



**Cuba Salud**

IV Convención  
Internacional de Salud  
17-21 de octubre, 2022

## **Pipeline para la fusión de datos espacio-temporales multimodales de cerebro: EEG-fMRI**

Wildys De La Cruz Olivares  
Dr.C. Arturo Orellana García

Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba, contacto: aorellana@uci.cu

**Resumen:** Aún existen diversos estudios imagenológicos, que se analizan de manera separada por un experto para dar un diagnóstico único teniendo en cuenta ambas informaciones. Lo anterior disminuye la precisión del análisis al ser subjetivo y aumenta el tiempo necesario para llegar a resultados concluyentes. La comunidad científica busca fusionar la mayor cantidad de datos médicos apoyados de nuevos y novedosos algoritmos, siendo cada vez más eficientes y precisos.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un algoritmo de fusión de datos espacio temporales de estudios multimodales de Electroencefalograma (*EEG*) e Imagen por Resonancia Magnética Funcional (*fMRI*), que propicie aumentar su valor diagnóstico. Para ello se realizó un análisis de distintas investigaciones previas que permitieron identificar las mejores variantes a tener en cuenta para la propuesta de solución. Como ambiente de desarrollo se definieron un conjunto de herramientas y tecnologías idóneas para el contexto de la investigación como Python, *MNE*, *OpenCV* y *matplotlib*; además se empleó como herramienta de desarrollo *Visual Studio Code*.

A partir de lo anterior se obtuvo un pipeline definido por un conjunto de algoritmos de procesamiento de señales e imágenes, que en su ejecución propician obtener estudios fusionados de datos de neurociencias *EEG* y *fMRI*. Las pruebas realizadas a los algoritmos propuestos muestran un PSNR de valores que oscilan entre 27 a 32, siendo un valor positivo para la investigación.

**Palabras clave:** datos de Neurociencias, electroencefalograma, pipeline, Resonancia Magnética Funcional.

## I. INTRODUCCIÓN

Los métodos de fusión de neuroimágenes son ampliamente aplicados para diagnósticos y tratamiento del cerebro, donde las técnicas de fusión han sido demostradas para visualizar una mejora en el desempeño de diagnósticos e imágenes. (1)

Su primera utilización fue en 1993 y su primera aplicación clínica en 1996, los estudios simultáneos de *EEG-fMRI* se han convertido en una poderosa herramienta en la investigación de actividad espontánea y evocada en el cerebro. Sin embargo, abundantes problemas técnicos han surgido, como la aparición de artefactos inducidos por los campos producidos por el resonador, la seguridad del paciente, los problemas generados por los materiales en el ambiente de los campos magnéticos, así como la escogencia de la estrategia más adecuada para el análisis de los datos obtenidos. En la actualidad, se busca solucionar definitivamente estos problemas de manera tal que se obtengan los mejores resultados posibles, que conduzcan a nuevas posibilidades en la aplicabilidad clínica de *EEG-fMRI* simultáneos. (2)

Los resultados de las diferentes técnicas de fusión se extraen y luego se fusionan nuevamente implementando un método híbrido que presenta resultados de mejor calidad. Un solo método puede no resultar efectivo en la eliminación de los artefactos resonantes y el ruido en las imágenes de origen. Estos resultados deficientes en el desarrollo de reglas de fusión siguen un algoritmo híbrido y mejoran en gran medida la calidad visual de la imagen.

Las neuronas cerebrales se comunican a partir de impulsos eléctricos y están activas todo el tiempo, incluso mientras duermes. Esta actividad se manifiesta como líneas onduladas en un registro de electroencefalograma. Un electroencefalograma es capaz de determinar cambios en la actividad cerebral que pueden ser útiles para diagnosticar trastornos cerebrales, especialmente epilepsia u otros trastornos convulsivos. (3)

La *MRI* solo es posible generar una imagen de un momento específico. En otras palabras, no puede mostrarnos las diferencias de actividad del cerebro para diferentes estímulos o en diferentes condiciones. Por lo tanto, se desarrolló *fMRI*, permitiendo la generación de imágenes más dinámicas sobre el cerebro. (4)

