

Estudio de caso: Análisis fractal de Higuchi y Katz para señales de actígrafo de bajo costo

L. D. Islas-Valencia¹, D. Martínez-Peon^{2*}, X. A. Ortiz-Jiménez^{3,4}, F. J. Perez-Encina², F.G. Benavides-Bravo⁵, J. F. Góngora-Rivera^{4,6,7}

¹Departamento de Ingeniería Biomédica, Hospital Universitario Dr. José Eleuterio González, Monterrey, México

²Departamento de Eléctrica/Electrónica, Tecnológico Nacional de México / IT Nuevo León, Guadalupe, México

³Facultad de Psicología, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México

⁴Unidad de Neuromodulación y Plasticidad Cerebral, CIDICS, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México

⁵Departamento de Ciencias Básicas, Tecnológico Nacional de México / IT Nuevo León, Guadalupe, México

⁶Facultad de Medicina y Departamento de Neurología del Hospital Dr. José Eleuterio Gonzales, Monterrey, México.

⁷Instituto de Neurología y Neurocirugía del Hospital Zambrano Hellion, TEC, San Pedro Garza García, México.

*dulce.mp@nuevoleon.tecnm.mx

Abstract— The present work demonstrates a low cost actigraph to monitor motor activity while a person performs the task of going to bed. To corroborate its performance, two types of experiments were performed, in the first one the device was placed on a subject to study the first 8 hours of sleep, in the second one it was placed on a table during the same hours. Two fractal-based algorithms, Higuchi and Katz, were implemented to process the signals obtained. The signals were divided into two blocks when the device was placed on the subject, block 1 when there was a lot of motor activity once the subject was lying down, and block 2 when no motor activity was detected. ANOVA tests were run, and no significant differences were found between blocks 1 and 2, however, significant differences were found, for both algorithms, when the subject was using the device and when the device was left on the table. The implication of this result is that a device is available at low cost that can be used to verify whether the subject puts on the device to analyze motor activity or decides to take it off, for example, when they are asked to participate in an experiment that requires sleep for several hours.

Palabras clave— Actígrafo, Monitoreo posición, Higuchi, Katz.

I. INTRODUCCIÓN

Para algunos investigadores biomédicos, psicólogos o médicos, es de gran interés saber si los pacientes que se encuentran dentro de sus sesiones de terapia o como parte de su grupo experimental cumplen con las condiciones que se les pide, como es el caso del descanso durante cierto número de horas, [1]. Para ello existen métodos como el de videgrabación o sensores de movimiento. Dentro de este último se encuentran los actígrafos, los cuales son giroscopios que miden posiciones en el espacio (x,y,z). Los actígrafos se colocan en alguna parte del cuerpo, brazo o pierna, y graban la actividad motora para que el especialista analice si se cumplió con lo requerido, y evitar que el usuario se quite el dispositivo dejándolo en un lugar sin estático.

Actualmente, en el mercado existen actígrafos como el wGT3X-BT (Actigraph Corp), el cual tiene un costo aproximado de 8 mil pesos (325 dólares). Este actígrafo se coloca en la muñeca, puede enviar señales vía

bluetooth y utiliza un software llamado ActiLife en el cual se muestran los porcentajes de 4 estados: de pie, acostado, sentado y off, [2]. Encontramos además otros como el GT9X Link (ActiGraph), con un costo aproximado de 6,250 pesos (250dólares) el cual cuenta un acelerómetro secundario, un giroscopio y sensores magnetómetros que ayudan con el constante monitoreo de la posición y rotación del sujeto. Sin embargo, los precios elevados dificultan su acceso, [2].

El uso de la actigrafía se presenta por su fácil manejo y su gran capacidad de estudiar eventos de sueño y vigilia por tiempos prolongados. Uno de los inconvenientes, adicional al costo, es el análisis de los datos ya que en algunas ocasiones se dificulta interpretar los datos de acuerdo con los propósitos de investigación, [3]. Es por ello por lo que en el presente proyecto instrumentamos un actígrafo con materiales fáciles de conseguir y se propone un estudio de caso para demostrar su posible aplicación en detección de uso persona (acostado, o sobre un sistema estático – por ejemplo, mesa de noche). Se analizan las señales obtenidas mediante algoritmos basados en los índices fractales de Higuchi y Katz, y los comparamos para estudiar la factibilidad de analizar las señales cuando los sujetos usan el dispositivo cuando están acostados contra el uso del actígrafo cuando este se coloca sobre una mesa y se encuentra estático, [4].

