

Espectroscopia infrarroja: una ventana al cerebro

Infrared spectroscopy: a window to the brain

Resumen: entre las técnicas que permiten conocer la función del cerebro, prácticamente en tiempo real, se encuentran la electroencefalografía y la espectroscopia funcional de cercano infrarrojo (fNIRS). Estas son consideradas técnicas de mínima invasión, ya que requieren al menos contacto con la piel de la persona a evaluar. La electroencefalografía mide la actividad eléctrica de las neuronas, utilizando métodos que registran la actividad, como sinapsis. La fNIRS mide los cambios en la concentración de oxígeno proporcionando información sobre procesos cognitivos, emocionales y neurológicos, útiles en investigaciones y diagnóstico clínico, permitiendo una mirada al cerebro.

Palabras clave: espectroscopia infrarroja, cerebro, hemoglobina, fNIRS.

Abstract: Among the techniques that allow us to know the function of the brain, practically in real time, are electroencephalography and Functional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS). In addition, they are considered minimally invasive techniques, as they require at least contact with the skin of the person to be evaluated.

Artículo de reflexión

•Recepción: 26/03/2025
•Aceptación: 21/07/2025

Marisol Solis Badillo

Lic. en Medicina, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

vera_solis98@hotmail.com

Carlos A. Reyes García

Ing. Industrial en Producción, MSc., PhD. Ciencias de la computación, INAOE, México.

kargaxxi@inaoep.mx

Manuel Alejandro Ramírez Cruz

Ing. Biomédico, MSc. Ciencias y Tecnologías Biomédicas, INAOE, México.

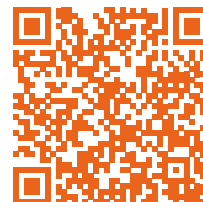
manuel.ramirez@inaoep.mx

Anabel Socorro Sánchez Sánchez

Lic. en Optometría, MSc., PhD. Ingeniería Eléctrica, INAOE, México.

anabel@inaoep.mx

Como citar este artículo / To reference this article: M. S. Badillo, C. A. Reyes, M. A. Ramírez y A. S. Sánchez, "Espectroscopia infrarroja: una ventana al cerebro". *Punto de inflexión*, vol. 2, no. 1, e-1251, 2026, doi: 10.22579/30286425.1251



a Electroencephalography measures the electrical activity of neurons, using methods that record the activity, such as synapses. (fNIRS) measures changes in oxygen concentration providing information on cognitive, emotional and neurological processes, useful in research and clinical diagnosis, allowing a glimpse into the brain.

Keywords: Infrared Spectroscopy, Brain, Hemoglobin, fNIRS.

Introducción

El cerebro se considera el centro de información y procesamiento del cuerpo humano; cada parte que lo integra cumple con una función y tiene una característica en particular que en conjunto logran su adecuado funcionamiento. Recibe la información de nuestro entorno a través de los órganos sensoriales para posteriormente realizar su procesamiento, generando así pensamientos, ideas y reacciones, que a su vez se convierten en señales que serán enviadas a todo el organismo para actuar apropiadamente.

El cerebro está dividido en dos hemisferios: el derecho, que se encarga del control del pensamiento espacial (forma, tamaño, ubicación, orientación), y el izquierdo, que controla el habla y la abstracción. Estos contienen pliegues y circunvoluciones en la superficie, cuentan con una capa externa de materia gris llamada corteza cerebral y una capa interna de materia blanca.

El cerebro también se encuentra compuesto por cuatro lóbulos: lóbulo frontal, encargado de la función motora, el lenguaje y procesos cognitivos; lóbulo parietal, responsable de la interpretación de la audición, visión, memoria, funciones sensoriales y motoras; lóbulo

temporal, asociado con la comprensión del lenguaje hablado, escrito, percepción espacial, visual; y el lóbulo occipital encargado de interpretar la información visual.

Por su parte, el cerebelo está formado por la corteza cerebelosa que consta de tres capas -molecular, de Purkinje y granular- y núcleos cerebelosos profundos. Controla la coordinación de los movimientos voluntarios para lograr su precisión y exactitud, interactuando directamente con el cerebro y la médula espinal.

Finalmente, el tronco encefálico, contiene el mesencéfalo, la protuberancia y la médula, conecta el cerebro y el cerebelo con la médula espinal, albergando los principales centros que realizan funciones autónomas como la respiración. En él también está presente la sustancia blanca que desciende desde la corteza cerebral, para la función motora voluntaria, y asciende desde la médula espinal y nervios periféricos para lograr que las señales lleguen y sean transmitidas hasta la parte más alta del cerebro [1].

