Mecanismos cerebrales del pensamiento matemático

D. Alonso, L.J. Fuentes

CEREBRAL MECHANISMS OF MATHEMATICAL THINKING

Summary. Objective. *To suggest a cerebral map of elementary mathematical thinking, and integrate the most relevant findings from neuropsychology with those from cerebral imaging techniques and cognitive behavior experiments.* Development. *Firstly we describe investigations into our numerical sense and the way in which numerical information is represented in the human brain. Then, using a multidisciplinary approach, we present the results of different studies of Gerstmann's syndrome, regarding the relation between numerical ability and other cognitive skills; the different participation of the cerebral hemispheres and the special implication of the parietal lobe in mathematical tasks.* Conclusion. *Different cerebral regions are involved in doing mental arithmetic, however simple. This makes one think more in terms of cerebral circuits than in a phrenological idea which would assign the responsibility for arithmetical calculations to a specific region. The similarity between the results analysed leads us to the conclusion that one region is particularly involved in understanding numbers, namely the inferior part of the parietal lobe. Different neuronal circuits are used depending on the type of task to be performed. Finally we describe the most relevant models for the processing of numbers which have been developed during the study. [REV NEUROL 2001; 33]*

Key words. *Acalculia. Dyscalculia. Gerstmann's syndrome. Mathematical thinking. Parietal lobe. Processing of numbers.*

INTRODUCCIÓN

Nuestro sentido numérico, ¿es innato o adquirido? ¿Cómo nos representamos los números en nuestro sistema cognitivo? ¿Cómo funciona nuestro cerebro cuando resolvemos un problema de álgebra o de geometría? ¿Qué circuitos neuronales se asocian con la aritmética mental? Todavía no conocemos suficientemente el funcionamiento de nuestro cerebro como para proporcionar una adecuada respuesta a estas preguntas. Sin embargo, algunos recientes descubrimientos procedentes del campo de las neurociencias están arrojando luz sobre el complejo problema de cómo comprendemos y ejecutamos mentalmente tareas matemáticas. Los resultados provienen del estudio e investigación en varios campos, principalmente experimentos cognitivoconductuales, estudios de pacientes con lesiones cerebrales y técnicas de imagen cerebral –tomografía por emisión de positrones (PET), imágenes obtenidas por resonancia magnética funcional (RM), electro y magnetoencefalografía–, que han comenzado a proporcionarnos –estas últimas– información sobre la actividad del cerebro 'en vivo', mientras estamos llevando a cabo, por ejemplo, alguna operación aritmética.

Este artículo pretende presentar una revisión actualizada de los resultados más importantes que, desde estos tres ámbitos, están permitiendo ampliar nuestro conocimiento de los procesos cognitivos implicados en la realización de tareas de aritmética mental.

EL SENTIDO NUMÉRICO

Una pregunta que ha rondado por la mente de filósofos y psicólogos durante algunos años ha sido la de cuál es el origen de nuestra capacidad para pensar sobre el mundo en términos numéricos. El psicólogo suizo Jean Piaget [1] creía que esta capacidad aparecía alrededor de los 5 años de edad y necesitaba la presencia previa de algunas habilidades de razonamiento lógico, tales como la capacidad de razonar utilizando la propiedad transitiva –si A es mayor que B, y B es mayor que C, entonces A es mayor que C–, y la llamada 'conservación del número', es decir, la capacidad de establecer correspondencias biunívocas entre dos conjuntos. Sin embargo, hoy se cuenta con gran cantidad de resultados que apoyan la hipótesis de que los niños, ya en el primer año de vida, cuentan con un conocimiento numérico rudimentario e independiente del lenguaje [2-4]. Starkey y Cooper [2] fueron los primeros en demostrar que los niños de 6-7 meses de edad podían detectar cambios en el número de objetos presentados visualmente. Posteriormente, estos hallazgos se han replicado y ampliado. Como consecuencia, algunos autores, entre los que se encuentran Butterworth [5] y Dehaene [6], afirman que, al igual que sucede con los colores, las personas humanas nacemos con circuitos cerebrales especializados en la identificación de números pequeños: un módulo numérico que nos permite la comprensión de cantidades y sus interrelaciones, y que servirá de asiento al posterior desarrollo de capacidades matemáticas más complejas. Aunque el sustrato cerebral de este sentido numérico no se conoce exactamente, sí se piensa que la región inferior del lóbulo parietal desempeña un papel crucial en él, como veremos más adelante.

¿Qué forma adopta la representación interna de los números? La respuesta a esta pregunta se fundamenta en tres importantes características que presenta el procesamiento numérico: el efecto de distancia, el efecto de tamaño y el efecto SNARC (del inglés, *Spatial-Numerical Association of Response Codes*).

El efecto de distancia

Es un fenómeno que aparece siempre que tratamos de resolver una tarea de comparación de números [7]: el tiempo que se tarda en identificar cuál es el mayor (o el menor) de dos números depende de su diferencia (distancia); a mayor distancia entre ellos, menor tiempo. Es decir, se tarda más en decidir cuando nos presentan el par 9-8, que en el caso del par 9-1. Este mismo efecto se ha observado también en la comparación de números de dos dígitos [8,9].

Recibido: 04.04.01. Aceptado tras revisión externa sin modificaciones: 05.05.01.

Departamento de Psicología Experimental y Psicobiología. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Universidad de Almería. Almería, España.

Correspondencia: Dr. Diego Alonso. Departamento de Psicología Experimental y Psicobiología. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Universidad de Almería. Ctra. de Sacramento, s/n. La Cañada de San Urbano. E-04120 Almería. Fax: +34 950015473. E-mail: dalonso@ual.es

El efecto de tamaño

Se refiere al hallazgo de que, para igual distancia numérica, la discriminación entre dos números empeora conforme aumentan sus valores numéricos. Es decir, en una tarea de comparación de números es más difícil decidir entre 9 y 8 que entre 3 y 2 [7].

Estas dos propiedades sugieren que la comprensión del significado numérico supone que nuestro cerebro maneja los números de forma similar a como lo hace con cantidades pertenecientes a magnitudes físicas tales como peso, longitud o volumen, satisfaciendo la ley de Weber. Dehaene [6] explica estos hechos afirmando que ante la presencia de un número nuestro cerebro, automáticamente, lo convierte en cantidad, incluso en aquellos casos en que esta conversión no sea de utilidad en un determinado contexto.

El efecto SNARC

Este término hace referencia al hecho de que, en experimentos de tiempo de reacción con números, ante un número elevado las personas respondemos más rápidamente con la mano derecha que con la izquierda. Y lo contrario sucede ante un número bajo. Esta relación entre números y espacio apareció también en personas zurdas, en diestros con sus manos cruzadas, e incluso ante imágenes especulares de dígitos. Sin embargo, cuando la tarea se hizo con estudiantes iraníes, que habían aprendido a leer de derecha a izquierda, tendió a invertirse el resultado, lo que parece indicar que la dirección de esta asociación números-espacio está influida por la cultura [10].

