% de los sub-movimientos estarían fuera de un rango de suavidad normal. La métrica SALM tiene un 40.63% de casos dentro de este rango, 31.25% de PM y 24.48% de LDJM.

En promedio, los casos anormales se encuentran fuera de rango hasta por 5.31 desviaciones estándar. Los sub-movimientos III, V, XII, XIII, XIV, y XV presentaron un 33% de casos dentro de un rango de normalidad. Para los otros 10 sub-movimientos el promedio anormal fue de 62.5%

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos fueron consistentes con la propuesta mostrada en [6], donde se insiste en segmentar las tareas de un movimiento para poder contrastar la suavidad del movimiento; sin embargo, aún falta analizar si existen diferencias significativas entre cada una de las 16 *subtasks* del protocolo, para poder encontrar si alguna de las piezas o tipo de movimiento (flexión/extensión, pronación/supinación), es un mejor indicativo de la función motora del miembro superior, al ser valorado con el dispositivo SBB.

Con los resultados analizados, falta descubrir los parámetros que se puedan utilizar para relacionar las

trayectorias o la forma de las piezas y evaluar la dificultad de alguna tarea o pieza. Se propone continuar con un análisis multi-variable para poder determinar estos factores y obtener con precisión las diferencias significativas entre grupos, lateralidades, *subtasks* y la elección de la mejor métrica de suavidad.

Se propone, un incremento en el grupo de control para caracterizar puntualmente los rangos aceptables para cada movimiento. Dado que el muestreo realizado corresponde a la Fase 1/3 del Protocolo de Investigación 45/15 de la División de Investigación del Instituto Nacional de Rehabilitación, es de bajo interés poder contar con una muestra significativa de sujetos; sin embargo, el trabajo presentado sirve como una ratificación del método a utilizar en las subsecuentes fases, donde se validará estadísticamente la información recopilada, con miras en generar una herramienta de valoración funcional de miembro superior para uso clínico.

La segmentación automática de los sub-movimientos muestra una mayor efectividad que el método reportado en análisis previos al definir puntualmente (y de manera automática) los movimientos que implican el control motor de grupos musculares afines a un movimiento en particular (i.e. flexión/extensión, pronación/supinación). Con los datos procesados, se indica que el modelo experimental es óptimo para el desarrollo de las siguientes fases de la investigación; sin embargo, hace falta generar bases de datos segmentados por rangos de edades, ya que el desarrollo neuromotor es diferente en los sujetos que se incluyen en el estudio.

Por último, se necesita una validación concurrente con las herramientas de valoración clínicas que se obtuvieron, para poder tener una relación directa entre el indicador funcional que resulta del análisis de la suavidad del movimiento y los siguientes parámetros: tonicidad muscular, nivel de espasticidad, función bi-manual, coordinación espacio-temporal y manipulación de objetos de la vida cotidiana.

CONCLUSIONES

La segmentación de sub-movimientos permitió aumentar la sensibilidad del dispositivo en el análisis (lado no afectado +9%, lado afectado +11%) en la agrupación de individuos con PC, al ser clasificados dentro o fuera de un rango de movimiento normal definido con sujetos sanos.

De nueva cuenta, el uso de métricas de suavidad demostró ser un indicador efectivo del movimiento del miembro superior al mostrar las diferencias entre un miembro afectado y uno no afectado denotando las diferencias del control motor y posición espaciotemporal para el miembro y tronco, así como de flexión y extensión del hombro.

El procesamiento realizado con los datos que el dispositivo (SBB) arroja, es capaz de distinguir entre los individuos sanos y entre los afectados por la hemiparesia espástica. Sin embargo, con la implementación de la segmentación de tareas, se logró dar una mayor sensibilidad al análisis para tener rangos de normali-

dad mejor acotados al igual que resultados más precisos para los niños diagnosticados con PC.

Se busca utilizar la metodología de valoración funcional del miembro superior, utilizando el dispositivo SBB en un ambiente clínico, puesto que los resultados proporcionados ayudarán a comprender cuantitativamente el grado de espasticidad del miembro, la habilidad de manipulación de objetos y la coordinación espaciotemporal de los mismos.

Actualmente el proyecto se encuentra:

- I) Investigando la suavidad del movimiento en adultos diferentes patologías.
- II) Correlacionando los resultados obtenidos con escalas clínicas (e.g. Ashworth, Tardieu, MACS).
- III) Desarrollando una escala objetiva de valoración funcional basada en suavidad (SALM).