II. METODOLOGÍA

El actígrafo se propuso para que fuera colocado en la pierna con materiales comerciales de bajo costo, debido a las dimensiones del nuestro dispositivo, y la capacidad de almacenar datos por 8 horas.

A. Materiales

Los materiales utilizados son: Microcontrolador Teensy 3.2, acelerómetro/giroscopio MPU 6050, módulo lector para tarjeta Micro SD, Micro SD 8 GB, cargador para batería Lipo TP4056, batería Lipo 1200 miliamperios a 3.7 V, tarjeta fenólica 8 x 7.5 cm, y tiras de headers hembra de 7 conexiones.

B. Diseño electrónico

Se diseñó una tarjeta de circuito impresa (Printed Circuit Board o PCB por sus siglas en inglés) para conectar los componentes, ver Fig. 2 izquierda. Dicha PCB se fabricó de forma tradicional, utilizando una plancha sobre una baquelita con el diagrama de las pistas que conectan los componentes, ver Fig. 2 derecha.

C. Diseño de experimentos

Debido a la situación del COVID-19 nos limitamos a pruebas de solo un sujeto sano para el experimento. El actígrafo se colocó en la pierna del sujeto debido al tamaño del prototipo y se realizó el registro de la posición de la pierna durante las primeras 8 horas continuas de sueño. El participante no se levantó de la cama durante el registro. Se registraron 5 noches diferentes para un solo sujeto. Las señales se grabaron en una tarjeta SD que posteriormente se analizaron en una computadora.

D. Procesamiento de señales

- 1) *Normalización*: Todas las señales fueron normalizadas en un mismo rango de 0 a 1 para poder comparar los datos del sujeto en un mismo plano.
- 2) *Recorte de señales y clasificación de etapas*: Las señales fueron recortadas y clasificadas en 2 etapas, una en donde se registró mayor movimiento por parte del usuario y una segunda fase donde el movimiento era casi nulo.
- 3) Método de *Higuchi (HFD)*: usado en topología, calcula un valor de la dimensión fractal de Higuchi (HFD). Dada una serie de tiempo \mathbf{X} , con N puntos de datos y un parámetro k_{\max} el HFD de \mathbf{X} es calculado para cada $k \in \{1, \dots, k_{\max}\}$ y $m \in \{1, \dots, k\}$ define la longitud $L_m(k)$ por la siguiente ecuación (1).

$$L_m(k) = \frac{N-1}{\binom{N-m}{k} k^2} \sum_{i=1}^{\binom{N-m}{k}} |X_N(m+ik) - X_N(m+(i-1)k)| \quad (1)$$

Dónde, $L(k)$ es la longitud definida por la ecuación (2).

$$L(k) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k L_m(k). \quad (2)$$

La pendiente de la función lineal que mejor se ajusta a través de los puntos de datos $\{(\log \frac{1}{k}, \log L(k))\}$ es el HFD de \mathbf{X} , [6].

- 4) Algoritmo de *Katz*: El cálculo de la Dimensión Fractal (FD) de Katz se describe como la proporción de la longitud de la curva L dividida por la distancia máxima d de cualquier punto en la trama. El algoritmo define a la FD como

$$FD = \frac{\log_{10}(L)}{\log_{10}(d)} \quad (4)$$

Donde L es la longitud total de la curva.

$$L = \sum_{i=1}^N \text{dist}(s_i, s_{i+1}), i = 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

donde d es el diámetro de la curva, la cual puede ser expresada como en la ecuación (6)

$$d = \max\{\text{dist}(s_1, s_i), i = 1, \dots, N\} \quad (6)$$

Katz propone normalizar d y L por la distancia promedio entre puntos sucesivos, $a = \frac{L}{N}$, donde N es el número de pasos en la curva, así la ecuación 4 se convierte en

$$FD = \frac{\log_{10}\left(\frac{L}{a}\right)}{\log_{10}\left(\frac{d}{a}\right)} = \frac{\log_{10}(N)}{\log_{10}\left(\frac{d}{L}\right) + \log_{10}(N)} \quad (7)$$

Dónde FD es la dimensión calculada, [8].