Este efecto, conjuntamente con los dos anteriores, se ha explicado desde la presunción de que los números naturales podrían representarse por distribuciones de activación en un continuo interno similar a una línea numérica orientada de izquierda a derecha –empezando desde el cero y avanzando hacia la derecha–. Esta representación cuantitativa de los números es sólo uno de los distintos códigos –el más importante– en que nuestro cerebro se representa los números. Así, por ejemplo, los resultados de algunos estudios neuropsicológicos y otros llevados a cabo con técnicas de imagen cerebral dan pie a pensar que los elementos de la tabla de multiplicar se almacenan en un código no semántico, como una secuencia rutinaria de palabras [11,12].

EL ENFOQUE NEUROPSICOLÓGICO

Las lesiones cerebrales constituyen un hecho dramático que puede destruir hasta las mentes más brillantes. Pero para los neurocientíficos, estos 'experimentos de la naturaleza' también ofrecen la posibilidad de comprender mejor cómo funciona nuestro cerebro. La neuropsicología cognitiva es la disciplina científica que aprovecha la información procedente de pacientes con lesiones cerebrales para conocer mejor las redes neuronales que subyacen a los distintos procesos cognitivos. Un término clave en esta disciplina es el de 'disociación', es decir, el hecho de que tras una lesión cerebral, una función (X) resulta deteriorada mientras otra (Y) permanece intacta. Cuando dos habilidades mentales aparecen disociadas, con frecuencia se puede inferir que en ellas se implican parcialmente sistemas neuronales distintos. La primera habilidad (X) se deteriora porque requiere la contribución de un área cerebral que está dañada y, por tanto, no puede desarrollar ahora su función. La segunda (Y) permanece intacta porque la lesión ha respetado las redes neuronales en las que descansa. Por supuesto, los neuropsicólogos son conscientes de que existen otras explicaciones. Por ejemplo, las tareas X e Y podrían utilizar circuitos idénticos y ser la X más sencilla que la Y, o bien el paciente

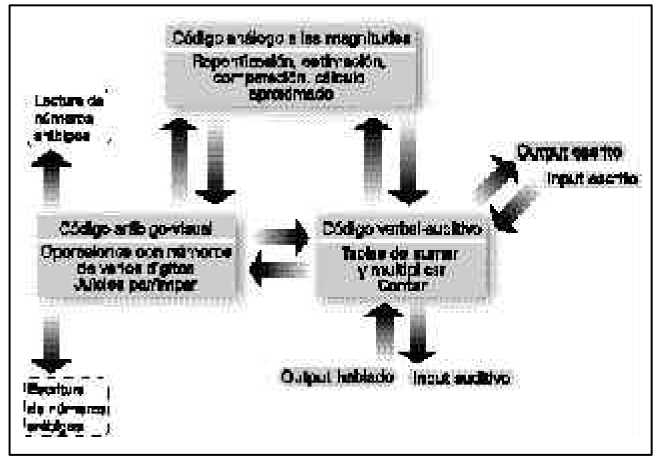

Figura 1. Esquema del modelo de código triple de Dehaene [11].

podría haber reaprendido la tarea Y después de la lesión, pero no la X. No obstante, cuando se pueden descartar estas explicaciones alternativas, la neuropsicología cognitiva proporciona una gran información sobre nuestra organización cerebral. Esto sucede, por ejemplo, cuando aparece lo que se conoce como una 'doble disociación': dos pacientes en los que se observe que la tarea X la realiza mejor el paciente 1 que el 2, mientras que en la tarea Y sucede lo contrario; o sea, el rendimiento del paciente 2 es mejor que el del 1. En estos casos se podría afirmar que, según la localización de la lesión, se ha afectado una u otra función, y que, por tanto, son circuitos neuronales distintos los que llevan a cabo cada una de estas dos funciones. Adicionalmente, los resultados que se obtienen en estos estudios pueden servir de base para generar modelos explicativos del procesamiento numérico.

LOS PRIMEROS ESTUDIOS. EL SÍNDROME DE GERSTMANN

Salomon Henschen [13], un neurólogo que trabajó en el Instituto Karolinska, en Estocolmo, hasta finales de la década de 1920, fue quien acuñó el término 'acalculia' –incapacidad para usar números–. De un total de 1.300 pacientes estudiados, reunió datos de 260 pacientes neurológicos que tenían algún tipo de déficit en sus capacidades numéricas. Sobre esta enorme base de datos concluyó que '...en el cerebro existe un sistema que subyace a los procesos aritméticos y que es independiente, o casi, de los sistemas para el habla o la música'. En la misma publicación afirmó que '...la capacidad para el cálculo es una función cerebral altamente compleja que resulta de la colaboración de varias áreas posteriores del hemisferio izquierdo'. Con el paso del tiempo, este enfoque modular ha recibido un amplio apoyo empírico por medio de estudios de capacidades numéricas en animales, niños, adultos sanos y pacientes con lesiones cerebrales, tanto en el ámbito cognitivo como anatómico, confirmando que las áreas parietales son cruciales para el procesamiento numérico. Otro neurólogo, el alemán Josef Gerstmann [14], fue el primero, en 1924, que descubrió en tres pacientes la tétrada de déficit –conocida desde entonces como síndrome de Gerstmann–, que puede producir una lesión en la región parietal inferior izquierda: acalculia o discalculia, agrafia o disgrafía, incapacidad para nombrar los dedos de la mano o señalar uno de ellos cuando se le indica (agnosia digital), e imposibilidad de distinguir entre izquierda y derecha. ¿Cuál es la relación entre números, letras, dedos y espacio? De acuerdo con Dehaene

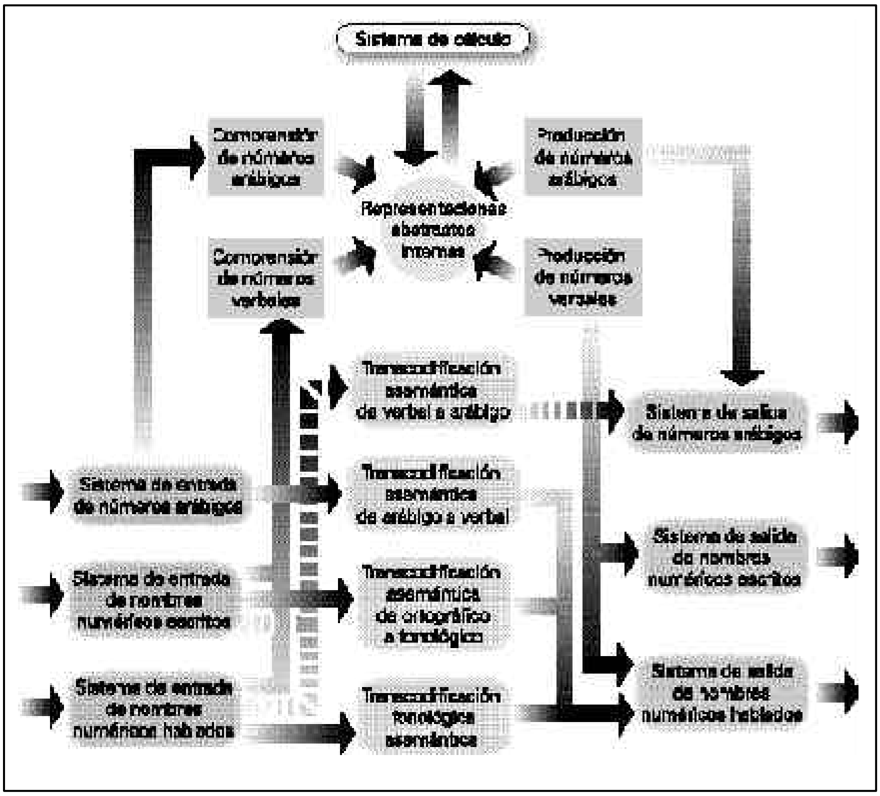

Figura 2. Modelo de Cipolotti. A partir del modelo de McCloskey se han añadido rutas asemánticas de cambio de código, representadas por las líneas de puntos y de trazo grueso [45].

