

LA RESONANCIA MAGNETICA FUNCIONAL: UNA NUEVA TECNICA PARA EL ESTUDIO DE LAS BASES CEREBRALES DE LOS PROCESOS COGNITIVOS

Pere Vendrell, Carme Junqué y Jesús Pujol

Universidad de Barcelona

Las técnicas de neuroimagen funcional permiten visualizar las zonas cerebrales discretas que se activan mientras se está realizando una tarea cognitiva o una operación mental. La resonancia magnética funcional (RMf) es una nueva técnica de neuroimagen funcional que ofrece notables ventajas sobre las anteriores, como la tomografía por emisión de positrones (TEP). La RMf posee una mayor resolución temporal y espacial, y carencia de efectos nocivos. Por ello la RMf aparece como la técnica más adecuada para el estudio de la fisiología cerebral de las funciones cognitivas.

Functional Magnetic Resonance Imaging: A new technique to study the cerebral basis of cognitive processes. Functional neuroimaging allows the visualization of discrete cerebral areas which are activated during the performance of cognitive tasks or mental operations. Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is a new technique that offers evident advantages over the previous ones, such as the positron emission tomography (PET). Functional magnetic resonance imaging has greater spatial and temporal resolution than other neuroimaging techniques and is a non-invasive procedure. Hence, it can be considered the most suitable technique for the cerebral physiological research of the cognitive functions.

Los métodos que registran los cambios de la actividad cerebral (electromagnética o metabólica) producidos por la manipulación de variables conductuales se denominan corrientemente métodos funcionales. Las técnicas utilizadas por estos métodos pueden ser, según la naturaleza del registro que realizan, de tipo electromagnético, como la electroencefalografía (EEG) y la magnetoencefalografía (MEG) o de tipo metabólico, como la tomografía por emi-

sión de positrones (TEP), la tomografía computadorizada por emisión de fotones simples (SPECT) y la resonancia magnética funcional (RMf).

En los últimos años, el progreso de las técnicas de neuroimagen funcional ha permitido visualizar como áreas discretas del encéfalo se activaban de forma contingente con la realización de tareas cognitivas concretas (Posner, 1993; Posner y Raichle, 1994; Raichle, 1994).

La neuroimagen funcional permite comprender cómo las distintas regiones cerebrales se orquestan para ejecutar tareas complejas como leer, memorizar o percibir el espacio. Usando el método no

Correspondencia: Pere Vendrell
Departamento de Psiquiatría y Psicobiología Clínica,
Universidad de Barcelona. Facultad de Psicología
Paseo Valle Hebrón, 171. 08035 Barcelona. Spain

invasivo funcional de imágenes por resonancia magnética es posible localizar activación cerebral en individuos normales con una precisión de milímetros y una resolución temporal de segundos. Ello facilitará, en un futuro próximo, conocer con más precisión la organización funcional topográfica del cerebro humano.

Recientemente, en 1993, se han publicado los primeros resultados de los estudios de localización de funciones cognitivas que han utilizado la técnica de resonancia magnética funcional. En este artículo comentamos el potencial y los límites de esta nueva técnica.

Primeras imágenes del cerebro en acción: La Tomografía por emisión de positrones

La técnica de neuroimagen funcional que goza de una trayectoria más dilatada y que ha afianzado mayormente su prestigio es la Tomografía por emisión de positrones (TEP). Esta técnica apareció en la década de los 70 cuando el procedimiento tomográfico de neuroimagen estructural (tomografía computadorizada) ya habían consolidado su prestigio. Existían como antecedentes en el campo de las medidas funcionales de la actividad cerebral, las técnicas denominadas de registro del flujo sanguíneo cerebral regional (FSCr). Estas técnicas utilizaban gases radioactivos como el xenon 133 para detectar los aumentos regionales del flujo sanguíneo cerebral en relación a la ejecución de tareas mentales. Tenían importantes limitaciones tanto desde el punto de vista de los riesgos que asumían los sujetos de experimentación, como por la debilidad de los resultados obtenidos. Así, los primeros investigadores utilizaron la vía de la inyección carotídea para la introducción del isótopo, un procedimiento altamente agresivo que limitaba muy seriamente su utilización (Ingvar y Lassen, 1976). Por otro lado, el

sistema de detección de las radiaciones del isótopo sobre el cráneo no utilizaba un procedimiento tomográfico sino planar, por lo cual, la información resultante no era de naturaleza espacial. Además, el número de detectores empleado era reducido, por lo que su resolución espacial era más bien escasa. Posteriormente, se utilizó el xenon inhalado en lugar de la inyección carotídea lo cual disminuyó la agresividad de la prueba, pero sin que se mejorasen las limitaciones de su pobre resolución espacial y aumentando el nivel de error debido al incremento de la complejidad de los cálculos matemáticos necesarios, al no usarse una vía directa como la carótida y partir de la difusión del gas a través de los pulmones, lo que añadía otras fuentes de error (Vinod y Meyer, 1978).