Debido a la complejidad de su estructura y su funcionamiento, en los trabajos de investigación relacionados con la salud neurológica, un objetivo permanente es contribuir a la comprensión de cómo opera este órgano.

Esta motivación ha dado paso a la creación y desarrollo de herramientas que permiten conocer la actividad cerebral en tareas o acciones específicas.

Evaluación de la función cerebral dentro de la práctica médica

En el ejercicio de la medicina, se han empleado distintas pruebas diagnósticas para el estudio de la función cerebral, que permiten conocer el estado neurológico, mental, motor o sensorial de cada persona: desde la más básica, hasta un examen neurológico consistente en una serie de ejercicios y pruebas que evalúan cada uno de los pares craneales. Así mismo, se hace uso de evaluaciones que incorporan avances científico-tecnológicos, representados por estudios realizados con equipos especializados que registran el comportamiento del cerebro a través de sus propiedades biológicas.

En relación con estos avances, la electroencefalografía (EEG) es el estudio más conocido. Consiste en el registro de la actividad eléctrica originada a partir de la comunicación neuronal en el cerebro; es decir, su registro se basa en el campo eléctrico producido a partir de los potenciales postsinápticos que ocurren cuando varias neuronas de una zona del cerebro se están comunicando entre sí. Esto se detecta desde la superficie del cráneo colocando electrodos en distintas áreas del cuero cabelludo,

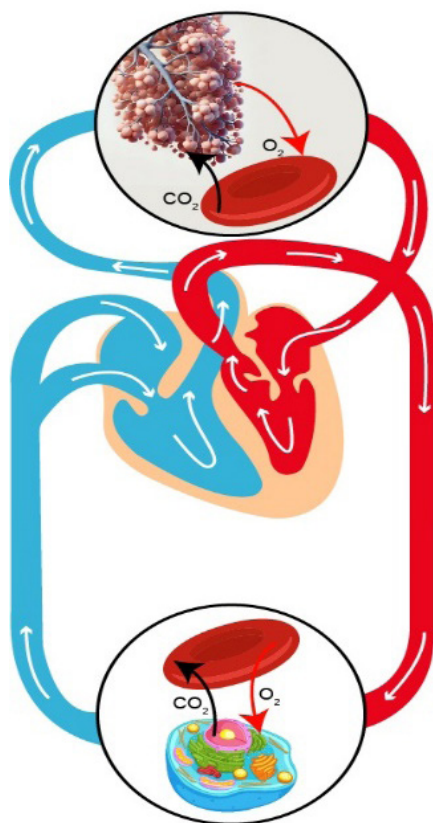
mientras el individuo es estimulado según la patología que se pretende analizar, permitiéndonos obtener un diagnóstico funcional. Otro de los estudios mejor conocido y especialmente recurrente en exploraciones cerebrales, es la resonancia magnética (RM), que opera mediante el uso de campos magnéticos y de radiofrecuencia. El uso de esta técnica da como resultado imágenes estáticas de las zonas deseadas, aunque también existe una variante que permite registrar la actividad cerebral en tiempo real mientras se ejecuta alguna tarea. Hablamos de la resonancia magnética funcional (*functional magnetic resonance imaging -fMRI-*). Esta registra las zonas del cerebro que se activan cuando se realiza una acción, provocando un incremento local del flujo sanguíneo y de los niveles de oxígeno; estos cambios son detectados en el estudio, específicamente a través de la hemoglobina (Hb), un cromóforo contenido en la sangre, y la relación entre sus formas oxigenada (HbO) y desoxigenada (HbR).

Hemoglobina: estructura, función y relación con el cerebro

La hemoglobina (Hb) es una proteína contenida en los glóbulos rojos, que puede dividirse en dos tipos de acuerdo con sus principales funciones: la HbO transporta el oxígeno hacia los tejidos, su color rojo hace alusión a las arterias; por su parte, la HbR, devuelve el dióxido

de carbono a los pulmones después de haber liberado el oxígeno, ubicándose en la sangre venosa (Fig. 1).

