

Actividad Eléctrica Neuronal Durante el Razonamiento Verbal, Numérico y Espacial en Estudiantes Universitarios de Nuevo Ingreso

A. S. Torres-Torres^{1*}, A. R. Cuevas-Romero¹, L. M. Alonso-Valerdi¹, D. I. Ibarra-Zárate¹ y R. Hugues-Guiño¹

¹ Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Eugenio Garza Sada 2501, 64849 Monterrey, Nuevo León, México.

*a01339820@itesm.mx

Resumen

Un examen tradicional, es una evaluación sumativa que puede presentar diferentes sesgos tales como (1) conceptos memorizados, sin comprensión de estos, o bien, (2) pruebas de opción múltiple donde está presente la probabilidad estadística de sacar una respuesta correcta sin conocerla. El objetivo de la presente investigación es analizar la actividad electroencefalográfica (EEG) durante los procesos cognitivos que se involucran en el razonamiento verbal (RV), numérico (RN) y espacial (RE) de las pruebas de aptitudes diferenciales (DAT) en estudiantes universitarios de reciente ingreso, para evaluar la viabilidad de los siguientes neuromarcadores: carga cognitiva (CC) y coherencia entre respuestas correctas e incorrectas. Para el estudio, se reclutaron 13 estudiantes del primer, segundo o tercer semestre provenientes de distintas carreras. En esta investigación, se encontró que entre más asertivo es el estudiante, como ocurrió en RN, la CC tiene una distribución topográfica mucho más definida y las diferencias de la CC involucrada entre respuestas correctas e incorrectas son menores. Si la tarea implica mayor complejidad para el estudiante, para aquellas tareas donde tiende a ser más asertivo (como ocurrió con RE) la distribución topográfica de la CC está bien definida, y la diferencia de CC entre correcto e incorrecto es muy marcada y definida. Por el contrario, aquellas tareas donde tiende a ser más dubitativo (RV) por tener menor aptitud, la distribución topográfica de la CC fue muy difusa y la diferencia de CC entre correcto e incorrecto es grande y sin mostrar tendencias claras.

Palabras clave: Actividad electroencefalográfica, carga cognitiva, coherencia, evaluación, razonamiento.

1. Introducción

En la actualidad, un examen tradicional es la herramienta de evaluación sumativa más utilizada, en la cual se cuantifica el número de aciertos. Sin embargo, esta forma de determinar el conocimiento de un individuo puede presentar diferentes sesgos tales como (1) alumnos quienes se preparan para una prueba memorizando conceptos, pero sin comprensión de estos, o bien, (2) pruebas de opción múltiple donde está presente la probabilidad estadística de sacar una respuesta correcta sin conocerla [1].

A la fecha, se han realizado avances importantes en las neurociencias cognitivas en materia de educación. [2] estudiaron a través de actividad de Electroencefalografía (EEG) el procesamiento cognitivo de individuos con un alto y un bajo coeficiente intelectual al momento de realizar tareas de razonamiento lingüístico y visoespacial. [3] estudiaron el razonamiento matemático en niños con altos y bajos desempeños académicos, plantearon que los niños con alto desempeño mostraban mayor actividad neuronal sobre el lóbulo parietal en la frecuencia beta, que aquellos con bajo desempeño quienes mostraron mayor actividad neuronal frontoparietal en las frecuencias delta, theta y alfa. [4] relacionaron la creatividad y la capacidad de conceptualización verbal con la actividad neuronal

presentada en el lóbulo parietal derecho en la banda alfa. [5] encontraron la presencia de actividad neuronal sobre el lóbulo occipital en las bandas alfa y gama durante actividades visuoespaciales.

Ahora bien, no solo se ha estudiado la actividad neuronal en diferentes anchos de banda y en respuesta a diferentes tareas cognitivas. La carga cognitiva ha sido un tópico recurrente de estudio en los últimos años [6], puesto que dicho factor puede ayudar a medir la atención prestada por el sujeto a la tarea presente [7]. Por ejemplo, [8, 9] lo hicieron entre aquellos con diferentes tipos de inteligencia predominantes.