[6], estos cuatro síntomas primarios que forman el síndrome de Gerstmann podrían reflejar simplemente el agrupamiento de una curiosa variedad de módulos cerebrales independientes en la misma región cortical. Además, durante décadas, algunos investigadores han observado que los cuatro elementos constituyentes del síndrome, aunque con frecuencia aparecen juntos, también pueden disociarse. Algunos pacientes –poco frecuentes– muestran acalculia sin deterioro de la capacidad para distinguir sus dedos, o viceversa. Por tanto, la región parietal inferior probablemente se subdivide en microrregiones altamente especializadas para números, escritura, espacio y dedos. No obstante, intentando buscar una explicación más profunda a este agrupamiento de síntomas en la región parietal inferior izquierda, Dehaene [6] expone una gran cantidad de datos que apoyan la idea de que existe una estrecha relación entre números y espacio. Por ejemplo: a) las personas tendemos a representarnos mentalmente los números enteros en una línea recta orientada de izquierda a derecha y esto desempeña un papel importante en nuestra intuición numérica, y b) existe una fuerte correlación entre el talento matemático y las habilidades espaciales. De esta relación infiere que la región parietal inferior alberga circuitos neurales dedicados a la representación de información espacial continua, que resulta adecuada para la codificación de la 'línea numérica' –término utilizado por Dehaene para designar la forma en que el cerebro humano se representa los números naturales: éstos no se tratan como símbolos, sino como cantidades que se representan en una línea obedeciendo la ley de Fechner, como se ha expuesto antes–. Anatómicamente, esta área se localiza en la cumbre de una pirámide de áreas occipitoparietales, que construye representaciones abstractas de la disposición espacial de los objetos del entorno. Por tanto, el número emergería naturalmente como la más abstracta representación de objetos en el espacio.

También es relativamente obvia la relación entre números y dedos. Los niños de todas las culturas aprenden a contar utilizando sus dedos. Por tanto, a lo largo del desarrollo es muy probable que las representaciones de los números y de los dedos ocupen zonas cerebrales cercanas e íntimamente relacionadas.

Se puede afirmar, por tanto, que estos y otros estudios han confirmado la implicación del lóbulo parietal inferior izquierdo en el cálculo mental. Las lesiones en esta región pueden dejar al paciente totalmente incapaz para ejecutar incluso cálculos tan sencillos como 3-1 o 7×8 [15-17].

Relación entre la capacidad numérica y otras capacidades cognitivas

El análisis del rendimiento de algunos pacientes neurológicos en distintas pruebas diseñadas para evaluar diferentes capacidades cognitivas puede proporcionarnos información muy valiosa para establecer el grado de independencia entre la capacidad numérica y otras capacidades básicas. En particular, vamos a exponer algunas importantes dobles disociaciones que sugieren una relativa independencia del sentido numérico con respecto al lenguaje, al razonamiento general y a la memoria.

Capacidades numéricas y lenguaje

Cipolotti et al [18] describen el caso de la paciente C.G., que sufrió una lesión en el lóbulo parietal izquierdo. Como consecuencia, presentaba un grave deterioro de sus capacidades numéricas, hasta el punto de que sólo manejaba los números 1, 2, 3 y 4. Además, la repentización (en inglés, *subitizing*), proceso consistente en la identificación súbita, sin apariencia de recuento, del número de objetos que tiene un conjunto presentado visualmente cuando este número es inferior a cuatro, y que pueden llevar a cabo incluso niños pequeños y muchas especies de animales, era incapaz de realizarla. Cualquier sencilla operación numérica, de las que sólo requieren una simple memorización, resultaba muy difícil para ella. En general, no podía hacer nada que implicara la utilización de números. Sin embargo, su lenguaje hablado no estaba deteriorado. Lo anterior nos da pie a pensar en una cierta independencia entre procesos numéricos y lenguaje. Para que esta hipótesis fuese más creíble sería necesario descubrir un paciente que presentara un patrón de resultados opuesto al anterior. Rossor et al [19] informan de un paciente, con una enfermedad neurodegenerativa, en el que el lenguaje había desaparecido casi por completo y en el que la comprensión del lenguaje hablado o escrito era casi inexistente. No obstante, su rendimiento en cálculo era relativamente normal: hacía bien las sumas y restas, comprendía lo que estaba haciendo e incluso resolvía correctamente tareas de comparación de números de dos o tres cifras, lo que indicaba que tenía acceso al sentido numérico.

Capacidades numéricas y razonamiento general

El razonamiento de la paciente C.G., estudiada por Cipolotti et al [18], incluyendo el razonamiento en tareas 'piagetianas', era bueno. Podía resolver perfectamente, por ejemplo, inferencias transitivas –Juan es más alto que Antonio, Enrique es más bajo que Antonio, ¿quién es más alto, Enrique o Juan?–. Sin embargo, como ya se ha expuesto, sus capacidades numéricas estaban muy deterioradas. En el extremo opuesto se encuentra un paciente estudiado por un equipo de neuropsicólogos de la Universidad Católica de Lovaina [20]. Se encontraba en las etapas iniciales de una demencia y, como consecuencia, presentaba algunos déficit importantes, siendo el más llamativo su incapacidad de razonar. Por ejemplo, ante un conjunto de 27 cartas de una baraja de 28 –del 1 al 7 en cada palo– era incapaz de organizar la búsqueda de la carta que faltaba. Su rendimiento en tareas 'piagetianas' de conservación de número –que los niños de 4 años pueden resolver– era también deficitario. Así, de acuerdo con Piaget, si fuese verdad que estas tareas constituyen un prerrequisito para poder adquirir el concepto de número, se esperaría que sus capacidades numéricas estuviesen muy deterioradas. Sin embargo, esto no ocurría. Este paciente podía estimar el número de puntos de una matriz de puntos, hacer comparaciones de números e incluso cálculos aritméticos tan complejos como decidir cuáles de los números 839, 841, 4.096, 4.099 eran cuadrados perfectos. Estos dos pacientes, conjuntamente, constituyen las dos mitades de una doble disociación que apoya la idea de que los circuitos subyacentes a los procesos aritméticos están separados de los dedicados a razonamiento lógico general.

Capacidades numéricas y memoria

Vamos a analizar por separado la relación entre capacidades numéricas y memoria episódica, memoria semántica y memoria de trabajo:

Memoria episódica

Delazer et al [21] han estudiado un grupo de pacientes amnésicos cuyo rendimiento en tareas aritméticas típicas, como era de esperar, fue tan exacto y rápido como los participantes con memoria normal. Incluso utilizando el procedimiento de *priming*, el resultado no difería significativamente de los participantes del grupo control. En el otro extremo, la paciente C.G. ya mencionada, al igual que otros muchos pacientes con acalculia, no mostraba amnesia.