En *fMRI* también se utiliza la energía liberada por los protones para también producir imágenes. La gran diferencia es que sus cálculos se centran en las diferencias en el flujo de oxígeno en la sangre. De esa manera, áreas más activas del cerebro deben tener niveles comparativamente más altos de oxígeno en la sangre que las áreas menos activas. Este tipo de respuesta se llamó BOLD (respuesta dependiente del nivel de oxigenación de la sangre). Esto implica una desventaja temporal para esta técnica. Como el flujo de sangre tarda algunos segundos para cambiar de un área para otra, es común que los participantes estén expuestos a una serie de repeticiones de estímulos para poder registrar las diferentes respuestas cerebrales. (4)

Áreas de investigación buscan la fusión de diversos tipos de estudios de imágenes médicas para mejorar los análisis o los diagnósticos a pacientes utilizando estos mismos de manera fusionada. La idea de la integración *EEG-fMRI* fue motivada clínicamente y su desarrollo impulsado por el deseo de los epileptólogos de localizar fuentes eléctricas de descargas epilépticas.

Los investigadores han llevado a cabo numerosos estudios de fusión de neuroimágenes en dominios espaciales y de transformación con diferentes técnicas de fusión, como la técnica de codificación de sub-bandas, el método de embolsado, la transformada de wavelet, transformada de Curvelet, entre otras. (5)

Estos algoritmos por separados proporcionan desventajas que incitan al uso de la fusión de dichas imágenes médicas como son las del *EEG*, de las cuales cabe mencionar que entre sus desventajas se encuentra que el registro debe ser realizado por un electroencefalografista experto en epilepsia, alta contaminación del *EEG* por artefactos provenientes del escáner de resonancia magnética que pueden distorsionar las IEDs, y la corta duración de la señal BOLD registrada ( $< 10s$ ) y entre las *fMRI* es que se prolonga el tiempo del experimento. (2)

Con el desarrollo de algoritmos de fusión se superan las limitaciones que presentan ambas técnicas cuando se ejecutan por separado, estas limitaciones son, por un lado, la baja resolución temporal del *fMRI* y por el otro, la baja resolución espacial de *EEG*. Combinando los datos obtenidos con cada técnica se pretende avanzar en el estudio funcional del cerebro. Para darle solución a ese problema se necesitó un método, que lograra la ejecución de diversos algoritmos para lograr la fusión *EEG-fMRI*. La ventaja del *EEG* sobre el *fMRI* es que está basada en el hecho de que los potenciales eléctricos son los efectos primarios de la excitación neuronal, mientras que los cambios metabólicos en el tejido cerebral medidos por *fMRI* son efectos secundarios. (2)

La utilización de las fusiones en los centros hospitalarios trae innumerables ventajas. El hecho de que no sea necesaria el análisis de estos estudios por separados y supervisados por un experto de dicha rama conlleva a una reducción en los costos y tiempo. La fusión permite consultar ambos estudios de manera conjunta que el profesional necesita para realizar un diagnóstico, lo que lo convierte en un proceso totalmente eficaz.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un algoritmo de fusión de datos espacio temporales de estudios multimodales de Electroencefalograma (*EEG*) e Imagen por Resonancia Magnética Funcional (*fMRI*), que propicie aumentar su valor diagnóstico.

## II. MÉTODO

Para la ejecución de la presente investigación se sigue una estrategia explicativa y se emplearon: los métodos: Análisis y Síntesis: análisis sobre los métodos de fusión de imágenes existentes, determinando los elementos que los componen, las funciones que cumplen y su importancia. Determinar que parámetros se deben tener en cuenta para la selección del método a utilizar. Mediante el método comparativo: establecer la comparación entre los diferentes métodos de fusión y poder establecer cuáles son los que van a utilizar para el desarrollo del Componente para la Fusión de Imágenes *EEG-fMRI*.