- 5) *ANOVA*: Para comparar las señales procesadas con los métodos de Higuchi y Katz se utilizó ANOVA. Este análisis es un conjunto de técnicas estadísticas de gran utilidad para comparar varios grupos, evaluar mediciones que se encuentran repetidas en diversos conjuntos, ajustar el efecto cuando varía una o más características que afectan al sujeto o estudiar dos o más procesos diferentes al mismo tiempo, [6]. Se realizaron dos análisis en un inicio, uno con Higuchi y uno con Katz, dividiendo las señales en el sujeto acostado cuando el dispositivo presentaba alta actividad motora y cuando ya no se detectaba actividad. Después, se realizaron pruebas para encontrar diferencias cuando el sujeto utilizaba el dispositivo y cuando lo dejaba sobre la mesa para ambos algoritmos. Para esto se utilizó el ANOVA de una vía que se presenta cuando existe una sola variable independiente a clasificar y dos o más grupos, [8]. Esta herramienta hizo más sencilla la discusión.

III. RESULTADOS

A. Actígrafo de bajo costo

El actígrafo instrumentado se muestra en la Fig. 1, se colocó en una bolsa acojinada para mayor comodidad del usuario. Se puede considerar inalámbrico debido a que las señales se guardan en la tarjeta SD, el costo aproximado fue de 1800 pesos (70 dólares).

B. Procesamiento de señales

El dispositivo puede adquirir 3 posiciones (x, y, z) espaciales, pero se seleccionó solamente una, eje z, puesto que fue el eje que mostró una amplitud mayor en las mediciones. En la Fig. 3 se muestra un ejemplo del registro realizado por 8 horas (480 minutos) usando el actígrafo instrumentado. Entre los minutos 0 y 100 se puede observar variación de la amplitud, mientras que entre el minuto 102 y 153 se puede observar una meseta, es decir, el sujeto presentaba nulo movimiento de la pierna. Posteriormente, entre el minuto 160 y 185 bajo la amplitud, pero no hay variabilidad. Se seleccionaron las señales en estos dos tipos, donde había mucha variación en la amplitud (bloque 1) y donde había poca variación (bloque 2) para hacer el análisis de las señales adquiridas, y se compararon con las señales adquiridas cuando se colocó el dispositivo en una mesa. El análisis con el dispositivo sobre la mesa representa el reposo y cuando se coloca en el sujeto representa el estudio en acostado.

La Fig. 4 muestra la relación entre los índices de Higuchi calculados con los valores obtenidos con el giroscopio para los bloques 1 y 2 de las 5 noches. Para el bloque 1 los valores presentaron una dispersión amplia y se encuentran dentro de un rango de 1.35 y 1.70 con una

mediana cercana a 1.48, mientras que para el bloque 2 la dispersión fue menor, con un mínimo de 1.43 y un máximo de 1.55, y una mediana de 1.45.

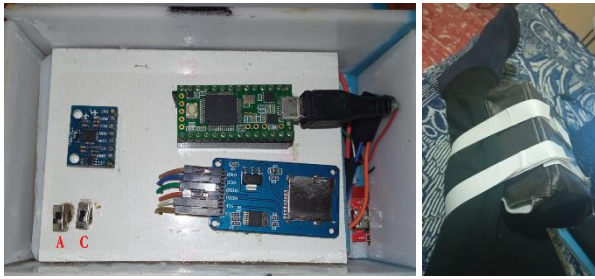


Fig. 1. Izquierda: Actígrafo instrumentado. Cuenta con dos switches para prender el actígrafo (A) y para cargar la batería (C). Se añadió un indicador de batería para monitorear el nivel de batería. Derecha: usuario utilizando el actígrafo en la pierna derecha.