De acuerdo con la Psicología Educativa [10], el conocimiento previo tiene impacto inevitable durante procesos de aprendizaje concurrentes. Esto significa que el diseño de un esquema evaluativo basado en neurométricas para cuantificar y cualificar el conocimiento previo de los estudiantes de ingreso reciente puede mejorar la perspectiva y la experiencia educativa, así como permitir la reestructuración de los programas académicos.

Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación es monitorear la actividad eléctrica neuronal durante los procesos cognitivos (particularmente la carga cognitiva [11]) que se involucran en el razonamiento verbal (RV), numérico (RN) y espacial (RE) en estudiantes universitarios de reciente ingreso para estudiar su estrategia en la resolución de problemas, con la finalidad de proponer neurométricas de aprendizaje que reflejen la evolución de los estudiantes universitarios durante su formación académica, y gradualmente, se llegue a evaluar los modelos educativos actuales con respecto a los recursos mentales usados para resolver un problema, y no solo bajo la consideración de una evaluación sumativa tradicional. Es decir, *¿Cómo pienso cuando resuelvo un problema?* En vez de *¿Cuánto acertó cuando se me presenta un problema?*

2. Metodología

2.1 Prueba DAT

La evaluación de los estudiantes de recién ingreso se realizó en base a la prueba de aptitudes diferenciales (Differential Aptitude Test – DAT), versión 5, nivel 2. El objetivo de dicha prueba es medir la capacidad para aprender o actuar eficazmente en una determinada área. Generalmente, se aplica durante ciclos formativos de grado superior. La prueba consta de tres subpruebas: (1) RV, mide la habilidad para descubrir relaciones entre palabras y está constituida por analogías; (2) RN, mide la habilidad para enfrentar tareas matemáticas con énfasis en la facilidad de cálculo; más no el conocimiento de este; y (3) RE, la cual mide la habilidad para visualizar un objeto en tres dimensiones a partir de un objeto bidimensional. La versión original se reporta en [12].

2.2 Sistema de adquisición de datos

El registro de la actividad neuronal se realizó a través de un sistema de EEG de la compañía g.TEC Medical Engineering (Austria). El sistema cuenta con un bioamplificador g.*USBamp* de 16 canales, alámbrico, conexión USB 2.0 y con certificación de la FDA (Food and Drug Administration). La frecuencia de muestreo usada fue de 256 Hz en un ancho de banda de 0.1 a 100 Hz. La distribución de electrodos es acorde a la nomenclatura internacional 10/20.

2.3 Muestra

Se reclutaron 13 estudiantes de ingreso reciente al Tecnológico de Monterrey (Monterrey, N. L.). Los estudiantes cursaban el primero, segundo y tercer semestre de diferentes áreas de conocimiento: (1) negocios, (2) ciencias sociales, (3) estudios creativos, (4) ambiente construido, (5) salud, (6) innovación y transformación, (7) computación y tecnologías de la información, (8) bioingeniería y procesos químicos y (9) ciencias aplicadas. Los voluntarios del estudio tenían entre 18 y 20 años, de

los cuales 5 eran mujeres y 8 hombres. Todos los participantes fueron informados sobre el procedimiento experimental y consintieron participar en el estudio de forma voluntaria. El estudio fue previamente autorizado por el Comité de Ética de la Escuela de Medicina del Tecnológico de Monterrey (CONBIOETICA-19-CEI-011-201611017).

2.4 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental consistió en dos sesiones con duración no mayor a 50 minutos. En la primera sesión, se les informó sobre el procedimiento completo y firmaron una carta de consentimiento. Se agendó la cita para la siguiente sesión y se preparó al participante para realizar los registros de EEG. Terminada la preparación, se instruyó al voluntario sobre el número y tipo de preguntas a contestar durante RE, y se le indicó que tenía tiempo ilimitado para contestar las preguntas. Antes de comenzar la prueba, se le tomó un registro de EEG en estado de reposo por 3 minutos. Para la segunda sesión, se volvió a realizar la preparación del sujeto y se realizó RV y RN. El procedimiento experimental se puede consultar en el video disponible en https://youtu.be/1-0P_FgPL58.