Así, la TEP recogió la experiencia de las técnicas de FSCr y los avances tecnológicos de las imágenes por tomografía computadorizada (TC) que permiten reconstruir una imagen tomográfica a partir del análisis de la información sobre un punto del espacio contemplado desde distintos ángulos, es decir empleando la técnica del barrido («scanner»). Tanto una como otra progresaban a caballo de los avances tecnológicos en el campo de los ordenadores y del aumento en la capacidad y velocidad de cálculo de éstos, sin los cuales ninguna técnica tomográfica sería posible.

La TEP se ha ido introduciendo muy lentamente en la investigación debido a su alto coste y dificultades tecnológicas. Los isótopos emisores de positrones (fotones duales) han de producirse en un ciclotrón (acelerador de partículas) ubicado en las propias instalaciones de la TEP, dado que la vida media de éstos es muy corta, yendo de segundos a minutos. Estos isótopos se han de integrar químicamente en radiofármacos de conducta biológica conocida para poder ser usados.

La confluencia de tres experiencias previas, la medida del FSCr, la tomografía computarizada y la autorradiografía hace posible la aparición y posterior desarrollo de la TEP. La medida de las tasas metabólicas regionales de glucosa es la técnica más usada. Se realiza marcando glucosa con flúor-18 en forma de [¹⁸F]2-fluoro-2-deoxi-D-glucosa (¹⁸FDG) que tiene una vida media de 121 minutos y también con carbono-11 en forma de [¹¹C]—2-deoxi-D-glucosa (¹¹C-2DG) que tiene una vida media de 21 minutos. Esta técnica es por su naturaleza bioquímica y fisiológica. La TEP puede usarse para medir el metabolismo cerebral, el flujo y el volumen sanguíneo, la utilización de oxígeno, la síntesis de neurotransmisores y la unión a receptores. La resolución espacial de la TEP es de aproximadamente 125 mm cúbicos (5x5x5 mm). La resolución temporal es baja y dependiendo del trazador utilizado se halla entre los 5-30 minutos. Los tomógrafos modernos son capaces de muestrear todo el contenido intracraneal y los estudios pueden repetirse con una frecuencia de tan sólo 10 minutos usando isótopos de vida media ultracorta, pero teniendo en cuenta que la radiación ionizante es nuevamente administrada en cada sesión. Los estudios de la activación cerebral con la TEP se realizan en numerosos laboratorios de todo el mundo (unos cien) como un procedimiento capaz de determinar la distribución cerebral de los procesos sensoriales, motores y cognitivos (Heiss, Herholz, Pawlik, Wagner y Wienhard, 1986).

Aportaciones de la TEP al conocimiento de las funciones cerebrales

Se han realizado básicamente dos tipos de diseños neuropsicológicos con la TEP. Un primer tipo de diseño tiene como objetivo detectar los patrones metabólicos que permiten distinguir grupos de sujetos,

por ejemplo, controles de esquizofrénicos. Un segundo tipo de diseños se proponen determinar que estructuras cerebrales se relacionan con una función cognitiva particular, por ejemplo, cartografiar las áreas cerebrales asociadas con una tarea de generación de verbos. En general, los diseños neuropsicológicos implican la obtención de imágenes de base con las que se comparan las imágenes de activación. Las imágenes de base pueden ser realmente imágenes de reposo, pero frecuentemente no es así. A menudo, las imágenes de base se realizan para poder abstraer de la función cognitiva que se desea cartografiar los aspectos mecánicos no pertinentes. Por ejemplo, en el caso de la tarea de generación de verbos, las imágenes de base pueden reflejar la actividad producida por la simple repetición de un verbo que es presentado oralmente. Esta tarea comparte con la de generar verbos numerosos aspectos instrumentales, pero se diferencia en que en este caso no existe una búsqueda activa del verbo adecuado. En ocasiones, los diseños pueden ser más complejos estableciéndose una jerarquía de operaciones que pueden ser abstraídas unas de otras, de forma similar al clásico procedimiento de F. C. Donders, enunciado el siglo pasado, y que se aplica en los estudios de tiempo de reacción.