### A. Descripción de el Algoritmo de Fusión

La propuesta ha sido diseñada para el procesamiento de los datos de electroencefalogramas a partir de diversos algoritmos, los cuales generan imágenes (mapas de calor) para su posterior fusión con el *fMRI*. Los algoritmos aplicados son los siguientes:

- **Algoritmo ERP (Potencial Relacionado por Eventos):** posibilita el procesamiento de la señal (formato *.fif*) para la obtención de una imagen a manera de cabeza de visualización superior de la misma. Los *ERP* proporcionan un medio no invasivo para medir la actividad cerebral en humanos, y su resolución temporal de milisegundos y su resolución espacial gruesa complementan la resolución temporal gruesa y la resolución espacial fina de la resonancia magnética funcional (*fMRI*). Existe una herramienta usada para la obtención y monitorización de los ERP la cual es

ERPLAB desarrollada en Matlab. Se realizó a partir del uso y modificaciones de la librería *MNE*. (6)

- **Algoritmo CSP (Patrón Espacial Común):** posibilita el procesamiento de la señal (formato *.edf*) para la obtención de una imagen a manera de cabeza de visualización superior de la misma. El algoritmo *CSP* se ha utilizado para la extracción de características en sistemas *BCI* basados en *EEG* para imágenes motoras (*MI*). Como las señales de *EEG* tienen ruido y problemas de ajuste excesivo, se introducen varios algoritmos *CSP* regularizados para atender estos problemas, se utilizó un método estadístico basado en el límite *Bhattacharyya* de *CSP* para seleccionar los canales *EEG* relevantes para datos *MI* de 59 sensores. Se presentó el enfoque de reducción de canal basado en la utilización de los valores máximos de los vectores de patrones espaciales obtenidos de las matrices de filtro *CSP*. Se realizó a partir del uso y modificaciones de la librería *MNE*.
- **Interpolación Bicúbica:** Con el fin de fusionar dos imágenes, es necesario que ambas se encuentren en la misma resolución y tamaño, por lo que se utiliza la interpolación bicúbica para este proceso. Es este el utilizado de entre todos, debido que es el más utilizado para el procesamiento de imágenes médicas y el que mejores resultados a dado con respecto a los demás (interpolación por área, bilineal, vecino más cercano). (7)
- **Transformada Discreta de Wavelet:** Se usa para la extracción de los coeficientes de las imágenes a fusionar y selección del método de fusión del mismo, para luego en cada nivel de ambas imágenes realizar la fusión acorde a la opción deseada. Luego de fusionar estos coeficientes se aplica el regreso de la imagen y se normalizan los valores.(8)
- **Transformada Rápida de Curvelet:** Se extraen los coeficientes de las imágenes a fusionar, para luego obtener el índice del vector de curvelet tomando una dupla o lista. Se aplica el proceso y se normalizan los valores.(9,10)

*B. Análisis de diferentes resultados estadísticos de diversos procesos de fusión.*

Los algoritmos de fusión han sido ampliamente utilizados para el tratamiento de imágenes médicas digitales, por lo que cada uno presenta un valor a partir de la base de datos a utilizar. La eficiencia de un algoritmo varía según las bases de datos donde se ejecute, por lo que los autores de esta investigación recomiendan y proponen la ejecución de varios algoritmos y según los indicadores de calidad seleccionar el mejor resultado. La tabla 1 resume las pruebas ejecutadas en (8) con diferentes algoritmos y métricas.

Tabla 1 Resultados estadísticos de varios métodos de fusión (8)

Métodos de fusión	Entropía	RMSE	PSNR	CC	MI	Qab/f
Seleccionar máximo	6.63	4.248	29.56	0.61	5.23	0.55
Seleccionar mínimo	2.89	15.23	23.25	0.67	6.92	0.74
Promedio simple	4.23	13.23	27.32	0.71	4.81	0.65
Basado en componente	6.34	3.421	36.12	0.88	5.89	0.79

Transformada de Laplace	7.45	3.921	39.24	0.90	4.56	0.80
Transformada de Wavelet	7.77	3.442	29.33	0.92	6.23	0.89
Transformada de Curvelet	8.54	3.436	38.77	0.89	6.85	0.75
Transformada Híbrida	8.81	3.316	41.91	0.85	7.44	0.91

Para evaluar la calidad de las imágenes fusionadas se utilizan los parámetros de Entropía, Coeficiente de Correlación (CC, por sus siglas en inglés), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés), Relación Máxima Señal-Ruido (PSNR), Información mutua (MI, por sus siglas en inglés) y Asociación de Bordes (representado como  $Q_{ab/f}$ ). Se evaluaron estos parámetros para varios métodos de fusión obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 1. Para esta investigación resulta de alta relevancia los valores de PSNR, el cual permitirá seleccionar el mejor resultado al comparar los resultados de las fusiones.