Memoria semántica

La paciente C.G. conservaba en buen estado su memoria semántica, pudiendo recordar sin problemas capitales de naciones, significado de palabras, etc., y, en cambio, había perdido todo conocimiento numérico que implicara la utilización de números por encima del cuatro, como ya se ha dicho. El caso opuesto, en el que se vea afectada la memoria semántica pero no la aritmética, es poco frecuente, debido a que las patologías que afectan a la memoria semántica suelen ser enfermedades –como la de Alzheimer– que afectan a amplias regiones del cerebro. Sin embargo, el paciente estudiado por Rémond-Besuchet et al [20], mencionado antes, presentaba un grave déficit en su memoria semántica y, al mismo tiempo, sus capacidades aritméticas permanecían a un nivel excepcionalmente bueno.

Memoria de trabajo

Butterworth et al [22,23] describen el caso de un paciente que había sufrido una lesión en su hemisferio izquierdo y que, entre otros síntomas, era incapaz de repetir una lista de números cuando ésta tenía más de dos elementos, lo que indicaba un grave deterioro de su memoria de trabajo. Sin embargo, su cálculo mental, tal y como mostró la puntuación en un test de aritmética mental –el GDA (del inglés, *Graded Difficulty Arithmetic Test*)–, en el que se le pedían resultados de sumas o restas de números de varias cifras –lo que obviamente excedía la limitada amplitud de su memoria de trabajo–, resultó ser sorprendentemente bueno. El patrón opuesto lo presenta la paciente C.G., que no tiene problemas de memoria de trabajo, pero sus capacidades numéricas están gravemente deterioradas. También, Delazer et al [24] informan de una paciente que se había operado de un tumor en el lóbulo parietal izquierdo, no presentando problemas de memoria y siendo incluso capaz de llevar a cabo con normalidad operaciones aritméticas rutinarias –las tablas de multiplicar, aprendidas verbalmente en la infancia–, pero manifestando un desconocimiento absoluto del significado numérico de los términos que utilizaba. Más adelante, veremos que esta disociación entre la aritmética verbal rutinaria y el sentido numérico es coherente con el modelo teórico de Dehaene y Cohen [6-12] de las representaciones numéricas.

Globalmente, lo que estos pacientes muestran, de acuerdo con Butterworth [5], es que en nuestro cerebro estas habilidades son relativamente independientes, en contra de lo que, a primera vista, el sentido común parecería indicarnos.

ESPECIALIZACIÓN HEMISFÉRICA

¿Cómo se disponen los circuitos numéricos en el cerebro? ¿Están todos ellos en el mismo hemisferio? Sabemos que casi siempre, en los casos de acalculia, la región que aparece dañada es el lóbulo parietal izquierdo, mientras que en aquellos pacientes con otras capacidades cognitivas deterioradas, pero conservando intactas sus capacidades numéricas, parecen tener intacto su lóbulo parietal izquierdo. ¿Qué papel desempeñan los lóbulos parietales derecho e izquierdo en las tareas numéricas? Hay varias formas de saberlo.

Estudio de pacientes con desconexión interhemisférica

Cuando el cuerpo calloso ha sufrido algún daño o se ha seccionado deliberadamente mediante cirugía –para tratar algunas epilepsias rebeldes, por ejemplo–, los dos hemisferios operan más o menos independientemente, permitiéndonos ver qué función realiza cada uno de ellos. El estudio de estos pacientes ha sido muy importante en el desarrollo de la neuropsicología y permitió a Roger Sperry recibir el premio Nobel de Medicina en 1981. En una serie de experimentos llevados a cabo por Cohen y Dehaene [25], sobre tres pacientes con lesiones restringidas a la parte posterior del cuerpo calloso, se comparaba la ejecución cuando se les presentaban estímulos numéricos a un lado o al otro del cerebro. Los resultados indicaron que ambos hemisferios pueden reconocer dígitos arábigos, convertirlos en cantidades y compararlos. Sin embargo, sólo el hemisferio izquierdo es capaz de nombrarlos y ejecutar cálculos exactos. Estos resultados confirmaron y extendieron los de estudios previos obtenidos con casos quirúrgicos de lesiones del cuerpo calloso [26-28]. Según Cohen y Dehaene [25], cuando comparamos números usamos representaciones análogas de su tamaño, de forma parecida a como comparamos dos pesos, volúmenes, longitudes o niveles de agua en dos vasos. Estas representaciones las usan ambos hemisferios y es lo que todavía puede transferirse a través de la parte anterior del cuerpo calloso de sus pacientes. Pero, además, sólo el hemisferio izquierdo puede usar representaciones numéricas. Conjuntamente, esto explicaría el hecho de que las respuestas del hemisferio derecho sean aproximadas y las del hemisferio izquierdo, exactas.

Lesiones extensas en el hemisferio izquierdo

Grafman et al [29] han estudiado a un paciente –un soldado americano, J.S.– que perdió la mayor parte de su hemisferio izquierdo durante la guerra de Vietnam. J.S. sobrevivió a las muchas operaciones quirúrgicas a las se sometió, a las infecciones y a la grave epilepsia que se siguió, pudiendo vivir de una forma semiindependiente con un solo hemisferio, el derecho –del hemisferio izquierdo, sólo conserva el lóbulo occipital–. Obviamente, sus capacidades verbales –producción y comprensión– están gravemente deterioradas. No puede leer ni escribir, ni nombrar ningún objeto. En cuanto a sus capacidades numéricas, han desaparecido casi por completo, aunque puede identificar el número de objetos de una colección, reconocer dígitos arábigos y compararlos. Dehaene y Cohen [30] informan de otro paciente con una extensa lesión en la mitad posterior del hemisferio izquierdo, que sufría, entre otras cosas, una grave acalculia. Por ejemplo, declaraba que 2+2 son 3. Podía comparar números –siendo incapaz de leerlos en voz alta–; es decir, ante la presencia de los números 8 y 7 señalaba que el 8 es mayor que el 7. Obviamente, recordaba la cantidad representada por cada número arábigo. Aunque había perdido su capacidad para realizar cálculos exactos, podía aproximar. Cualquier tarea sencilla que requiriera una percepción aproximada de cantidades numéricas no parecía ser un problema para él. Así, juzgaba que un año tiene 'unos 350 días'; una hora, 'unos cincuenta minutos'; enero tiene 'quince o veinte días', y una docena de huevos, 'ocho o diez', respuestas que son claramente falsas, pero aproximadas a las correctas. Esta imprecisión le impedía decidir, por ejemplo, si un número era par o impar. Cohen y Dehaene [31] recogen el caso de otro paciente con una amplia lesión en el hemisferio izquierdo que manifiesta una grave acalculia, aunque mantiene la capacidad para acceder a datos cuantitativos almacenados en su memoria, fechas y otros números familiares.

Efectos de daño en el hemisferio derecho

En un estudio llevado a cabo por Jackson y Warrington [32], en el que se comparaban dos grupos de pacientes con lesiones en el hemisferio derecho e izquierdo, respectivamente, se observaron importantes diferencias de rendimiento en aritmética elemental, medido con el GDA de estos autores. Las lesiones en el hemisferio izquierdo causaban una grave acalculia en el 16% de los pacientes, mientras que las lesiones en el hemisferio derecho no causaban tan graves problemas. Por otra parte, hay pruebas de que sólo la capacidad numérica más básica, la capacidad de repentizar, puede representarse en ambos hemisferios, ya que una lesión en el hemisferio derecho produce, en algunos casos, un deterioro en esta capacidad [33].