Se han realizado numerosos trabajos que incluyen una gran variedad de funciones cognitivas. Algunos constituyen estudios de neuroanatomía funcional comparada, en los que se han repetido en humanos experimentos anteriores realizados en primates no humanos con técnicas invasivas. Una parte de esta investigación hace referencia al estudio de la visión, que ha permitido, por ejemplo, establecer una analogía entre el área 19 de Brodmann de la corteza occipital y el área visual V4 de los monos. Otros estudios han puesto de manifiesto que la discriminación visual de objetos complejos activa una re-

gión más anterior, el área 37 de Brodmann en la corteza occipitotemporal, que sería homóloga al área visual TEO de los monos (Fox, Mintun, Raichle, Miezin, Allman y Van Essen, 1986).

Otra área importante de estudio ha sido la atención. Investigadores de la Universidad de Washington (Pardo, Pardo, Janer y Raichle, 1990) han investigado los mecanismos de la atención utilizando el test de Stroop y el registro de la actividad metabólica cerebral mediante la TEP. En la tarea de Stroop el nombre de un color aparece escrito con tinta de otro color distinto (por ejemplo, rojo escrito con tinta azul) y el sujeto debe inhibir el significado de la escritura y responder nombrando el color de la tinta. Esta tarea, que se considera prototípica de la atención dirigida a la acción, activa la corteza cingulada anterior.

Los estudios sobre el lenguaje han sido también numerosos y han aportado datos a favor del modelo de procesamiento en paralelo del lenguaje, según el cual existen áreas visuales y auditivas separadas para la codificación de las palabras, pero ambas tienen acceso a los sistemas de procesamiento articulatorio y semántico. Se ha puesto de manifiesto que la lectura en voz baja activa la corteza estriada y extraestriada (área 37 de Brodmann) mientras que escuchar palabras activa la corteza superior temporal y tēporoparietal (Petersen, Fox, Posner, Mintun y Raichle, 1988). Las tareas que implican salida motora del lenguaje activan la región de la boca de la corteza motora bilateralmente, la corteza premotora izquierda y el área motora suplementaria bilateralmente. Las tareas de asociación semántica activan la corteza prefrontal izquierda y el cíngulo anterior. También se ha abordado el estudio de la activación cerebral durante tareas mentales en ausencia de un «input» sensorial y de un «output» motor. El lenguaje silente, por ejemplo, genera un patrón de actividad, de clara lateralización en el hemisferio izquierdo.

Diversos estudios han puesto en evidencia que cuando se pide a los sujetos que creen imágenes visuales basadas en el recuerdo de su conocimiento de las formas visuales, las áreas del sistema visual muestran un aumento de actividad. Estos hallazgos parecen apoyar la idea de que los procesos iniciados internamente a partir de una consigna pueden activar las mismas áreas sensoriales que cuando estas operaciones son iniciadas por estímulos sensoriales reales (Posner, 1993; Kosslyn y Ochsner, 1994). El hecho de que la imaginación y la percepción comparten la mismas estructuras neuronales había sido postulado con anterioridad por diversas teorías cognitivas, pero no se había podido poner en evidencia hasta este momento. No obstante, esta hipótesis no deja de ser motivo de controversia en la actualidad (Moscovitch, 1994; Roland y Gulyás, 1994).

Resonancia Magnética Funcional

No sabemos lo que en el futuro deparará a la investigación con la TEP, pero sí que podemos intuir que ya ahora existe una técnica alternativa que, al menos en el campo que nos ocupa, la actividad cerebral y la cognición, representa una competencia muy importante, y para los investigadores en este campo de la ciencia un nuevo instrumento de un valor considerable. Nos referimos a la denominada resonancia magnética funcional (RMf) (Cohen y Bookheimer, 1994). La resonancia magnética convencional surgió en la década de los 80 como una nueva técnica de neuroimagen estructural que competía directamente con la tomografía computadorizada (TC) y que ofrecía las mejores imágenes de contraste entre la sustancia blanca y la sustancia gris que se habían visto «in vivo» hasta entonces. El calificativo de neuroimagen estructural que recibió la RM no puede entenderse del mismo modo que la TC, que emplea rayos X y en

la cual el término estructural refleja el valor proporcional a la densidad de los tejidos. Por el contrario, la RM ofrece imágenes que traducen diferencias de intensidad de una señal de radiofrecuencia que proviene de los átomos del tejido estimulado, en general protones de hidrógeno.