REFERENCIAS

- [1] M. Sandlund, H. Grip, C. Häger, E. Domellöf, and L. Rönqvist, "Low-cost motion interactive video games in home training for children with cerebral palsy: a kinematic evaluation," *Int. Conf. Virtual Rehabil.* 2011, pp. 1-2, 2011. DOI: [10.3109/17518423.2013.776124](https://doi.org/10.3109/17518423.2013.776124)
- [2] F. Calderón-Sepúlveda, "Escalas de medición de la función motora y la espasticidad en parálisis cerebral," *Rev. Mex. Neurocienc.*, vol. 3, no. 5, 2002. *Rev Mex Neuroci* 2002; 3(5) : 285-289.
- [3] Murgia; V. Kerkhofs; H. Savelberg; K. Meijer. "A portable device for the clinical assessment of upper limb motion and muscle synergies", *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, pp.931-934, Aug. 31 2010-Sept. 4 2010 [10.1109/IEMBS.2010.5627522](https://doi.org/10.1109/IEMBS.2010.5627522)
- [4] M. Duff; S. Attygalle; J. He; T. Rikakis, "A portable, low-cost assessment device for reaching times," *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*, pp.4150-4153, 20-25 Aug. 2008 [10.1109/IEMBS.2008.4650123](https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4650123)
- [5] Quijano-Gonzalez, Y.; Melendez-Calderon, A.; Burdet, E.; Chong-Quero, J.E.; Villanueva-Ayala, D.; Perez-Moreno, J.C., "Upper limb functional assessment of children with cerebral palsy using a sorting box," *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014*, pp.2330,2333 DOI: [10.1109/EMBC.2014.6944087](https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6944087), ISSN:1557-170X
- [6] S. Balasubramanian, A. Melendez-Calderon, A. Roby-Brami and E. Burdet, "On the analysis of movement smoothness", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 12, no. 1, 2015. [10.1186/s12984-015-0090-9](https://doi.org/10.1186/s12984-015-0090-9)
- [7] Quijano-González, Y., Chong-Quero J.E, Villanueva Ayala, D., Perez Moreno, J.C. "Comparison of 4 Different Smoothness Metrics for the Quantitative Assessment of Movement's Quality in the Upper Limb of Subjects with Cerebral Palsy." *PM&R*, vol. 6, Issue 8, S88 - S89, Aug. 2014.. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmrj.2014.08.343>
- [8] Quijano González, Y., Quiñones Urióstegui Ivett, Chong-Quero J.E., Alessi Montero, A., Ulacia Flores, P., León Garmendia, A.. "IMU placement in the assessment of the upper limb using smoothness metrics" 2016 GCMAS Annual Conference
- [9] S. Balasubramanian, A Melendez-Calderon, and E. Burdet, "A robust and sensitive metric for quantifying movement smoothness.," *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol. 59, no. 8, pp. 2126-36, Aug. 2012. [10.1109/TBME.2011.2179545](https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2179545)
- [10] E. Jaspers, K. Desloovere, H. Bruyninckx, G. Molenaers, K. Klingels, and H. Feys, "Review of quantitative measurements of upper limb movements in hemiplegic cerebral palsy," *Gait & posture*, vol. 30, no. 4, pp. 395-404, Nov. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.07.110>
- [11] J. Klein, A. Chen and E. Burdet, "Instrumented sorting block box for Children, a preliminary experiment" 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, June 29 - July 1, 2011. 978-1-4244-9862-8/11/\$26.00 ©2011 IEEE
- [12] J.-D. Lee, W. Kai-Wei, L. Li-Chang, and W. Ching-Yi, "An upper-limb-movement classification system of cerebral palsy children based on arm motion detection.," *Conf. Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 27th Annu. Conf. Shanghai. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Conf.*, vol. 7, pp. 6878-81, Jan. 2005.
- [13] J.-J. Chen; Mi. Lee; Y.Z. Huang, "Validation of portable muscle tone measurement device based on a motor-driven system", *Engineering in Medicine and Biology Society, 2001. Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE*, vol.2, pp. 1213- 1215 vol.2, 2001 <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2001.1020411>