2.5 Análisis de las señales de EEG

Preprocesamiento. Los registros fueron preprocesados con el toolbox EEGLAB 2019 [13] en Matlab R2020a. El preprocesamiento se efectuó en 4 pasos: (1) inspección visual para detectar y eliminar anomalías en los registros debidos a movimientos abruptos del voluntario y/o desconexiones inesperadas de los electrodos; (2) referenciación de los canales de EEG con respecto al promedio de todos los canales; (3) filtrado entre 0.1 y 30 Hz aplicando un filtro digital pasa banda IIR tipo Butterworth de orden 8; y (4) eliminación de componentes independientes no relacionados a la actividad neuronal a través del plug-in MARA 1.2 [14].

Procesamiento. Una vez preprocesadas las señales de EEG, éstas fueron segmentadas de acuerdo con las respuestas correctas e incorrectas de cada voluntario. El evento usado como referencia fue el momento en el que el voluntario oprimió la tecla de la respuesta a la pregunta presente. Se usaron ventanas de 5 s con límites entre -5 y 0 s. De las épocas generadas se utilizó EEGLAB, una función de rechazo para espectros de frecuencia anormales basada en umbrales, los cuales fueron ± 50 dB y ± 2 Hz.

Carga Cognitiva (CC). A partir de las épocas generadas se clasificaron, con relación a la evaluación sumativa, en respuestas correctas e incorrectas, generando un promedio de estas dos clases por cada canal y sujeto, lo cual resultó en 2x16 épocas por sujeto, a las que se les extrajo la carga cognitiva. Existen varios índices con los que se puede calcular, [15] encontraron que el “Engagement Index” basado en la relación que se muestra en la Ecuación 1, es el más sensible y eficiente [16], por lo que se eligió como neuromarcador. Para la potencia por banda (PB), se definieron los anchos de bandas individuales como $\beta = 12-30$ Hz, $\alpha = 8-12$ Hz y $\theta = 4-8$ Hz.

$$IE = \frac{PB \beta}{PB \alpha + PB \theta} \quad (1)$$

Coherencia. Habiendo obtenido la tendencia central de la CC a través de las épocas promediadas, se utilizó la función de Matlab *wcoherence* [17] para calcular la coherencia mediante la Ecuación 2, obtenida con la transformada wavelet analítica de Morlet. El valor es el resultado de la magnitud del absoluto al cuadrado de la densidad espectral cruzada W_{xy} dividida entre la densidad espectral de la primera señal W_x multiplicada por la densidad espectral de la segunda señal W_y . La coherencia es un método para comparar el nivel de sincronización de la actividad eléctrica entre dos puntos de registro [18]. La coherencia refleja tanto inhibición como excitación en una escala normalizada de la intensidad del 0 al 1, donde 0 indica independencia y 1 interdependencia entre los puntos de registro. A comparación de la transformada de Fourier, el análisis por wavelets permite analizar paralelamente las

dimensiones de tiempo y espacio [19]. La coherencia se usó para comparar los canales de EEG con mayor CC.

$$C_{xy} = \frac{|W_{xy}|^2}{W_x \cdot W_y} \quad (2)$$

3. Resultados y Discusión

3.1 Evaluación Sumativa

Con respecto a la evaluación sumativa de RV, RE y RN, el tiempo de respuesta y el número de aciertos y errores fueron estimados. Como se muestra en la Fig. 1, los tiempos de respuesta fueron muy variados, el RN presentó una distribución más dispersa con respecto a RV y RE. Adicionalmente, el RN presentó el desempeño más alto, alcanzando 73.54% de aciertos. Finalmente, se realizó una prueba t-test para comprobar la hipótesis alterna que plantea que los tiempos de respuesta de las respuestas correctas son mayores que los tiempos de las respuestas incorrectas cuando la pregunta implica CC considerable. La prueba reveló que tanto en RV como RN no existe una diferencia significativa entre respuestas correctas e incorrectas. Por el contrario, en RE las respuestas correctas presentaron un tiempo de respuesta significativamente mayor al de incorrectas ($p = 0.015$).