La RM es sensible a los cambios de la oxigenación de la sangre, de forma que las variaciones en la cantidad de oxígeno en una región determinada se pueden traducir en variaciones en la intensidad de la señal y por tanto, en cambios en la imagen. Sobre este principio se sustenta básicamente la RMf.

Cuando realizamos una tarea mental, el consumo de oxígeno aumenta en aquellas áreas cerebrales cuya actividad soportan dicha tarea. Sin embargo, los estudios fisiológicos de la hemodinámica cerebral han puesto de manifiesto que el aumento del flujo sanguíneo cerebral regional en estas áreas es muy superior (del orden de 10 veces mayor) al consumo efectivo, es decir al oxígeno extraído por las células nerviosas (Fox, Raichle, Mintun y Dence, 1988). Parece como si un mecanismo de protección pusiera a disposición del cerebro una cantidad extra de oxígeno de forma preventiva.

Como es sabido, el oxígeno sanguíneo se halla unido a la hemoglobina, la proteína sanguínea transportadora de oxígeno. La hemoglobina se une también al anhídrido carbónico, por lo que el balance entre oxihemoglobina y carboxihemoglobina refleja la actividad respiratoria celular. La RM puede utilizar secuencias de estimulación que permiten detectar el aumento de oxihemoglobina en una determinada zona cerebral (por ejemplo, con secuencias sensibles a la variación local del campo magnético producida por el hierro del grupo hemo), lo cual traduce una mayor actividad metabólica en dicha zona. Tal como decíamos anteriormente, el balance entre el aporte de oxihemoglo-

bina como respuesta fisiológica al inicio de una tarea en una determinada zona y el consumo efectivo de oxígeno es positivo, por ello, la mayor parte de esta oxihemoglobina que ha acudido a la zona de demanda pasará a los capilares venosos sin haberse transformado en carboxihemoglobina, por lo que la sangre venosa de esta área poseerá un nivel anormalmente alto de oxihemoglobina, fenómeno que recibe el nombre de arterialización de la sangre venosa. Es precisamente la arterialización de la sangre venosa, a nivel de los capilares venosos y las vénulas que drenan el parénquima, lo que se utiliza para formar las imágenes de RMf que, de esta forma, reflejan el aumento de la actividad cerebral (Ogawa, Lee, Kay y Tank, 1990).

La primera imagen funcional realizada mediante la resonancia magnética la obtuvieron Byder y Young del Hospital de Londres en 1986, pero aunque sirvió para probar la posibilidad, no prosiguieron con esta técnica debido a los problemas en la relación entre señal y ruido que ocasionaba el bajo campo magnético de tan sólo 0,15 tesla (1 tesla = 10^4 gauss) utilizado en aquella época. Posteriormente, en 1991, investigadores del Hospital General de Massachusetts realizaron las primeras imágenes funcionales en un sistema de 1,5 tesla, usando la técnica del «echo-planar» y gadolinio-DPTA como sustancia de contraste. El mismo grupo realizó, en 1992, imágenes funcionales de resonancia magnética, sin ningún tipo de contraste, explotando las diferencias en la susceptibilidad magnética inherentes de la oxihemoglobina y la deoxihemoglobina (Bradley y Stark, 1993; Belliveau et al., 1993).

Aportaciones de la RMf a la Psicología

En el campo médico se espera que la RMf contribuya de forma notable a los conocimientos fisiopatológicos de algunas

enfermedades psiquiátricas y neurológicas. En neurocirugía, se espera que la RMf sea capaz de tener un valor pronóstico de manera que, por ejemplo, si una circunvolución cerebral se activa para una determinada tarea de hablar, ésta no debe extirparse para evitar una pérdida de lenguaje.