Fig. 1. Función de la hemoglobina



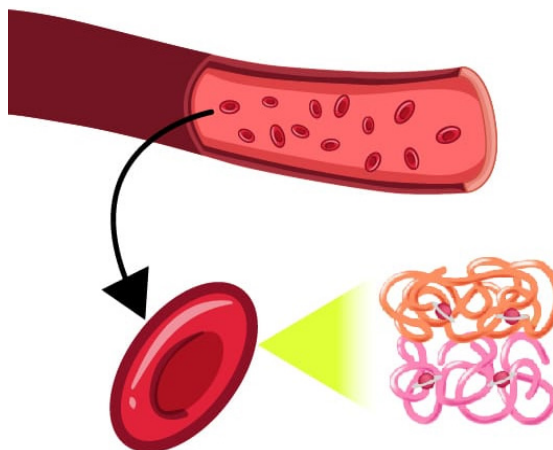
Viaja a través de los vasos sanguíneos desde el corazón hacia los pulmones, en donde se encarga del intercambio gaseoso a nivel de los alvéolos al introducir oxígeno y llevarse CO₂. Participa a nivel de los organelos en la mitocondria, para proporcionar oxígeno a todo el cuerpo.

Desde 1849, la Hb se convirtió en la primera proteína en ser asociada con una función fisiológica específica y se considera como un elemento fundamental en la respiración celular y su metabolismo energético.

Su estructura está formada por cuatro componentes: dos unidades conocidas con el nombre de alfa globina (Hba) y dos unidades denominadas beta globina

(Hbb), siendo indispensables para la unión y transporte de oxígeno (Fig. 2).

Fig. 2. Representación gráfica del origen de la hemoglobina y su estructura



Se encuentra en los vasos sanguíneos dentro de los glóbulos rojos (eritrocitos) y está formada por sus cuatro subunidades: dos alfas y dos beta que se unen al oxígeno.

Anteriormente era asociada sólo al torrente sanguíneo, pero ahora hay constancia de su presencia en el cerebro, lo que ha creado la nueva denominación de neuro hemoglobina (nHb), misma que conserva su estructura y ejerce las actividades bioquímicas asociadas en las células eritroides.

En general, se ha encontrado que la Hb se expresa localmente en todo el cerebro, actuando como una entidad de almacenamiento de oxígeno y está involucrada en la función mitocondrial [2]; sin embargo, la nHb constituye entre el 1% - 5% de la Hb total en el cerebro, lo cual la hace relevante en estudios que se basan en la medición de estas concentraciones, ejemplo de ello son las resonancias previamente mencionadas y la espectroscopia del cercano infrarrojo.

Conociendo la espectroscopia infrarroja

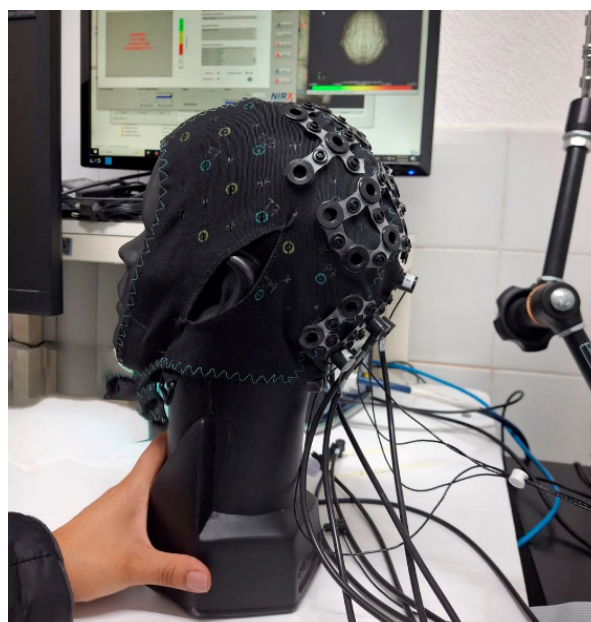
la espectroscopia funcional del infrarrojo cercano (*functional near infrared spectroscopy* -fNIRS-), es una técnica no invasiva usada para la exploración de la actividad cerebral que al igual que fMRI, se basa en la hemoglobina para detectar las zonas de activación. Pero, a diferencia de la resonancia que se basa en las características magnéticas de la proteína, este tipo de espectroscopia considera las propiedades de absorción de luz dependientes del oxígeno, lo que representa una ventaja al no requerir una infraestructura tan compleja, y permite mayor movilidad y variedad de aplicaciones. Estos equipos pueden usarse en situaciones de movimiento, ya que incluso existen dispositivos portátiles.