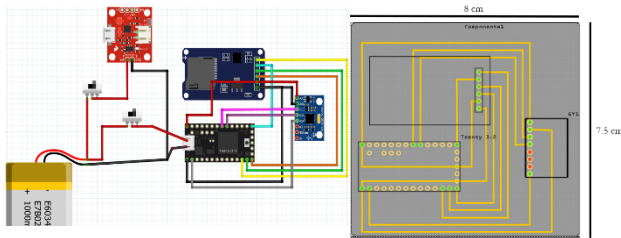


Fig. 2 izquierda, conexión de las tarjetas electrónicas utilizadas. Derecha, diagrama en PCB.

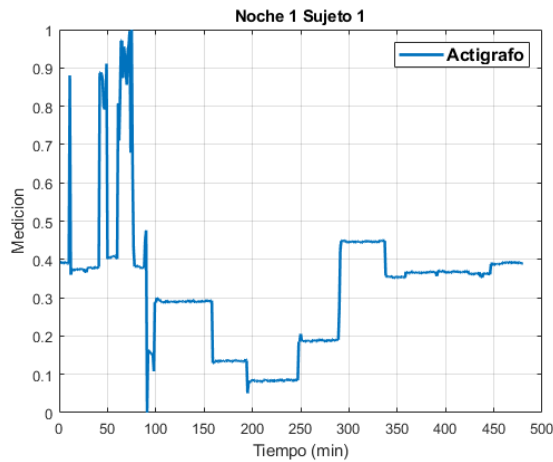


Fig. 3. Ejemplo del registro del actígrafo durante la noche 1 del sujeto 1, donde se observa una gráfica del tiempo (eje x) en minutos contra las mediciones de la posición normalizada (eje y) en el eje z arrojadas por el actígrafo (giroscopio). Durante los primeros 100 min. el sujeto mantuvo una actividad con amplia variación.

La Fig. 5 muestra las gráficas de caja obtenidas con el índice de Katz para los dos bloques. Para el bloque 1, el mínimo es de 1.00036, un máximo de 1.00086 y la mediana de 1.00055. El bloque 2 presenta una mínima de 1.00036, un máximo de 1.00074 y una mediana de 1.00053. Las Fig. 6 y 7 muestran las gráficas de caja de las señales obtenidas cuando el dispositivo se encontraba sobre una mesa con el índice de Higuchi y el de Katz, respectivamente. Se puede observar que la variabilidad es muy baja en ambos casos, sin embargo, en el caso de Katz, es mucho menor esta

variabilidad que en Higuchi. La mediana para Higuchi es alrededor de 1.84 y para Katz 1.00032.

C. Resultados ANOVA

Se realizaron estudios ANOVA de una vía con los índices obtenidos de ambos algoritmos con el fin de evaluar diferencias entre los períodos contrastantes de actividad muscular en el sujeto, al igual que compararlos con el dispositivo cuando éste se encontraba sobre la mesa sin actividad contra el estar usándolo acostado.

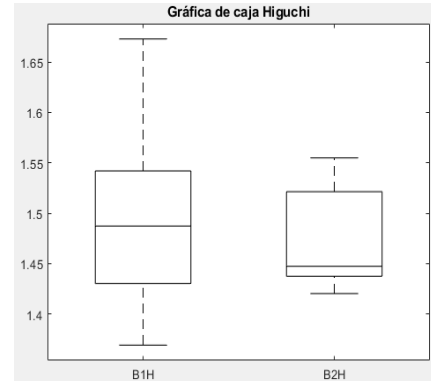


Fig. 4. Gráfica de caja con índices de Higuchi del sujeto durante 5 noches, donde B1H representa el bloque 1 y B2H es el bloque 2.

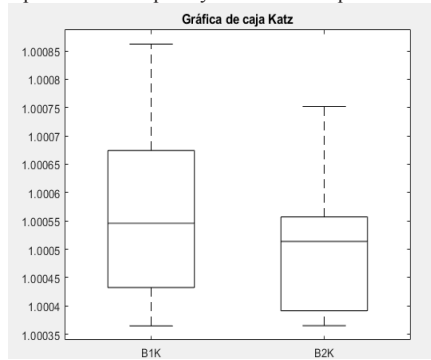


Fig. 5. Gráfica de caja con el índice de Katz del sujeto durante 5 noches, donde B1K representa el bloque 1 y B2K es el bloque 2.