También en el ámbito aplicado, la RMf funcional probablemente tendrá repercusiones en el campo clínico de la neuropsicología. Así, por ejemplo, se está ya investigando su utilidad para detectar la lateralización cerebral del lenguaje y poder substituir técnicas cruentas como el test de Wada, procedimiento que consiste en la inactivación hemisférica mediante la inyección de un barbitúrico (amital sódico) por un período de pocos minutos. No obstante, su aplicación más inmediata, casi seguro, será de naturaleza científica, es decir contribuirá al conocimiento de la organización funcional compleja del cerebro.

La extraordinaria novedad de la RMf hace que todos los resultados obtenidos hasta el presente se hayan publicado entre 1991 y 1993 en no más de 10 trabajos, pero en revistas tan prestigiosas como «Proceedings of the National Academy of Sciences of USA», «Nature» y «Science», entre otras. Durante este período de tiempo, se han obtenido imágenes funcionales de la corteza motora durante el movimiento de las manos, de la corteza visual durante la estimulación con flashes y diversos patrones visuales, de la corteza somestésica durante la estimulación táctil, de la corteza auditiva durante la estimulación sonora, del área de Broca durante la producción de lenguaje articulado y de la corteza prefrontal durante la generación de verbos de acción.

La mayor resolución espacial de la RMf respecto a la TEP permite abordar problemas de localización más precisos, como por ejemplo, la disociación de diver-

sos aspectos perceptivos relativamente próximos en la corteza prestriatal en la evocación de patrones visuales. (Le Bihan, Turner, Zeffiro, Cuénod, Jezzard y Bonnerot, 1993). También se han realizado estudios de RMf para precisar aspectos de la localización en la corteza prefrontal de áreas de activación de distribución más o menos dorsal en tareas de generación de palabras. Así, variando el grado de complejidad se ha puesto de manifiesto la implicación de distintas áreas frontales y de la ínsula (McCarthy, Blamisse, Rothman, Gruetter y Shulman, 1993). Los estudios sobre la actividad motora han abordado los patrones corticales de activación diferenciales entre diestros y zurdos (Kim et al., 1993).

Con un enfoque más conceptual, la RMf se ha utilizado para probar el modelo jerarquizado del control del movimiento voluntario. Así, manipulando la dificultad de una tarea motora, se puede observar la participación de zonas cerebrales más complejas. En este sentido, el área motora suplementaria se comporta como un centro de alto orden «supramotor» que implica la generación y programación de movimientos complejos (Rao et al., 1993).

Nosotros hemos empezado a aplicar la RMf, utilizando un sistema convencional de 1,5 tesla, al estudio de las funciones cognitivas. Además de la replicación de diversos experimentos que ha implicado la puesta a punto de la técnica, hemos estudiado la participación de la corteza frontal izquierda en la generación de palabras con consigna y de la corteza temporal y parietal en tareas de cálculo mental simple. En este último experimento, cuando se pide oralmente al sujeto que resuelva mentalmente una operación aritmética tal como « $6 + 2 - 3$ », se activa la circunvolución temporal superior bilateralmente, pero con predominio del lado izquierdo (área de Wernicke), así como la circunvolución angular izquierda (ver figura).

Pensamos que el interés de disponer de técnicas funcionales potentes no se agota con el denominado cartografiado cerebral. Con ellas, no sólo podremos obtener información de qué zonas se hallan involucradas en una determinada función mental, sino que también cabe plantearse hipótesis sobre la naturaleza de los procesos mentales, las cuales podríamos etiquetarlas como netamente psicológicas. Empezamos a tener indicios que conductas aparentemente iguales, tales como mover los dedos de la mano, presentan un patrón de activación cerebral distinto según se realicen mecánicamente, sin atención, o de forma voluntaria y atenta. Y también al revés, como procesos que parecen muy distintos, activan una misma área cerebral; en este sentido, llama poderosamente la atención la gran cantidad de tareas diferentes que pueden activar las áreas cerebrales occipitales, aunque no contengan de forma explícita componentes visuales.

Perspectivas de la RMf

Hemos descrito que la RMf utiliza un proceso completamente fisiológico sin necesidad de manipulación externa de los contenidos de la sangre y que resulta únicamente de una manipulación conductual. Si añadimos que la técnica de la RM es, hasta lo que hoy se conoce, completamente inocua, tenemos ante nosotros un procedimiento de investigación de un potencial inmenso y de unas posibilidades fascinantes.