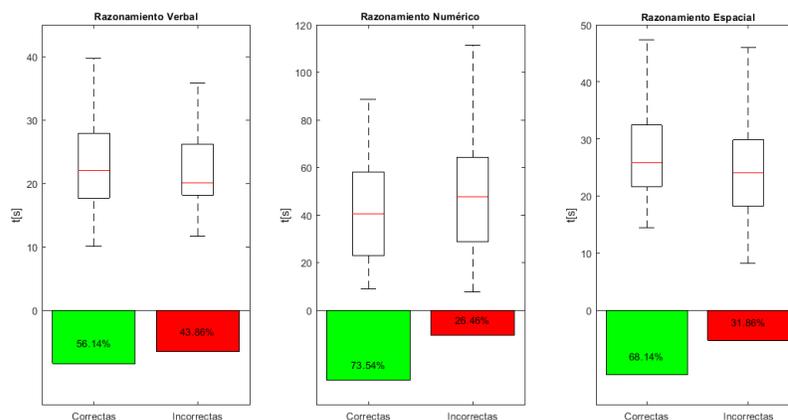


Fig. 1. Distribución de los tiempos de respuesta, por pregunta, de los tres tipos de razonamiento: verbal, numérico y espacial. El RV alcanzó el menor desempeño, con solo el 56.14% de aciertos, mientras que el RN alcanzó el mejor desempeño con el 73.54%.

3.2 Carga Cognitiva y Nivel de Coherencia

Razonamiento Verbal. Los estudiantes presentaron el mayor número de respuestas incorrectas durante el RV (Fig. 1), donde además mostraron la menor CC con respecto al resto de las tareas cognitivas. Como se muestra en la Fig. 2, se presentó un aumento del 50% al 60% en la CC durante las respuestas incorrectas en las regiones centro-occipital izquierda (C3 y O1) y frontal derecha (F8). De hecho, se puede ver que la coherencia de CC sobre C3 entre respuestas correctas e incorrectas fue mayormente baja (Fig. 3), indicando diferencias significativas entre ambas condiciones. Se logra distinguir similitudes esporádicas durante la elección de la respuesta en las bandas alfa (8-14 Hz) y beta (22-30 Hz) entre -3.5 y -3 s. De la misma forma, la coherencia en theta alcanza un valor máximo de 0.68, concordante con trabajos sobre activación en theta relacionada con la memoria de trabajo en tareas verbales para la línea media [20]. Al parecer, los estudiantes de nuevo ingreso mostraron mucha más

actividad neuronal durante procesos cognitivos lingüísticos que llevaron a una elección errónea, particularmente sobre el lóbulo izquierdo que se relaciona directamente con mecanismos del lenguaje escrito y verbal.

Razonamiento Numérico. Los estudiantes de recién ingreso, independientemente de su carrera, alcanzaron mejor desempeño en el RN. La CC implicada al momento de proporcionar una respuesta correcta o incorrecta fue bastante similar en ambos procesos, tendiendo a alcanzar mayor magnitud (100%) en las regiones fronto-temporal derecha (F8, T8) y occipital izquierdo (O1). Aunque la CC tuvo una distribución topográfica bastante similar al momento de dar respuesta correctas o incorrectas, algunos puntos de registro de EEG como T8 mostró diferencias significativas en ambas condiciones. En la Fig. 3, se puede observar que las frecuencias más altas de beta (20-30 Hz) presentan diferencias significativas entre las condiciones de correcto e incorrecto entre -4 y -3.3s y en 2s. Nótese que la mayor CC sobre T8 se mostró cada vez que el estudiante contestaba incorrectamente. Los altos valores de beta presentados se pueden asociar con la regulación atencional durante RN [3, 21]. Inesperadamente, la participación del hemisferio derecho, que se asocia más con tareas intuitivas que de razonamiento, parece indicar que el estudiante usa su intuición cuando desconoce la respuesta. Finalmente, la coherencia en delta entre -3 y 0 s sobre T8 podría relacionarse con la atención y toma de decisiones implicadas [22].