No se encontraron diferencias significativas entre los bloques 1 y 2 con el sujeto acostado en ninguno de los dos algoritmos, solo que en el bloque 2 de menor actividad había menor dispersión de los valores en comparación con el bloque 1. Se obtuvo una varianza de los índices de Higuchi con poca varianza (F 0.81; P 0.3715), así como para los índices de Katz (F 2.8; P 0.098). Contrario a esto, al realizar la comparación entre el dispositivo colocado en el sujeto y el dispositivo sobre la mesa, se presentó un valor muy contrastante en el ANOVA con el algoritmo de Higuchi (F 490.64; P 4.41292e-39), representando grandes diferencias en los dos experimentos, al igual que con el algoritmo de Katz (F 32.12; P 1.58122e-07).

Los cambios en los valores y en las gráficas se deben al movimiento generado al dormir, el cual no se presenta igual cuando está sobre la mesa. Este análisis permite evidenciar las diferencias considerables entre los dos casos y su importancia al estudiar al sujeto en periodos de sueño y vigilia.

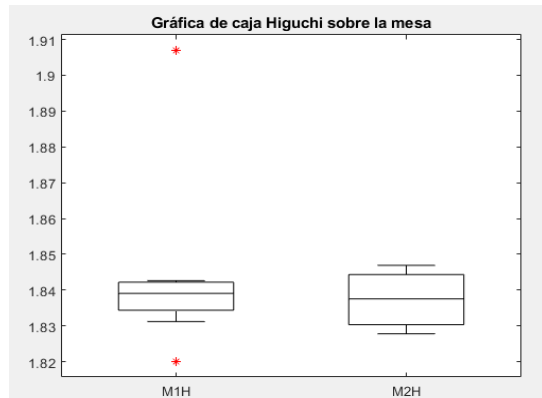


Fig. 6. Gráfica de caja con índices de fractales de Higuchi estudiados sobre una mesa, dónde M1H representa el período con mayor actividad en el giroscopio y M2H las mesetas generadas en el actígrafo



Fig. 7. Gráfica de caja con índices de fractales de Katz estudiados sobre una mesa, dónde M1K representa el período con mayor actividad en el dispositivo y M2K las mesetas generadas en el actígrafo.

IV. DISCUSIÓN

En este trabajo se presentó un actígrafo de bajo costo, con la desventaja de tener dimensiones amplias comparadas con los actígrafos comerciales, y que puede resultar incómodo para los usuarios que duermen boca abajo. Sin embargo, nos permitió adquirir datos para análisis y comparación para dos estados, con el actígrafo puesto y acostado, contra el dispositivo puesto sobre una mesa. Se procesaron las señales con algoritmos basados en fractalidad, Higuchi y Katz, debido a la naturaleza no regular de las señales cuando el sujeto traía puesto el actígrafo. El análisis fractal se recomienda en señales no regulares, y las bioseñales tienen esta característica, por lo que se recomienda la implementación de estos algoritmos para la obtención de características, [9].

No se encontraron diferencias significativas entre movimientos con variación de amplitud, sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas cuando el dispositivo estaba sobre la mesa contra el dispositivo puesto en el sujeto cuando estaba acostado, esto se compara con el fin de poder saber si el sujeto si se colocaba el dispositivo o no y evaluar después si los usuarios utilizan el mismo. Respecto a trabajos similares con análisis de movimiento usando

algoritmos basados en fractales se encuentran por ejemplo el realizado por Joris Vangeneugden y sus colaboradores [10], quienes demuestran que se puede diferenciar mediante el cálculo de la dimensión fractal sujetos sanos de pacientes con osteoartritis de rodilla durante descanso o movimiento.