Las técnicas de imagen cerebral

Aunque para algunos autores [5] estas técnicas no están lo suficientemente desarrolladas como para producir resultados que nos permitan localizar con precisión las aportaciones de cada hemisferio al procesamiento numérico, otros autores las utilizan ampliamente. Los investigadores suecos Roland y Friberg [34] fueron los primeros que utilizaron la técnica del control de cambios en el flujo sanguíneo con tareas aritméticas. Pusieron a 11 participantes a restar mentalmente de tres en tres unidades, a partir de un determinado número, y observaron que, con relación al estado de reposo, aparecía un aumento de activación en el córtex parietal inferior –cerca del giro angular– y en varias regiones del córtex prefrontal, en ambos hemisferios, aunque la activación en el hemisferio izquierdo era mayor que en el derecho. La tarea de sustracciones sucesivas plantea el problema de qué parte de la activación se debe al procesamiento numérico y qué parte se asocia con las labores propias de la memoria de trabajo. Como se ha puesto de manifiesto en otros estudios, la activación del córtex prefrontal parece relacionarse con las funciones llevadas a cabo por la memoria de trabajo: mantenimiento provisional de resultados intermedios, planificación, ordenación temporal de las distintos componentes de las tareas, comprobación de resultados y corrección de errores. Por otra parte, el acceso al sentido cuantitativo de la información numérica se relaciona fuertemente con la parte inferior del lóbulo parietal, como lo confirman otros estudios que aparecen a lo largo de este artículo. Posteriormente, utilizando RM, Rueckert et al [35] han replicado los resultados de Roland y Friberg. En un estudio realizado por Dehaene et al [36] con PET sobre multiplicación y comparación de números, ha aparecido activación bilateral en la región intraparietal, aunque la implicación de los hemisferios era asimétrica: en la multiplicación, el nivel de activación fue mayor en el hemisferio izquierdo, mientras que en la tarea de comparación de números la activación estaba más equilibrada entre ambos hemisferios. Este resultado está en consonancia con la idea de que la tabla de multiplicar se relaciona más con las capacidades verbales del hemisferio izquierdo, mientras que la comparación de números ni está ligada al lenguaje ni se ha aprendido de memoria [6].

La región inferior del lóbulo parietal izquierdo

El estudio llevado a cabo por Dehaene y Cohen [17] sobre el paciente M puso de manifiesto cuál es exactamente la aportación de la región inferior del lóbulo parietal del hemisferio dominante en el procesamiento numérico. Este paciente tenía una pequeña lesión en la región parietal inferior del hemisferio derecho –la organización cerebral de este paciente zurdo era, según los autores, simétrica a la de una persona normal–. Como consecuencia de la lesión, mostraba graves dificultades en cálculo, especialmente en restas de un solo dígito, por ejemplo, 3-1, comentando que no sabía el significado de esa operación. También fallaba en tareas que no requerían cálculo aritmético, como decidir cuál de dos números era el mayor, o en tareas de bisección numérica –decidir qué número está entre el 4 y el 6, por ejemplo–. Sin embargo, su rendimiento era normal en tareas de comparación o bisección en dominios no numéricos –por ejemplo, ¿cuál es el día que está entre el martes y el jueves?, ¿qué mes cae entre febrero y abril?, ¿qué letra está entre la A y la C?–, lo que indicaba que su déficit era específico para los números. Incluso dentro del dominio numérico, mostraba una curiosa disociación: aunque afirmaba con toda confianza que 3-2= 2, conservaba parcialmente el conocimiento de las tablas aritméticas. Su conocimiento rutinario aprendido verbalmente estaba intacto, permitiéndole afirmar, como un autómata, que 'tres por nueve son veintisiete', sin comprender realmente lo que estaba diciendo. Lo mismo sucedía con sumas de números de un solo dígito: podía recuperar de su memoria el conocimiento sobre la tabla de sumar, resolviendo así más de la mitad de estas tareas. Se puede afirmar que el paciente M sufre un déficit selectivo de la representación cuantitativa de los números –la línea numérica mental que da significado a los números arábigos y a las palabras que nombran números. M ha perdido esencialmente toda intuición aritmética.

El caso de M apoya la hipótesis de que el sustrato neurológico asociado al conocimiento rutinario, proporcionado por el aprendizaje mecánico de las tablas de sumar y multiplicar en la escuela, es parcialmente independiente del sistema parietal inferior, relacionándose con los circuitos ligados al lenguaje. Como se ha puesto de manifiesto en otros estudios, a este conocimiento aritmético-verbal rutinario se puede acceder, en ausencia del componente semántico, usando el circuito perisilviano izquierdo implicado en tareas verbales [12,17,37]. Dehaene y Cohen [17] describen una disociación inversa a la de M: una maestra de escuela jubilada, B, con una lesión subcortical en el núcleo lenticular izquierdo, que era incapaz de recitar la tabla de multiplicar, oraciones (el Padrenuestro, etc.), el abecedario, algunas rimas familiares y poesías; todas estas formas de conocimiento verbal rutinario estaban deterioradas. Sin embargo, B conservaba todavía su sentido numérico: podía hacer relativamente bien tareas como comparar dos números, encontrar el número que cae en medio de otros dos e incluso resolver algunas restas, como por ejemplo, 8-3. Por tanto, hay una doble disociación con los déficit observados en la acalculia parietal, que sugiere la existencia de un circuito córtico-subcortical conectado con las áreas perisilvianas del lenguaje, implicado en la recuperación rutinaria de las tablas aritméticas y de otras operaciones rutinarias verbales y no verbales. Esta doble disociación entre aritmética verbal rutinaria y procedimientos aritméticos con conocimiento del sentido numérico se puede apreciar comparando los casos descritos en otros estudios [15,38-40]. Incluso dentro de la aritmética verbal rutinaria se ha encontrado una doble disociación entre adición y multiplicación [24,41].