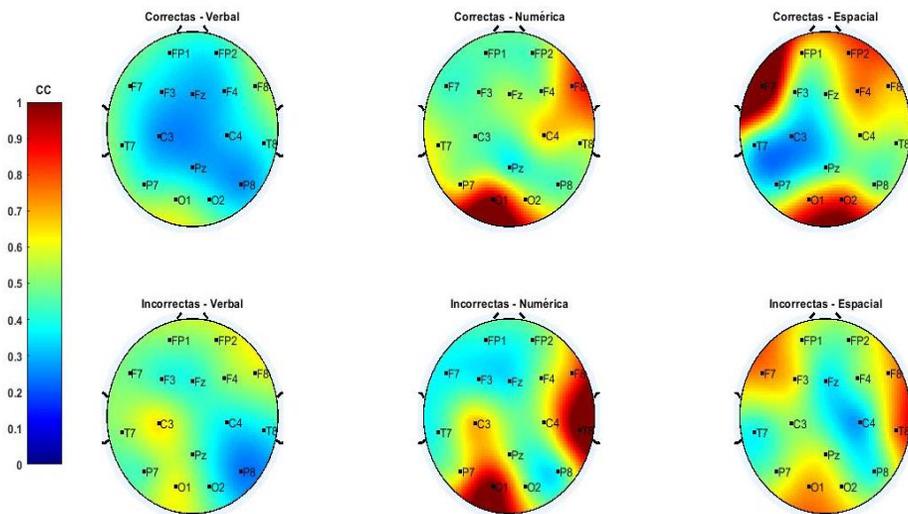


Fig. 2. Distribución topográfica de la carga cognitiva (CC). 5 segundos antes de que se ejecutara la respuesta, para cada tipo de razonamiento: Verbal, Numérico y Espacial. Tanto respuestas correctas e incorrectas.

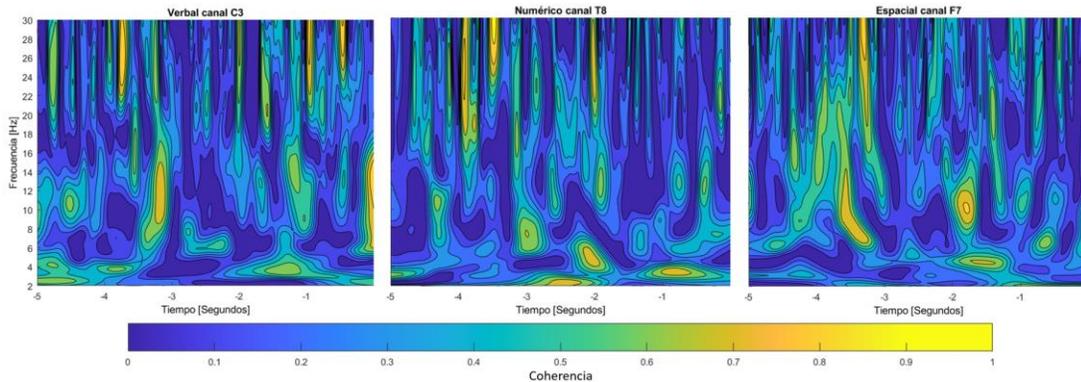


Fig. 3. Coherencia de los 5 segundos antes de proporcionar la respuesta sobre el ancho de banda de 2 a 30 Hz. Se muestra el canal más activo en términos de CC por prueba: C3 para RV, T8 para RN y F7 para RE.

Razonamiento Espacial. Los estudiantes de recién ingreso alcanzaron un desempeño moderado en el RE, invirtiendo mucho más tiempo para proporcionar la respuesta en comparación a las otras dos aptitudes. Cuando los estudiantes fueron asertivos presentaron mayor tiempo de respuesta y mostraron mayor CC sobre la región occipital (O1 y O2), frontal izquierdo (F7) y fronto-temporal derecha (Fp2, F4, F8, T8), en comparación a cuando cometieron un error. Uno de los puntos de registro de EEG con mayor diferencia de CC entre respuestas elegidas correcta e incorrectamente fue F7. En la Fig. 3, se puede observar que en general hay diferencias significativas entre ambas condiciones (baja coherencia), excepto por la coherencia alta en teta (alrededor de 4 Hz @ -2s), alfa (8-14 Hz @ -2, -3 y -4) y beta (20-30 Hz @ -3s) en frecuencias y tiempos particulares. La presencia común de alfa podría deberse al desempeño de actividad, mientras que beta a la concentración activa [23].