A todo lo dicho, cabría añadir que la RM es tecnológicamente más sencilla que la TEP ya que depende más de los logros en el campo del «software» que del «hardware», como refleja el hecho que con la programación adecuada con una RM convencional de 1,5 tesla, de las que actualmente están instaladas en nuestro país, puede hacerse RM funcional. Este hecho pensamos que es muy significativo

porque frente a los costosísimos procedimientos de la TEP y de los poquísimos aparatos instalados en todo el mundo, pasamos a una tecnología que ya en la actualidad se halla ampliamente distribuida.

Aunque es evidente que ambas técnicas tienen problemas y limitaciones, la RMf supera a la TEP en casi todo lo relacionado con la visualización de la actividad cerebral propia de los procesos cognitivos. En efecto, la RMf posee una mayor resolución espacial (en la actualidad de 1 a 5 mm, pero que puede llegar fácilmente a los 0,1 mm en el futuro, lo que situaría su resolución en el orden de las columnas corticales) y una mejor resolución temporal (del orden de las décimas de segundo si se utiliza la técnica del «echo-planar»). Por otra parte, la mayor intensidad de la señal que se recoge hace que puedan visualizarse cambios de tan sólo el 1%, lo cual posibilita el estudio de sujetos individuales, sin la necesidad de promediar entre sí las imágenes de varios sujetos.

Limitaciones

La RMf posee, ciertamente, una limitación temporal para captar sucesos neurales como los que detectan el EEG, los potenciales evocados o el electromagnetograma, los cuales pueden registrar eventos de la magnitud real de los acontecimientos eléctricos cerebrales, que son del orden de pocos milisegundos.

Limitaciones de otra índole son compartidas por ambas técnicas, TEP y RMf, y están relacionadas directamente con la metodología de estudio. Las imágenes de activación se obtienen por comparación con las de reposo, en algunos casos, o bien con las de otro tipo de activación distinto, cuando se aplica el denominado principio de Donders o de la substracción de procesos psíquicos. Ambas metodologías tienen importantes puntos débiles que pueden ser criticados. Ciertamente no existe un

reposo estándar con el cual comparar las situaciones de activación, y por otro lado, no tenemos ninguna seguridad de que cuando restamos dos procesos psíquicos la diferencia sea una expresión de la activación cerebral diferencial.

Otro punto metodológico, que es común a la TEP y a la RMf, es determinar los criterios de activación cerebral (o de inactivación). La señal que proviene del cerebro, y también la del fondo dónde se realiza la exploración, ya sea radioactiva o de radiofrecuencia, es fluctuante, de forma que pueden aparecer zonas de activación, aumento de señal, que no estén en relación con la tarea, pero sin que nosotros dispongamos de información para saberlo. Dada la gran cantidad de zonas potenciales a activar, aquí cobra especial interés cómo se realizan los diseños de investigación. En concreto, qué hipótesis se plantean y qué áreas cerebrales pensamos observar, estableciendo «a priori» los niveles de activación que consideraremos significativos. Nosotros hemos utilizado como criterio para considerar que se ha producido activación que la comparación entre los bloques de reposo y los de activación mediante la *t* de Student fuese significativa a nivel del 1 por mil. Si se fijan criterios poco rigurosos pueden aparecer cambios debidos al azar, como ocurre a veces en el fondo sin imagen; por el contrario, el aumento del nivel de significación aumenta la probabilidad de error del tipo II, no considerar significativos cambios que lo son. La replicación de los mismos resultados varias veces en un sujeto nos facilitará información sobre la consistencia del patrón de actividad observado y por otra parte, la replicación de estos mismos resultados en diversos sujetos nos permitirá la extrapolación.

Cabe considerar también que la inferencia de que cuando una zona no se activa no participa en una función puede ser falsa dado que lo que puede ocurrir es que no alcance el nivel suficiente para permitir

la detección de la actividad. Finalmente, resaltamos que no existe una concordancia total entre las conclusiones procedentes de los datos estructurales y los funcionales. A este respecto, Sergent (1994) resalta que el hecho que unas áreas cerebrales se activen durante la ejecución de una determinada tarea no necesariamente implica que todas estas áreas jueguen un papel esencial para su realización. Por ejemplo, los estudios con TEP de sujetos normales indican que la circunvolución fusiforme izquierda participa en la identificación de caras, en cambio su destrucción no afecta para nada el reconocimiento de rostros. Estas discordancias obligan, como mínimo en la actualidad, a tener copresentes los hallazgos de las técnicas estructurales y funcionales, tanto en el campo científico como en el de la práctica clínica.