El tejido humano reacciona de distintas maneras al interactuar con la luz dependiendo del rango del espectro electromagnético aplicado, en un efecto relacionado con la absorción. En el caso del infrarrojo cercano (~700 nm-900 nm), una longitud próxima al rango de la luz visible (~380 nm a 780 nm), se pueden destacar cuatro relaciones principales: en un rango menor a los 700 nm, el principal absorbente de la luz es el tejido humano; en un valor aproximado a los 760 nm, el mayor absorbente es HbR; aproximadamente en 850 nm, el mayor absorbente es HbO, y a partir de 900 nm, el mayor absorbente es el agua. Esta relación es el principio que utiliza

fNIRS para determinar el flujo sanguíneo y los niveles de actividad cerebral.

Un equipo de espectroscopia del infrarrojo cercano consta básicamente de los diodos emisores de luz -que pueden ser de tipo LED, o incluso láser, y operan en los valores correspondientes a HbO y HbR-, los diodos detectores -son sensores ópticos adecuados al rango del cercano infrarrojo- y la unidad de procesamiento. Los optodos son colocados sobre el cráneo de los sujetos, por medio de una especie de gorro diseñado para configurar la disposición de acuerdo con las zonas de interés (Fig. 3).

Fig. 3. Ejemplo de un equipo de fNIRS



Se utiliza un gorro para colocar los diodos emisores y detectores sobre la cabeza. La actividad puede ser seguida en tiempo real.

En un estudio típico de esta categoría, los sujetos son instruidos para realizar tareas específicas basadas en el tipo de actividad que se desea analizar. Cuan-

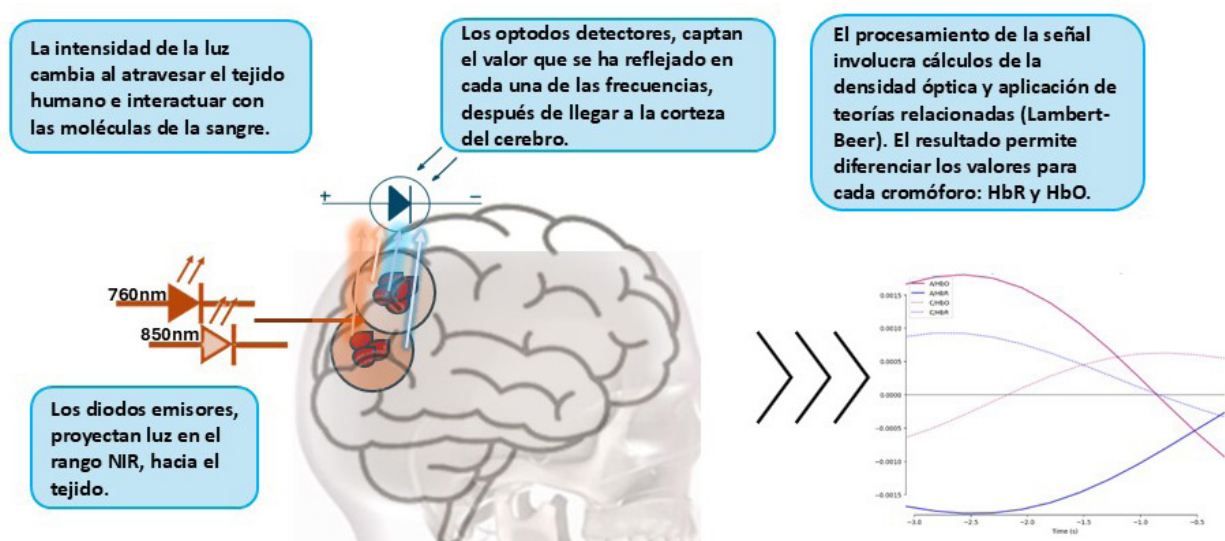
do los sujetos se encuentran portando el gorro con la configuración establecida, los diodos emisores actúan sobre el cuero cabelludo de los individuos, lanzando haces luminosos en las frecuencias donde los mayores absorbentes sean HbO y HbR (normalmente en 760 nm y 850 nm, respectivamente). Después de atravesar el tejido humano e interactuar con las moléculas en la sangre, una cantidad de luz es captada a través de los diodos detectores, otorgando los valores que permiten medir la actividad en las distintas zonas del cerebro, con base en la respuesta hemodinámica. Se debe tener en cuenta que las áreas cerebrales varían su actividad dependiendo de las acciones que los individuos realizan; cuando una neurona, que es la principal célula del sistema nervioso, tiene mayor actividad, también incrementa su metabolismo, lo que la lleva a demandar mayor cantidad de oxígeno y, en conse-

cuencia, los valores de la hemoglobina también son alterados (Fig. 4.).