### C. Descripción del Proceso de Fusión

El proceso de fusión de neuroimágenes se compone de diferentes pasos. Los cuales varían dependiendo del método de fusión a emplear. En este caso les expondremos las diferentes fases, teniendo en cuenta que sí se emplea la fase de registro (Véase Figura 1). Los pasos son los siguientes:

1. **Corregistro de las neuroimágenes a fusionar:** Consiste en realizar una transformación para establecer una correlación espacial entre las neuroimágenes (hacerlas coincidir en posición y tamaño).
2. **Registro:** Llevar las neuroimágenes al dominio deseado por el desarrollador (Wavelet, Curvelet, entre otros). Mejora el resultado de la fusión.
3. **Fusión (Reglas de Fusión):** La forma en la que son aplicadas las reglas de fusión afecta directamente a la calidad de la fusión final de las neuroimágenes. El algoritmo seleccionado puede trabajar por los diferentes valores sobre el dominio establecido en el paso anterior, o sobre los píxeles directamente.
4. **Inversa:** Se debe establecer la inversa del algoritmo seleccionado en el paso 2.
5. **Imagen Fusionada:** Se obtiene la imagen fusionada.

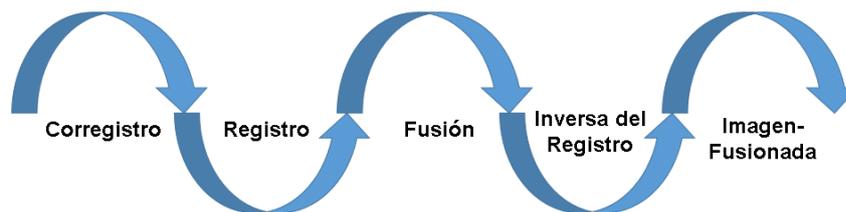


Figura 1. Proceso de Fusión. Fuente: los autores.

En el corregistro para la fusión de neuroimágenes *EEG/fMRI*, se necesita convertir la señal cargada EEG en una imagen para luego usarla en el proceso de Fusión. Esto se realiza a través de un algoritmo para la conversión de señales de electroencefalograma a imagen. Estas señales *EEG* son procesadas por

el algoritmo de Patrones Espaciales Comunes (*CSP* por sus siglas en inglés) y el Potencial Relacionado con Evento (*ERP* por sus siglas en inglés). Si las imágenes generadas por estos algoritmos no poseen la misma resolución y tamaño que la imagen *fMRI* estas deben ser tratadas para aumentar su resolución espacial (a partir de la Interpolación Bicúbica).

### III. RESULTADOS

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente en la descripción de el Algoritmo de Fusión. Se propone realizar un pipeline describiendo el proceso de fusión. Se utiliza Visual Paradigm como herramienta de modelado:

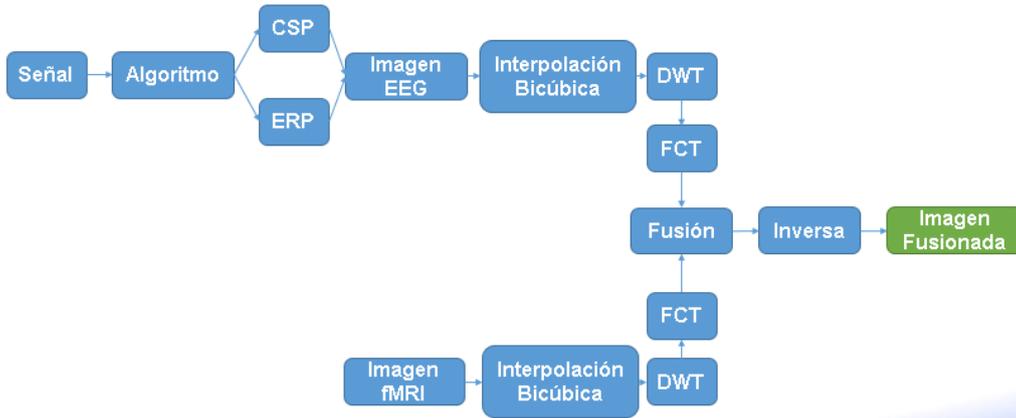


Figura 2. Pipeline propuesto para el proceso de fusión de datos *EEG-fMRI*. Fuente: los autores