En resumen, parece que estamos en el inicio de una nueva etapa en la investigación neuropsicológica, porque la RMf puede hacer desplazar la preferencia por el método del análisis de lesiones de la Neuropsicología a la metodología del registro funcional. Creemos que esto puede ser así, porque esta técnica supera la mayoría de las limitaciones de las técnicas de registro «in vivo» en sujetos humanos que hacían que muchos investigadores se mantuvieran al margen de ellas. Si tenemos en cuenta que la técnica que hemos descrito puede implementarse en un número considerable de las RM convencionales que existen en todo el mundo (varios miles), el potencial que posee es inmenso. Por otra parte, la relativa facilidad del registro, su carácter netamente no invasivo, la sencillez de su replicabilidad, su coste moderado y el hecho de que los cambios en la señal que hemos descrito pueden ser valorados en un único sujeto, sin necesidad de promediar sujetos distintos, nos hacen confiar que será la mayor herramienta de trabajo en el estudio de la fisiología de la cognición de los próximos años.

Referencias

- Belliveau, J.W., Kwong, K.K., Baker, J.R., Randall, R., Benson, R., Stern, C.E., Breiter, H.C., Jiang, H., Weisskoff, R.M. y Rosen, B. (1993). Functional MRI probes human mind at work. *Magnetic Resonance, Nov-Dec*, 26-37.
- Bradley, W.G. y Stark, D.D. (1993). Functional MRI must overcome dysfunctional reform efforts. *Magnetic Resonance, Nov-Dec*, 17-20.
- Cohen, M.S. y Bookheimer, S.Y. (1994). Localization of brain function using magnetic resonance imaging. *Trends in Neurosciences, 17*, 268-277.
- Fox, P.T., Mintun, M.A., Raichle, M.E., Miezin, F.M., Allman, J.M. y Van Essen, D.C. (1986). Mapping human visual cortex with positron emission tomography. *Nature, 323*, 806-809.
- Fox, P.T., Raichle, M.E., Mintun, M.A. y Dence, C. (1988). Nonoxidative glucose consumption during focal physiologic neural activity. *Science, 241*, 462-464.
- Heiss, W.D., Herholz, K., Pawlik, G., Wagner, R. y Wienhard, K. (1986). Positron emission tomography in neuropsychology. *Neuropsychologia, 24*, 141-149.
- Ingvar, D.H. y Lassen, N.A. (1976). Regulation of cerebral blood flow. En H.E. Himwich (Eds.), *Brain Metabolism and Cerebral Disorders* (pp. 181-206). New York: Spectrum Publications.
- Kim, S.G., Ashe, J., Hendrich, K., Ellermann, J.T., Merkle, H., Ugurbil, K. y Georgopoulos, A. (1993). Functional magnetic resonance imaging of motor cortex. Hemispheric asymmetry and handedness. *Science, 261*, 615-617.
- Kosslyn S.M. y Ochsner, K.N. (1994). In search of occipital activation during visual mental imagery. *Trends in Neurosciences, 17*, 290-292.
- Le Bihan, D., Turner, R., Zefiro, T.A., Cuénot, C.A., Jezzard, P. y Bonnerot, V. (1993). Activation of human primary visual cortex during visual recall: A magnetic resonance imaging study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 90*, 11802-11805.
- McCarthy, G., Blamire, A.M., Rothman, D.L., Gruetter, R. y Shulman, R.G. (1993). Echo-planar magnetic resonance imaging studies of frontal cortex activation during word generation in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 90*, 4952-4956.
- Moscovitch, M. Do PETS have long or short ears? Mental imagery and neuroimaging. *Trends in Neurosciences, 17*, 292-294.
- Ogawa, S., Lee, T.M., Kay, A.R. y Tank, D.W. (1990). Brain magnetic resonance imaging contrast dependent on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 87*, 9868-9872.
- Pardo, J.V., Pardo, P.J., Janer, K.W. y Raichle, M.E. (1990). The anterior cingulate cortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 87*, 256-259.
- Petersen, S.E., Fox, P.T., Posner, M.I., Mintun, M. y Raichle, M.E. (1988). Positron emission tomography studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature, 331*, 585-589.
- Posner, M.I. (1993). Seeing the mind. *Science, 262*, 673-674.
- Posner, M.I. y Raichle, M.E. (1994). *Images of Mind*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Raichle, M.E. (1994). Representación visual de las operaciones mentales. *Investigación y Ciencia, 213*, 22-29.
- Rao, S.M., Binder, J.R., Bandettini, P.A., Hammeke, T.A., Yetkin, F.Z., Jesmanowicz, A., Lisk, L.M., Morris, G.L., Mueller, W.M., Eskowski, L.D., Wong, E.C., Haughton, V.M. y Hyde, J.S. (1993). Functional magnetic resonance imaging of complex human movements. *Neurology, 43*, 2311-2318.
- Roland, P.E. y Gulyás, B. Visual imagery and visual representation. *Trends in Neurosciences, 17*, 281-287.
- Sergent, J. (1994). Brain-imaging studies of cognitive functions. *Trends in Neurosciences, 17*, 221-227.
- Vinod, D.D. y Meyer, J.S. (1978). *Noninvasive Measurement of Regional Cerebral Blood Flow in Man*. New York: Spectrum Publications.