- [14] G.F. Harris; K.R. Acharya; L.J. Benson; T.R. Light; D.V. Matesi, "Biomechanical assessment of active and passive wrist joint control in children with cerebral palsy," *Engineering in Medicine and Biology Society, 1989. Images of the Twenty-First Century. Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering* pp.820-821 vol.3, 9-12 Nov 1989 [10.1109/IEMBS.1989.96000](https://doi.org/10.1109/IEMBS.1989.96000)
- [15] A. Bardorfer; M. Munih; A. Zupan; B. Ceru, "Linear and circular tracking exercises in haptic virtual environments for hand control assessment", *Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference*, pp. 66- 69, 28 June-1 July 2005 [10.1109/ICORR.2005.1501053](https://doi.org/10.1109/ICORR.2005.1501053)
- [16] T.M. Sukal; K.J. Krosschell; J.P.A. Dewald. "Use of the ACT3D System to Evaluate Synergies in Children with Spastic Hemiparetic Cerebral Palsy: A Pilot Study", *ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp.964-967, 13-15 June 2007 [10.1109/ICORR.2007.4428540](https://doi.org/10.1109/ICORR.2007.4428540)
- [17] A. Krasner; M. Wininger; N.H. Kim; W. Craelius, "Reaching toward quantitative metrics of spasticity", *Bioengineering Conference (NEBEC), 2011 IEEE 37th Annual Northeast* pp.1-2, 1-3 April 2011 [10.1109/NEBC.2011.5778569](https://doi.org/10.1109/NEBC.2011.5778569)
- [18] J. Kowalczewski; E. Ravid; A. Prochazka; "Fully-automated test of upper-extremity function", *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*, pp.7332-7335, Aug. 30 2011-Sept. 3 2011 [10.1109/IEMBS.2011.6091710](https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091710)
- [19] G.F. Harris; L. Benson; S. Riedel; K. Acharaya; D. Matesi, "Biomechanical assessment techniques in rehabilitation," *Colloquium in South America, 1990, Proceedings of the 1990 IEEE*, pp. 31-34, 1990 [10.1109/COLLOQ.1990.152789](https://doi.org/10.1109/COLLOQ.1990.152789)
- [20] M.A. Baniasad; F. Farahmand; N.N. Ansari, "Wrist-RoboHab: A robot for treatment and evaluation of brain injury patients," *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference* pp.1-5, June 29 2011-July 1 2011 [10.1109/ICORR.2011.5975506](https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975506)
- [21] S. Mazzoleni; M. Coscia; G. Rossi; S. Aliboni, "Effects of an upper limb robot-mediated therapy on paretic upper limb in chronic hemiparetic subjects: A biomechanical and EEG-based approach for functional assessment", *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference*, pp.92-97, 23-26 June 2009 [10.1109/ICORR.2009.5209579](https://doi.org/10.1109/ICORR.2009.5209579)
- [22] H.S. Park; Y.N. Wu; Y. Ren; L.Q. Zhang, "A Tele-Assessment System for Evaluating Elbow Spasticity in Patients with Neurological Impairments", *Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference* pp.917-922, 13-15 June 2007 [10.1109/ICORR.2007.4428533](https://doi.org/10.1109/ICORR.2007.4428533)
- [23] E. Jaspers, K. Desloovere, H. Bruyninckx, G. Molenaers, K. Klingels, and H. Feys, "Review of quantitative measurements of upper limb movements in hemiplegic cerebral palsy.," *Gait & posture*, vol. 30, no. 4, pp. 395-404, Nov. 2009. [10.1016/j.gaitpost.2009.07.110](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.07.110)

- [24] E. Hurvitz, G. Conti, S. Brown, "Changes in movement characteristics of the spastic upper extremity after botulinum toxin injection," *Arch Phys. Med. Rehabil.* 2003. [10.1053/apmr.2003.50001](#)
- [25] C. Metcalf, B. A. Hons, J. Adams, and D. Mbaot, "A review of clinical upper limb assessments within the framework of the WHO ICF Main article," *Musculoskeletal Care*, vol. 5, no. 3, pp. 160-173, 2007. [10.1002/msc.108](#)
- [26] Catea, Cerebral palsy (CP) [online], Georgia, EUA, Center for Assistive Technology and Environmental Access. <http://www.catea.gatech.edu/>, 2009. Disponible en http://atwiki.assistivetech.net/index.php/Cerebral_palsy_%28CP%29
- [27] Secretaría de Salud, SEMAR, and SEDENA, "Resumen de Evidencias y Recomendaciones, evaluación diagnóstica del niño con parálisis cerebral en el tercer nivel de atención," 2009.