La descripción del pipeline se realizará a partir de su ejecución utilizando un caso de prueba de las Base de Datos Internacional *MNE* (11) para el uso de datos *EEG* y Base de datos *fMRI* obtenidas de ImageProcessingPlace (12). Su primera entrada un *EEG* que va a ser procesada en el correregistro por los algoritmos *CSP* y *ERP*, obteniéndose los resultados:

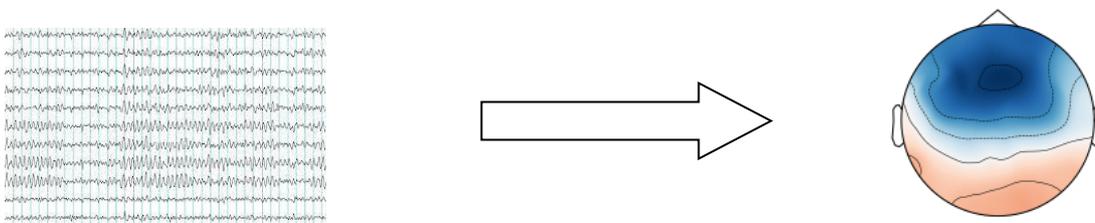


Figura 3. Transformación de la señal EEG a imagen. Fuente: los autores

A continuación, se carga la obtenida por los algoritmos descritos anteriormente junto a la Imagen por Resonancia Magnética Funcional (*fMRI*). Se le aplica el método de Interpolación Bicúbica debido que la imagen obtenida mediante los algoritmos de *CSP* y *ERP* se encuentra en una resolución de 256x206x3 mientras que la *fMRI* en una resolución de 256x256x3 o 512x512x3. De esta forma se llevan a la misma resolución y tamaño para ejecutar el proceso de fusión.

Teniendo como entrada el resultado del paso anterior se aplican la Transformada Rápida de Curvelet (*FCT* por sus siglas en inglés) y la Transformada Discreta de Wavelet (*DWT* por sus siglas en inglés). Se realiza el proceso de fusión y se ejecuta la inversa del proceso de registro (se normalizan todos los valores), para obtener la imagen fusionada. La figura 4 representa gráficamente lo expuesto previamente.

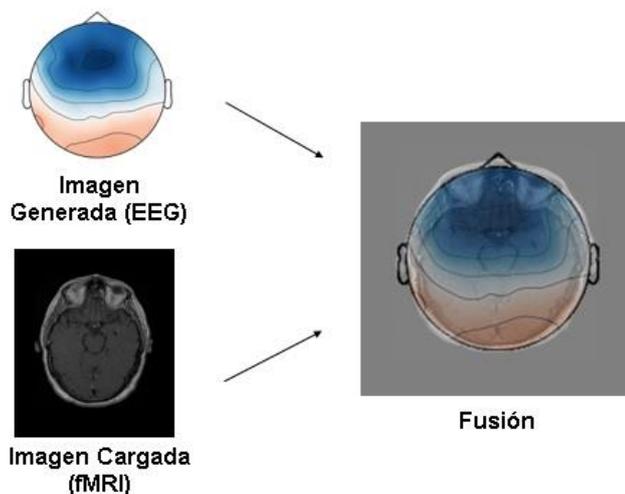


Figura 4. Visualización del proceso de fusión. Fuente: los autores

Se comparan los métodos de fusión de la literatura, ejecutados en las bases de datos seleccionadas con la fusión obtenida desde el pipeline propuesto en esta investigación. A partir de lo anterior se afirma que el algoritmo desarrollado proporciona mejores resultados, teniendo en cuenta el PSNR obtenido en cada caso. La Tabla 2 resume las pruebas realizadas y que corrobora las afirmaciones anteriores.