Aceptado el 19 de septiembre de 1994

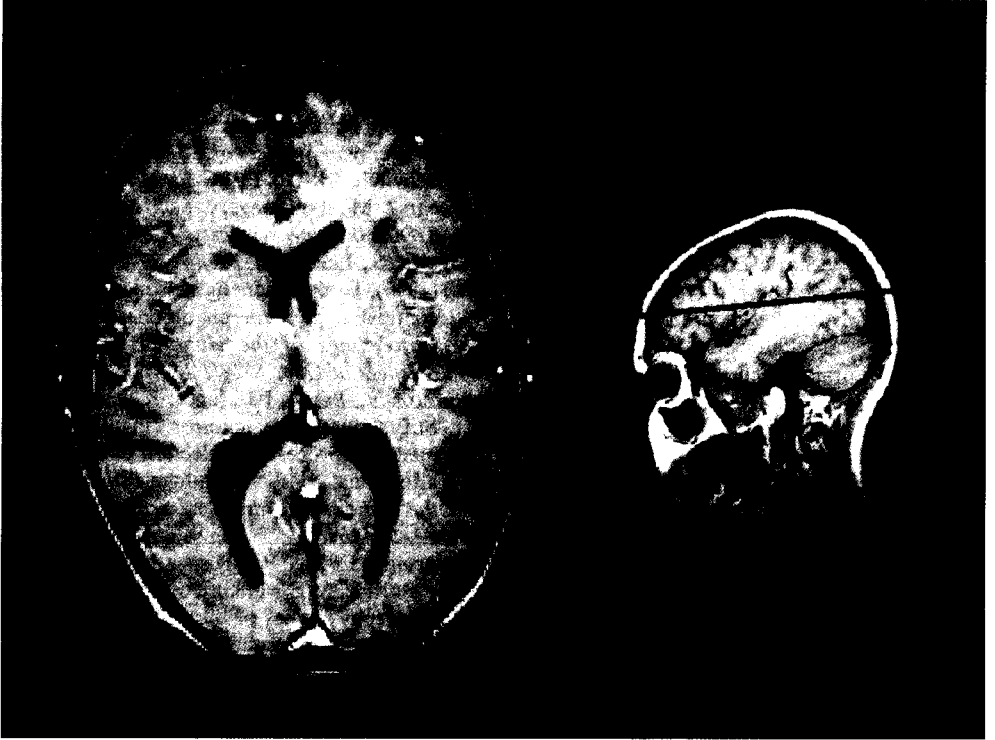


Figura. Corte oblicuo-axial (izquierda) a nivel de la circunvolución temporal superior, orientado según la línea que se indica en la imagen sagital de la derecha. El sujeto estaba realizando operaciones aritméticas mentales que se le proponían oralmente. Destaca la activación (en rojo) del área de Wernicke y de la circunvolución angular del lado izquierdo (derecha de la imagen) y una discreta activación de las áreas homólogas de lado derecho.

Figure. Oblique-axial slice (left) at the temporal superior gyrus level, orientated according to the drawn line in the sagittal image (right). The subject is performing the mental arithmetic operations that were orally instructed. We can see Wernicke's area and angular gyrus activation (in red colour) in the left side of the brain (right in the image). We can also observe a less prominent activation of the homologous areas in the right hemisphere.