Convergentemente, usando experimentos conductuales y la técnica de imagen cerebral conocida como RM, Dehaene et al [42,43] llegaron a la conclusión de que algunas operaciones aritméticas, tales como las de las tablas de multiplicar, son codificadas verbalmente, mientras que las aproximaciones o estimaciones son independientes del lenguaje. Los resultados de sus experimentos han mostrado que hay dos sistemas neurales distintos que subyacen a la aritmética elemental exacta o aproximada. Dependiendo de que el cómputo implique una respuesta exacta o una estimación aproximada, nuestro cerebro usa procesos diferentes. La idea subyacente es que, cuando tenemos que elegir el resultado exacto –por ejemplo, ¿7 × 8?–, las personas emiten la respuesta automáticamente, lo que no supone una apreciación de cantidad; pero cuando se les pide que elijan el resultado más aproximado –por ejemplo, ¿está 97 + 57 más cerca de 100 o de 200?–, no tienen que ejecutar ninguna operación aritmética, sino evaluar la cantidad en sí misma. En el primer caso, cuando a los participantes se les pedía que computaran dos números para obtener una respuesta exacta, se observaba un incremento en la activación de la región inferior izquierda del lóbulo frontal –un circuito neural implicado en asociación de palabras y en recuperación de material verbal bien aprendido–. En cambio, una tarea aritmética aproximada –como el ejemplo citado anteriormente– aumentaba la activación sobre todo en los lóbulos parietales izquierdo y derecho –específicamente a la izquierda y derecha del surco intraparietal, extendiéndose anteriormente al surco poscentral y lateralmente a la parte inferior del lóbulo parietal, regiones que, como se sabe, se implican en tareas visuoespaciales–. Éste y otros resultados sugieren que las estimaciones utilizan una representación cuantitativa implementada en la red neural visuoespacial de los lóbulos parietales. Por tanto, parece claro que nuestra representación de los números se relaciona estrechamente con nuestra representación del espacio. En muchas ocasiones, los matemáticos han informado que para llegar a nuevas ideas suelen utilizar imágenes mentales, en vez de palabras. En relación con esto, es muy ilustrativa la afirmación de Albert Einstein: 'Las palabras y el lenguaje, ya sea hablado o escrito, no parecen desempeñar ningún papel en mi mecanismo de pensamiento. Las entidades psíquicas que parecen servir como elementos de pensamiento son ciertos signos e imágenes más o menos claras, que pueden ser voluntariamente reproducidos y combinados. Estos mencionados elementos son, en mi caso, de tipo visual y, algunos, muscular'.

En consonancia con los resultados anteriores, actualmente se piensa que la parte inferior del lóbulo parietal izquierdo es el centro de nuestras capacidades numéricas. La mayor parte de los resultados que nos permiten hacer esta afirmación provienen de estudios con pacientes que han sufrido algún tipo de lesión cerebral y, como se sabe, las causas de estas lesiones –golpes y enfermedades– suelen afectar a zonas más amplias. Por ello, y por el hecho de que hay variaciones en lo que se refiere a tamaño, forma y patrón de pliegues entre distintos cerebros, es difícil precisar más. No obstante, tal y como afirma Butterworth [5]: 'está claro que nuestro cerebro matemático se localiza en el lóbulo parietal izquierdo'. Pero el hecho de que la región parietal inferior parezca desempeñar un papel crucial en el sentido numérico, no quiere decir que sea la única región cerebral implicada en el procesamiento numérico. La concepción frenológica de que un área simple puede almacenar todo el conocimiento sobre un determinado dominio –por ejemplo, la aritmética–, ha dado paso a una visión más apropiada, que mantiene que son varias las áreas implicadas, ya sea para identificar números arábigos, escribirlos, comprenderlos cuando se escuchan, recuperar de la memoria el resultado de 7 × 6 o decidir el orden en que se tienen que realizar varias operaciones en un algoritmo aritmético. Así, otros estudios neuropsicológicos y las técnicas de imagen cerebral, como se ha expuesto anteriormente, han aportado pruebas de que también el lóbulo parietal derecho forma parte de un circuito neural específico para el procesamiento numérico.

MODELOS DE CIRCUITOS CEREBRALES IMPLICADOS EN EL CÁLCULO Y EN EL PROCESAMIENTO NUMÉRICO

Además de los casos de acalculia recogidos en este artículo, hay muchas más pruebas de trastornos relacionados con la aritmética mental y con el procesamiento numérico [44-65]. Esta información, conjuntamente con la obtenida utilizando las técnicas de imagen cerebral, ha permitido ampliar nuestro conocimiento sobre la cartografía cerebral asociada a la aritmética mental, así como formular distintos modelos de procesamiento de la información numérica en nuestro sistema cognitivo. Dehaene y Cohen [12] han elaborado una hipótesis sobre áreas y circuitos que participarían en el tratamiento de la información numérica. Consideran estos autores que el sistema visual –córtex occipitotemporal inferior– del hemisferio izquierdo se asocia con el reconocimiento, tanto de cifras arábigas (7) como de palabras escritas (siete), mientras que la misma región en el hemisferio derecho reconoce sólo cifras arábigas. En el caso de identificación y producción de palabras habladas, es la región perisilviana del hemisferio izquierdo la que se implica. Esta región participa también en un circuito córtico-subcortical que comprende los ganglios basales del hemisferio izquierdo, que se activa en tareas aritméticas rutinarias –tablas de sumar y multiplicar–. El córtex parietal inferior –principalmente el interior del surco intraparietal– desempeña un papel fundamental en la representación del sentido cuantitativo de los números. Finalmente, los circuitos dedicados a coordinar las intervenciones de los demás se ubican posiblemente en el córtex prefrontal y en el córtex cingulado anterior, que se asocian con la supervisión de conductas no automatizadas –planificación, ordenación secuencial, toma de decisiones, corrección de errores, mantenimiento de resultados intermedios, etc.

Los estudios neuropsicológicos han arrojado nueva luz sobre la 'arquitectura cognitiva' del procesamiento numérico. La existencia de diferentes disociaciones entre lectura y escritura de números, ya sea en notación arábiga o mediante el uso de palabras, así como entre las distintas operaciones aritméticas, ha sugerido que cada una de estas capacidades se asocia a redes neuronales altamente especializadas y comunicadas entre sí. Dependiendo del tipo de tarea, del tipo de *input* y de *output*, la información discurre por unos circuitos o por otros. Se han propuesto varios modelos sobre procesamiento numérico que intentan explicar el porqué de los déficit numéricos que muestran los pacientes:

Modelo de McCloskey

Este autor y sus colaboradores [54] desarrollaron un modelo que propone componentes separados para la comprensión y producción de números arábigos y palabras. Uno de los postulados fundamentales de este modelo es que la comunicación entre los distintos módulos de *input* y *output* está mediada por representaciones abstractas internas. Así, independientemente del código usado, la vía entre un *input* y un *output* pasa siempre por estas representaciones internas abstractas. Ésta es la principal diferencia entre este modelo y la mayoría de los modelos actuales, que proponen, además, la existencia de rutas asemánticas. La suposición de que las representaciones internas de los números son abstractas se ha criticado ampliamente y ha ocasionado la aparición de modelos alternativos, que cuentan con mayor apoyo experimental. Muchos autores consideran que estas representaciones internas de los números no son abstractas, sino específicas para cada formato.

Modelo de código triple

Se basa en tres postulados [11,12]:

1. La información numérica se puede manipular en tres tipos de códigos: una representación análoga a las magnitudes, en la que los números se representan como distribuciones de activación en la línea numérica; un formato verbal-auditivo, en el que los números se representan como cadenas de palabras; y una forma arábigo-visual, en la que los números se representan como cadenas de dígitos.
2. Hay procesos que permiten que la información se traduzca directamente de uno a otro código (transcodificación).
3. La selección de uno u otro código depende del tipo de operación mental que se requiera en cada caso. Así, por ejemplo, mientras que el código arábigo-visual se usa principalmente para las operaciones aritméticas con números de varios dígitos, el código verbal-auditivo se usa para contar y la representación análoga a las magnitudes se utiliza para comparaciones. La figura 1 ofrece un resumen esquemático de este modelo.