4. Conclusiones

Los estudiantes de recién ingreso con perfiles variados tuvieron mayor dificultad durante el RV, mostrando una mayor CC sobre las regiones centro-occipital izquierda (asociada con procesos lingüísticos) y frontal derecha (asociada con toma de decisión) cada vez que cometieron un error. Por el contrario, todos ellos alcanzaron mejor desempeño en el RN, donde su CC alcanzó mayor magnitud en las regiones frontal derecha y occipital izquierdo, tanto cuando acertaron como cuando se equivocaron. La única diferencia importante entre acierto y error se presentó en la región temporal derecha, que se asocia más con tareas intuitivas que de razonamiento. Por último, los estudiantes mostraron un desempeño regular en el RE, el cual les llevó más tiempo de respuesta, principalmente cuando la respuesta fue correcta. La CC alcanzó mucho mayor magnitud en respuesta correctas sobre la región frontal (asociada a funciones ejecutivas) y occipital (asociada a la decodificación de información visuoespacial). Concluimos que CC es una neurométrica apropiada para evaluar la cantidad y la distribución de los recursos mentales usando durante el RN y RE. Sin embargo, para RV será necesario explorar otras técnicas de análisis de bioseñales. El procesamiento de señales para extraer características de EEG con diferentes enfoques tales como: no lineal utilizando dimensiones fractales [24], transformada de onda discreta [25], análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia [21], entre otras, pudiesen ser factibles, pero computacionalmente costosos. La literatura indica que el uso del aprendizaje profundo también puede ser una alternativa con la ventaja de reducir la complejidad de

extracción de características, y por ende el tiempo de estimación, en comparación a los métodos mencionados anteriormente [26].

Adicionalmente, es necesario profundizar aún más en la evolución de los alumnos durante el proceso de aprendizaje con metodologías innovadoras. Por lo tanto, como trabajo a futuro, se buscará evaluar en términos de competencias transversales, y no solo disciplinares, tales como: Pensamiento crítico (razonamiento para la complejidad), lenguaje escrito (comunicación), y cultura digital (transformación digital).

Declaración de conflictos de interés

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

Agradecimientos

Se agradece la colaboración constante y comprometida de los siguientes exalumnos, sin su participación no hubiera sido posible el diseño experimental del presente proyecto: André Cornejo, Roberto Borboa Gastelum, Ana Belinda Martínez Leñero. Adicionalmente se agradece al programa NOVUS por apoyar económicamente esta investigación.

Referencias

- [1] O. M. González-Cuevas, "Evaluación de opción múltiple v.s. evaluación tradicional. Un estudio de caso en ingeniería," *Ingeniería*, vol. 7, no. 2, pp. 17-37, 2003.
- [2] J. S. Kang, A. Ojha, G. Lee y M. Lee, "Difference in brain activation patterns of individuals with high and low intelligence in linguistic and visuo-spatial tasks: An EEG study", *Intelligence*, vol. 61, pp. 47-55, 2017.
- [3] A. A. González-Garridoet, *et al.*, "The analysis of EEG coherence reflects middle childhood differences in mathematical achievement," *Brain and Cognition*, vol. 124, pp. 57-63, 2018.
- [4] D. Papuc, *et al.*, "Brain Activation and Cognitive Load during EEG Measured Creativity Tasks Accompanied by Relaxation Music," *CHIRA*, Funchal, Portugal, 2017.
- [5] J. J. Green, *et al.*, "Cortical and subcortical coordination of visual spatial attention revealed by simultaneous EEG-fMRI recording," *The Journal of Neuroscience*, vol. 37, no. 33, pp. 7803-7810, 2017.
- [6] C. Mills, et al, "Put Your Thinking Cap On: Detecting Cognitive Load using EEG during Learning," in *LAK2017*, Vancouver, Canada, 2017.
- [7] P. Antonenko, F. Paas, R. Grabner, & T. Van Gog, "Using electroencephalography to measure cognitive load," *Educational Psychology Review*, Vol. 22, no. 4, pp. 425-438, 2010.
- [8] C. Liang, Y. C. Liu, Y. Chang y C. T. Liang, "Differences in numeric, verbal, and spatial reasoning between engineering and literature students through a neurocognitive lens," *Cognitive Systems Research*, vol. 60, pp. 33-43, 2020.
- [9] N. Jausøvec, "Differences in Cognitive Processes Between Gifted, Intelligent, Creative, and Average Individuals While Solving Complex Problems: An EEG Study," *Intelligence*, vol. 28, no. 3, pp. 213-237, 2000.
- [10] J. B. Biggs y K. F. Collis, "Educational Psychology," in *Evaluating the quality of learning: The SOLO taxonomy (Structure of the Observed Learning Outcome, The Educational Psychology Series*, fist ed. New York, U.S.: Academic Press, 2014, ch. 10, sec. III, pp. 207-235