V. CONCLUSIONES

El dispositivo propuesto es de bajo costo comparado con los disponibles en el mercado puesto que se encuentra debajo de 1800 pesos (70 dólares), se proporciona la lista de materiales que son de bajo costo y las conexiones para su posible replica. El análisis de las señales adquiridas con el actígrafo usando los algoritmos basados en fractales resultaron efectivos para comparar cuando el dispositivo se encontraba puesto en la pierna del sujeto en estudio o en una mesa, esto puede ser muy útil en estudios donde se requiera que los voluntarios cumplan con ciertas horas acostados y evitar que se quiten el dispositivo dejándolo en un lugar estático. Debido al poco tiempo y a la situación del COVID-19 solo se adquirieron datos para un sujeto. Se sugiere hacer un estudio donde se pueda observar más estados y con más sujetos, además de evaluar los 3 ejes de movimiento. También se tiene considerado la sincronización con un polisomnógrafo y de esta forma caracterizar las señales para detectar etapas del sueño y correlacionarlas con otros factores de relevancia en los ciclos del sueño. Finalmente, con este trabajo demostramos que se puede instrumentar un dispositivo de bajo costo para comparar señales adquiridas durante el descanso de 8 horas y con el uso de algoritmos basados en fractales se puede diferenciar si el sujeto utilizó el dispositivo o lo dejó reposando en un sistema estático.

VI. RECONOCIMIENTO

Agradecemos al CONACYT por la beca de maestría otorgada 1080589.

VII. REFERENCIAS

- [1] Oviedo, T., Giner, P., Torres, N., García, S. & Quintero, K. "Estudio retrospectivo de la actigrafía en una unidad de sueño" [En línea]. Conference: XXXIX Reunión de la Sociedad de Neurofisiología Clínica de las Comunidades de Valencia y Murcia. Castelló de la Plana, 2014. DOI:10.13140/2.1.2441.5524. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/273454852_ESTUDIO_RETROSPECTIVO_DE_LA_ACTIGRAFIA_EN_UNA_UNIDAD_DE_SUENO [Fecha de consulta: 07/07/2021].
- [2] Bellone, G., Plano, S., Cardinali, D., Pérez, D., Vigo, D. & Golombek, D. "La actigrafía como herramienta diagnóstica" [En línea]. La Prensa Médica Argentina Vol. 104, no. 1, 2018. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/greenstone/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=investigacion&d=actigrafiacomoherramienta-diagnostica> [Fecha de consulta: 11/07/2021].
- [3] Ruíz, A., Romero, O., Teixeira, C. & Troncoso, M. "Guía de Actigrafía en las Unidades de Sueño" [En línea].

Sociedad Española de Sueño. España. Disponible en: <https://ses.org.es/wp-content/uploads/2016/12/guia-de-actigraf%C3%ada-en-unidades-de-sueno-1.pdf> [Fecha de consulta: 08/07/2021].

[4] Fernández, F. & Rangel, J. “Comparativo de los algoritmos de dimensión fractal Higuchi, Katz y Multiresolución de conteo de cajas en señales EEG basadas en potenciales relacionados por eventos” [En línea]. Revista EIA, vol. 14, núm. 27, 2017, pp. 73-83. Escuela de Ingeniería de Antioquia Envigado, Colombia. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149252659007.pdf> [Fecha de consulta: 12/07/2021].

[6] Higuchi, T. (1988). Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 31(2), 277-283. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(88\)90081-4](https://doi.org/10.1016/0167-2789(88)90081-4)

[7] Fernández Fraga, Santiago, & Rangel Mondragón, Jaime (2017). Comparativo de los algoritmos de dimensión fractal higuchi, katz y multiresolución de conteo de cajas en señales eeg basadas en potenciales relacionados por eventos. *Revista EIA*, 14(27),73-83. [fecha de Consulta 14 de Julio de 2021]. ISSN: 1794-1237. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149252659007>

[8] Dagnino, J. “Análisis de Varianza” [En línea]. *Rev Chil Anest* 2014; 43: pp. 306-310. Disponible en: <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf> [Fecha de consulta: 10/07/2021].

[9] B. West, “Fractal physiology and the fractional calculus: A perspective,” *Frontiers in Physiology*, vol. 1, p.12, 2010. Online Available: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2010.00012>

[10] Vangeneugden J, Verlaan L, Oomen P, Liu WY, Peters M, Natour N, Emans P, Meijer K. Signatures of knee osteoarthritis in women in the temporal and fractal dynamics of human gait. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2020 Jun; 76:105016. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2020.105016. Epub 2020 Apr 28. PMID: 32438265.