Modelo de Cipolotti

Además de la ruta semántica propuesta por el modelo de McCloskey, señala rutas asemánticas adicionales para los cambios de codificación. Se admite así la posibilidad de llevar a cabo transformaciones sin acceder al significado numérico [45,66] (Fig. 2).

Modelo de Cuetos y Miera

A partir del estudio de un paciente afásico con dificultades en el procesamiento numérico, estos autores [47] han presentado recientemente un modelo que modifica algunas características de otros anteriores, para que explique también las disociaciones encontradas en su estudio. Sin embargo, como reconocen los autores, 'no tenemos suficientes datos en esta investigación para plantear la cuestión de si las rutas asemánticas son o no necesarias'.

CONCLUSIONES

Los estudios neuropsicológicos mencionados nos están proporcionando un conocimiento cada vez más detallado de la implicación de distintas áreas cerebrales en el procesamiento de la información numérica. Esta topografía cerebral de la aritmética, aunque incompleta todavía, nos permite afirmar, por ejemplo, que el sentido numérico se asocia al lóbulo parietal inferior y que la resolución de cualquier tarea aritmética, por simple que sea, no supone la activación de una única área cerebral, sino la participación de varias áreas que, formando partes de distintos circuitos, constituyen el sustrato neuronal de los distintos procesos cognitivos elementales que conforman esa tarea. Estamos todavía muy lejos de saber qué pasa en nuestro cerebro cuando resolvemos una tarea matemática compleja, como, por ejemplo, resolver una ecuación cuadrática, o, en general, tareas que caen dentro del ámbito de la geometría analítica, álgebra, trigonometría, números complejos o probabilidad. El estudio de las bases cerebrales del pensamiento matemático está aún en sus inicios y, posiblemente, en un futuro cercano, con el perfeccionamiento de las técnicas de imagen cerebral, se pueda llegar a conocer mejor las causas de la acalculia y otros trastornos en el aprendizaje de las matemáticas, lo que puede suponer el principio de su solución. Finalmente, a pesar de que no ha sido objeto de este estudio, no hay que olvidar las implicaciones educativas que se derivan de este cuerpo de conocimientos que se va formando y que está dando lugar en algunos países a un nuevo enfoque educativo, que se ha dado en llamar 'educación basada en el cerebro' (en inglés, *brain-based education*).

BIBLIOGRAFÍA

1. Piaget J. The Child's Conception of Number. London: Routledge & Kegan Paul; 1952.
2. Starkey P, Cooper RG. Perception of numbers by human infants. Science 1980; 210: 1033-5.
3. Winn K. Addition and subtraction by human infants. Nature 1992; 358: 749-50.
4. Xu F, Carey S. Infants' metaphysics: The case of numerical identity. Cogn Psychol 1996; 30: 111-53.
5. Butterworth B. The mathematical brain. London: MacMillan; 1999.
6. Dehaene S. The number sense: how the mind creates mathematics. New York: Oxford University Press; 1997.
7. Moyer RS, Landauer TK. Time required for judgements of numerical inequality. Nature 1967; 215: 1519-20.
8. Dehaene S, Dupoux E, Mehler J. Is numerical comparison digital: Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. J Exp Psychol Hum Percept Perform 1990; 16: 626-41.
9. Hinrichs JV, Yurko DS, Hu JM. Two-digit number comparison: Use of place information. J Exp Psychol Hum Percept Perform 1981; 7: 890-901.
10. Dehaene S, Bossini S, Giraux P. The mental representation of parity and numerical magnitude. J Exp Psychol Gen 1993; 122: 371-96.
11. Dehaene S. Varieties of numerical abilities. Cognition 1992; 44: 1-42.