Al llevar a cabo estudios con esta tecnología, que es una técnica óptica, es preferible ejercer una especie de control sobre las condiciones luminosas del ambiente; sin embargo, también pueden ser llevados a cabo en el exterior, considerando este factor al momento de procesar las señales.

Gracias a la practicidad de su principio de operación, las dimensiones de los equipos de fNIRS no son extensas y, en cambio, lo convierte en una tecnología muy práctica para su utilización en situaciones más próximas a la interacción de las personas con el ambiente. Incluso su tecnología se ha llevado a la instancia de equipos portátiles, útiles en evaluaciones que involucran movimiento. Se ha usado principalmente en trabajos de investigación, aunque recientemente

Fig. 4. Diagrama del funcionamiento de fNIRS



se analiza su impacto como método de diagnóstico, ya que proporciona datos cuantitativos (generados por la intensidad de los espectros de infrarrojo) y cualitativos (basados en la absorción), generando información sobre los enlaces químicos y su entorno molecular. El análisis de la medición de energía vibracional molecular de la hemoglobina tanto oxigenada como desoxigenada, genera una huella digital única que permite detectar anomalías moleculares en la sangre sin usar procedimientos invasivos, permitiendo el análisis y detección de algunas patologías hematológicas como anemia y leucemias [3].

Aplicaciones de la espectroscopia del infrarrojo cercano

Estudios llevados a cabo con este método han permitido avanzar en el conocimiento de las funciones y comportamiento cerebral desde otro punto de vista. Entre estos destaca:

a) El estudio realizado en pacientes neonatos, para calcular el volumen sanguíneo cerebral total, concluyendo que el volumen sanguíneo cerebral disminuye durante el período de transición inmediata fetal a neonatal, mostrando una relevancia significativa para los prematuros, ya que se observó un aumento después de las 12 a 48 horas posteriores de vida extrauterina [4].

b) Otro aporte relevante fue la comparación realizada en la respuesta de la

corteza cerebral en pacientes con glaucoma de ángulo cerrado y de ángulo abierto encontrando como resultado una reducción de la actividad cortical visual, concluyendo que la gravedad de la enfermedad parece estar estrechamente relacionada con la actividad de la corteza visual, destacando que la espectroscopia podría ser útil en la evaluación de los cambios hemodinámicos y neurodegenerativos del glaucoma [5].

Al mencionar algunos de los hallazgos que se han presentado gracias a esta técnica, nos permite darnos una idea de la variabilidad de campos en los que puede ser aplicada, así como la utilidad, impacto y cambio que podría representar dentro del área de la salud, para lograr una mejora en la atención y el diagnóstico de patologías presentes.

Referencias

- [1] K. A. Maldonado and K. Alsayouri. (2023). Physiology, brain. [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK551718/>
- [2] M. Walser et al., "Growth hormone and neuronal hemoglobin in the brain—roles in neuroprotection and neurodegenerative diseases", *Frontiers in endocrinology*, vol. 11, pp. 606089, 2021, doi: 10.3389/fendo.2020.606089.
- [3] C. Delrue, "Infrared spectroscopy: A new frontier in hematologi-

- cal disease diagnosis”, *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 23, pp. 17007, 2023, doi: [10.3390/ijms242317007](https://doi.org/10.3390/ijms242317007).
- [4] C. H. Wolfsberger, A. Avian, B. Schwabegger, G. Pichler, M. Wolf and B. Urlesberger, “Precision and normal values of cerebral blood volume in preterm neonates using time-resolved near-infrared spectroscopy”, *Acta Paediatrica*, vol. 113, no. 4, pp. 667–683, 2024, doi: [10.1111/apa.17040](https://doi.org/10.1111/apa.17040).
- [5] H. Angku, “Evaluation of Visual Cortex Activity Using Functional Near-Infrared Spectroscopy in Primary Open Angle and Primary Angle Closure Glaucoma: A Pilot Study”, *Journal of Glaucoma*, vol. 33, no. 9, pp. 624–631, 2024, doi: [10.1097/IJG.0000000000002427](https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000002427).
- [6] K. Kazazian, “Functional near-infrared spectroscopy: A novel tool for detecting consciousness after acute severe brain injury”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 121, no. 36, pp. e2402723121, 2024, doi: [10.1073/pnas.2402723121](https://doi.org/10.1073/pnas.2402723121).