Tabla 2 Resultados estadísticos de los mejores métodos de fusión y el realizado por el autor. Fuente: los autores

Métodos de fusión	PSNR (EEG-Fusión)	PSNR (fMRI-Fusión)
Transformada de Wavelet	29.95	27.77
Transformada de Curvelet	28.72	28.96
Transformada Híbrida	29.44	29.91
Transformada Híbrida (Autor)	31.85	31.77

La calidad de una imagen digital se mide por tres parámetros: la resolución espacial, la resolución espectral y la relación señal-ruido (PSNR por sus siglas en inglés). La resolución espacial y la espectral están relacionadas con el número de píxeles de la imagen y el rango de valores que pueden tomar esos píxeles respectivamente. En una imagen cuadrada de  $N_x \times N_x \times k$ ,  $N$  está relacionado con la resolución espacial y  $k$  con la resolución espectral. Un valor de PSNR alto significa que la imagen tiene una señal fuerte y poco ruido y es, por tanto, una mejor calidad.

#### IV. CONCLUSIONES

Se definió que el esquema de fusión basado en la Fusión Híbrida resalta las características más prominentes de las imágenes.

Se determinó que las imágenes resultantes de la interpolación Bicúbica, a pesar de ser el procedimiento de mayor complejidad computacional, poseen mayor calidad que las de la interpolación por el Vecino Más Cercano y la interpolación Bilineal.

Se puntualizó que utilizar una *Transformada Discreta de Wavelet* distinta a la de *Haar* no aporta beneficios al proceso de fusión, a pesar de que posee la función de *Wavelet* más sencilla.

#### AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Oficina de Gestión de Fondos y Proyectos Internacionales bajo el código PN305LH013-038.

#### REFERENCIAS

1. Chowdhury RA, Zerouali Y, Hedrich T, Heers M, Kobayashi E, Lina JM, et al. MEG–EEG Information Fusion and Electromagnetic Source Imaging: From Theory to Clinical Application in Epilepsy. *Brain Topogr.* 2015;28(6):785-812.
2. Ramirez CAA, Bolivar EB. Actualidad en la investigación de electroencefalograma - resonancia magnética funcional simultáneos en el estudio de epilepsia y dolor. *Rev Cubana Invest Bioméd [Internet]*. 2013 [citado 12 de junio de 2022];32(1). Disponible en: <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=40584>
3. Ramos-Argüelles F, Morales G, Egozcue S, Pabón RM, Alonso MT. Técnicas básicas de electroencefalografía: principios y aplicaciones clínicas. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra.* 2009; 32:69-82.
4. ¿Cuáles son las diferencias entre EEG, MRI y fMRI? [Internet]. *BuscaEU.* 2020 [citado 9 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.brainlatam.com/blog/%C2%BFcuales-son-las-diferencias-entre-eeg-mri-y-%20fmri-1007>
5. Heiss WD. The potential of PET/MR for brain imaging. *European journal of nuclear medicine and molecular imaging.* 1 de marzo de 2009;36 Suppl 1: S105-12.
6. Garcell JR, Medina WR. Electroencefalograma y potenciales relacionados con eventos en el trastorno obsesivo compulsivo. 2009;32(2):10.
7. Fadnavis S. Image Interpolation Techniques in Digital Image Processing: An Overview. *International Journal Of Engineering Research and Application.* 1 de noviembre de 2014;4: 2248-962270.
8. Electronics J, Engg T, Barhatte A. Medical Image Fusion Based on Wavelet Transform and Fast Curvelet Transform. 25 de julio de 2020;2321-9939.
9. Amini N, Fatemizadeh E, Behnam H. MRI and PET Image Fusion by Using Curvelet Transform. 2014;5(4):8.
10. Mohali D, Mohali D. Review On: Image Fusion Using Wavelet and Curvelet Transform. 2014; 5:4.
11. MNE — MNE 1.0.3 documentation [Internet]. [citado 6 de julio de 2022]. Disponible en: <https://mne.tools/stable/index.html>
12. ImageProcessingPlace [Internet]. [citado 6 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.imageprocessingplace.com/>