12. Dehaene S, Cohen L. Towards an anatomical and functional model of number processing. Math Cognit 1995; 1: 83-120.
13. Henschen SE. Klinische und Anatomische Beitraege zur Pathologie des Gehirns. Estocolmo: Nordiska Bokhandeln; 1920.
14. Gerstmann J. Syndrome of Finger Agnosia: Disorientation for right and left agraphia and acalculia. Arch Neurol Psychiatry 1940; 44: 398-408.
15. Warrington E. The fractionation of arithmetical skills: A single case study. Q J Exp Psychol 1982; 34A: 31-51.
16. Takayama Y, Sugishita M, Akiguchi I, Kimura J. Isolated acalculia due to left parietal lesion. Arch Neurol 1994; 51: 286-91.
17. Dehaene S, Cohen L. Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. Cortex 1997; 33: 219-50.
18. Cipolotti L, Butterworth B, Denes G. A specific deficit for numbers in a case of dense acalculia. Brain 1991; 114: 2619-37.
19. Rossor MN, Warrington EK, Cipolotti L. The isolation of calculation skills. J Neurol 1995; 242: 78-81.
20. Rémond-Besuchet C, Noel MP, Seron X, Thioux M, Brun M, Aspe X. Selective preservation of exceptional arithmetical knowledge in a demented patient. Math Cognit 1998; 5: 41-63.
21. Delazer M, Ewen P, Butterworth B, Benke T. Implicit memory and arithmetic. Paper presented at International Conference on Memory, Abano Terme, Italy; 1996.
22. Butterworth B, Cipolotti L, Warrington EK. Short-term memory impairments and arithmetical ability. Q J Exp Psychol 1996; 49A: 251-62.
23. Cipolotti L, Butterworth B, Warrington EK. From 'One thousand nine hundred and forty-five' to 1000,945. Neuropsychologia 1994; 32: 503-9.
24. Delazer M, Benke T. Arithmetic facts without meaning. Cortex 1997; 33: 697-710.
25. Cohen L, Dehaene S. Cerebral networks for number processing: Evidence from a case of posterior callosal lesion. NeuroCase 1996; 2: 155-74.
26. Gazzaniga MS, Hillyard SA. Language and speech capacity for of the right hemisphere. Neurophychologia 1971; 9: 273-80.
27. Gazzaniga MS, Smylie CE. Dissociation of language and cognition: A psychological profile of two disconnected right hemispheres. Brain 1984; 107: 145-53.
28. Seymour SE, Reuter-Lorenz PA, Gazzaniga MS. The disconnection syndrome: Basic finding reaffirmed. Brain 1994; 117: 105-15.
29. Grafman J, Kampen D, Rosenberg J, Salazar A, Boller F. Calculation abilities in a patient with a virtual left hemispherectomy. Behav Neurol 1989; 2: 183-94.
30. Dehaene S, Cohen L. Two mental calculation systems: A case study of severe acalculia with preserved approximation. Neuropsychologia 1991; 29: 1045-74.
31. Cohen L, Dehaene S. Amnesia for arithmetic facts: A single case study. Brain Lang 1994; 47: 214-32.
32. Jackson M, Warrington EK. Arithmetic skills in patients with unilateral cerebral lesions. Cortex 1986; 22: 611-20.
33. Warrington EK, James M. Tachistoscopic number estimation in patients with unilateral lesions. J Neurol Neurosurg Psychiatry 1967; 30: 468-74.
34. Roland PE, Friberg L. Localization of cortical areas activated by thinking. J Neurophysiol 1985; 53: 1219-43.
35. Rueckert L, Lange N, Partiot A, Appollonio I, Litvar I, Le Bihan D, et al. Visualizing cortical activation during mental calculation with functional MRI. Neuroimage 1996; 3: 97-103.
36. Dehaene S, Tzourio N, Frak V, Raynaud L, Cohen L, Mehler J, et al. Cerebral activations during number multiplication and comparison: A PET study. Neuropsychologia 1996; 34: 1097-106.
37. Dehaene S, Mehler J. Cross-linguistic regularities in the frequency of number words. Cognition 1992; 43: 1-29.
38. Pesenti M, Seron X, van der Linden M. Selective impairment as evidence for mental organization of arithmetical facts: BB, a case of preserved subtraction? Cortex 1995; 31: 661-72.
39. Girelli L, Delazer M. Subtraction bugs in an acalculic patient. Cortex 1996; 32: 547-55.
40. Caramazza A, McCloskey M. Dissociations of calculation processes. In Deloche G, Seron X, eds. Mathematical Disabilities: A Cognitive Neuropsychological Perspective. Hillsdale, NY: Lawrence Erlbaum; 1987.
41. Hittmair-Delazer M, Semenza C, Denes G. Concepts and facts in calculation. Brain 1994; 117: 715-28.
42. Dehaene S, Spelke E, Pinel P, Stanescu R, Tsivkin S. Sources of Mathematical Thinking: Behavioral and Brain-Imaging Evidence. Science 1999; 284: 970-4.
43. Stanescu R, Pinel P, van de Moortele PF, Le Bihan D, Cohen L, Dehaene S. Understanding dissociations in dyscalculia: A brain imaging study of the impact of number size on the cerebral networks for exact and approximate calculation. Brain 2000; 123: 2240-55.
44. Campbell JID, Clark JM. An encoding complex view of cognitive number processing: Comment on McCloskey, Sokol and Goodman (1986). J Exp Psychol Gen 1988; 117: 204-14.
45. Cipolotti L, Butterworth B. Toward a multiroute model of number processing: Impaired number transcoding with preserved calculation skills. J Exp Psychol 1995; 124: 375-90.
46. Cipolotti L, Warrington EK, Butterworth B. Selective impairment in manipulating arabic numerals. Cortex 1995; 31: 73-86.
47. Cuetos F, Miera G. Number Processing Dissociations: Evidence from a Case of Dyscalculia. Spanish J Psychol 1998; 1: 18-31.
48. Dagenbach D, McCloskey M. The organization of arithmetic facts in memory: Evidence from a brain-damaged patient. Brain Cognit 1992; 20: 345-66.
49. Deloche G, Seron X. From one to 1: An analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. Cognition 1982; 12: 119-49.
50. Deloche G, Seron X. From three to 3: A differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wernicke's aphasia. Brain 1982; 105: 719-33.
51. Deloche G, Seron X. Semantic errors reconsidered in the procedural light of stack concepts. Brain Lang 1984; 21: 59-71.
52. Deloche G, Seron X. Numerical transcoding: A general production model. In Deloche G, Seron X, eds. Mathematical Disabilities: A Cognitive Neuropsychological Perspective. Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum; 1987.
53. Macaruso P, McCloskey M, Aliminosa D. The functional architecture of the cognitive numerical-processing system: Evidence from a patient with multiple impairments. Cogn Neuropsychol 1993; 10: 341-76.
54. McCloskey M. Cognitive mechanisms in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. Cognition 1992; 44: 107-57.
55. McCloskey M. Theory and evidence in cognitive neuropsychology: A radical response to Robertson, Knight, Rafal, and Shimamura (1993). J Exp Psychol Learn Mem Cogn 1993; 19: 718-34.
56. McCloskey M, Caramazza A. Cognitive mechanisms in normal and impaired number processing. In Deloche G, Seron X, eds. Mathematical Disabilities: A Cognitive Neuropsychological Perspective. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum; 1987.
57. McCloskey M, Caramazza A, Basili A. Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. Brain Cognit 1985; 4: 171-96.
58. McCloskey M, Sokol SM, Goodman A. Cognitive processes in verbal-number production: Inferences from the performance of brain-damaged subjects. J Exp Psychol Gen 1986; 115: 307-30.
59. McCloskey M, Aliminosa D, Sokol SM. Facts, rules and procedures in normal calculation: Evidence from multiple single-patient studies of impaired arithmetic fact retrieval. Brain Cognit 1991; 17: 154-203.
60. McCloskey M, Harley W, Sokol SM. Models of arithmetic fact retrieval: An evaluation in light of findings from normal and brain-damaged subjects. J Exp Psychol Learn Mem Cogn 1991; 17: 377-97.
61. McCloskey M, Macaruso P, Whetstone T. The functional architecture of numerical processing mechanisms: Defending the modular model. In Campbell JID, ed. The nature and origins of mathematical skills. **¿CIUDAD?** Elsevier Science; 1992. p. 493-537.
62. Noel MP, Seron X. Arabic number reading deficits: A single case study. Cogn Neuropsychol 1993; 10: 317-39.
63. Seron X, Deloche G. From 4 to four: A supplement to from three to 3. Brain 1983; 106: 735-44.
64. Sokol SM, Goodman-Schulman R, McCloskey M. In defense of a modular architecture for the number-processing system: Reply to Campbell and Clark. J Exp Psicol 1989; 118: 105-10.
65. Sokol SM, McCloskey M, Cohen NJ, Aliminosa D. Cognitive representations and processes in arithmetic: Evidence from the performance of brain-damaged patients. J Exp Psychol Learn Mem Cogn 1991; 17: 355-76.
66. Cipolotti L. Multiples routes for reading words, why not numbers? Evidence from a case of arabic numeral dyslexia. Cogn Neuropsychol 1995; 12: 313-42.

MECANISMOS CEREBRALES DEL PENSAMIENTO MATEMÁTICO

Resumen. Objetivo. *Ofrecer una cartografía cerebral del pensamiento matemático elemental, e integrar los resultados más relevantes procedentes del ámbito de la neuropsicología con los de las técnicas de imagen cerebral, y con aquellos obtenidos a partir de experimentos cognitivo-conductuales.* Desarrollo. *En primer lugar se presentan las investigaciones sobre el origen de nuestro sentido numérico y sobre la forma en la que en nuestro cerebro se representa la información numérica. A continuación, desde un enfoque multidisciplinar, se presentan resultados de distintos estudios sobre el síndrome de Gerstmann, sobre la relación entre la habilidad numérica y otras habilidades cognitivas; la diferente participación de los hemisferios cerebrales y la especial implicación del lóbulo parietal en las tareas matemáticas.* Conclusión. *Al realizar cualquier tarea aritmética mental, por muy elemental que sea, intervienen distintas regiones cerebrales, hecho que nos hace pensar más en términos de circuitos cerebrales que en una idea frenológica que asigne a una determinada región la responsabilidad del cálculo aritmético. La convergencia entre los resultados analizados nos permite afirmar que una región en particular sobresale por su implicación en la comprensión del sentido numérico: la parte inferior del lóbulo parietal. Dependiendo del tipo de tarea, del input y del* output, *se utilizan distintos circuitos neuronales. Finalmente se exponen los modelos de procesamiento numérico más relevantes que se han generado a partir de toda la investigación. [REV NEUROL 2001; 33]*

Palabras clave. *Acalculia. Discalculia. Lóbulo parietal. Pensamiento matemático. Procesamiento numérico. Síndrome de Gerstmann.*