- [11] P. Antonenko, F. Paas, R. Grabner y T. Van Gog, "Using Electroencephalography to Measure Cognitive Load," *Educational Psychology Review*, vol. 22, no. 4, pp. 425-438, 2010.
- [12] G. S. H. y. W. A. Bennett, "Prueba de Aptitud Diferencial," vol. 5° ed. Madrid: TEA Ediciones, 2006.
- [13] A. Delorme y S. Makeig, "EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG," *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 134, no. 1, pp. 9-21, 2004.
- [14] I. Winkler, S. Haufe y M. Tangermann, "Automatic Classification of Artifactual ICA-Components for Artifact Removal in EEG Signals," *Behavioral and Brain Functions*, vol. 7, no. 1, pp. 30, 2011.
- [15] F. G. Freeman, P. J. Mikulka, L. J. Prinzel y M. W. Scerbo, "Evaluation of an adaptive automation system using three EEG indices with a visual tracking task," *Biological psychology*, vol. 50, no. 1, pp. 61-76, 1999.
- [16] J. K. Nuamah y Y. Seong, "Support vector machine (SVM) classification of cognitive tasks based on electroencephalography (EEG) engagement index," *Brain-Computer interfaces*, vol. 5, no. 1, pp. 1-12, 2018.
- [17] D. K. J. & H. M. Maraun, "Nonstationary Gaussian processes in wavelet domain: Synthesis, estimation, and significance testing," *Physical Review E*, vol. 75, no. 1, pp. 016707, 2007.
- [18] M. T. J. K. B. & M. C. Hassan, "Application of wavelet coherence to the detection of uterine electrical activity synchronization in labor," *IRBM*, vol. 31, no. 3, pp. 182-187, 2010.
- [19] M. Akin, "Comparison of Wavelet Transform and FFT Methods," *Plenum Publishing Corporation*, vol. 26, no. 3, pp. 241-247, 2002.
- [20] A. Gevins, M. E. Smith, L. McEvoy y D. Yu, "High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: Effects of task difficulty, type of processing, and practice.," *Cerebral Cortex*, vol. 7, no. 4, pp. 374-385, 1997.
- [21] A. K. Engel y P. Fries, "Beta-band oscillations—signalling the status quo?," *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 20, no. 2, pp. 156-165, 2010.
- [22] P. Zarjam, J. Eppe, F. Chen y N. H. Lovell, "Estimating cognitive workload using wavelet entropy-based features during an arithmetic task.," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 43, no. 12, pp. 2186-2195, 2013.
- [23] K. Jurewicz, et al., "EEG-neurofeedback training of beta band (12-22Hz) affects alpha and beta frequencies – A controlled study of a healthy population," *Neuropsychologia*, vol. 108, pp. 13-24, 2018.
- [24] M. Bachmann, J. Lass, A. Suhhova y H. Hinrikus, "Spectral Asymmetry and Higuchi's Fractal Dimension Measures of Depression Electroencephalogram," *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2013, pp. 8, 2013.
- [25] K. K. Shukla y Tiwari AK., "Efficient Algorithms for Discrete Wavelet," *Springer Science & Business Media*, pp. 21 - 36, 2013.
- [26] M. R. Islam, et al., "A Novel Mutual Information Based Feature Set for Drivers' Mental Workload Evaluation Using Machine Learning," *Brain Science*, vol. 10, no. 8, pp. 511, 2020.