



Matemáticas y cerebro

Melania Ballestra, Julia Martínez y Pablo Argibay

“Aunque todos estos principios y la representación del objeto de que se ocupa la matemática, son producidos totalmente a priori en el espíritu, nada significarían si no pudiéramos exponer siempre su significación en objetos empíricos.”

Immanuel Kant

Crítica de la Razón Pura, Libro segundo

Doctrina trascendental del juicio. Analítica de los principios

“Los números, como el color, el olor, el sonido, o el movimiento, son una propiedad básica del medio ambiente...”

Stanislas Dehaene

A lo largo de la selección natural, nuestras mentes se han adaptado a las condiciones del mundo externo. Se ha seleccionado la geometría más ventajosa para nuestra especie. O, en otras palabras, la más conveniente.

Henri Poincaré

La Ciencia y la hipótesis

INTRODUCCIÓN

En general, se considera que la habilidad que poseemos los humanos para procesar objetos matemáticos, como contar, sumar, restar, etc., se ha adquirido progresivamente a lo largo de la historia de nuestra especie. Habitualmente, la historia de la matemática se narra como una serie de logros de determinadas culturas en un determinado contexto y pasados luego a otras culturas, las cuales aplicarán, mejorarán y continuarán el ciclo de adquisición de ese cuerpo de conocimientos que en general se ha dado en llamar “las matemáticas”. Ahora bien, ¿es este tipo de conocimiento exclusivo de la cultura y por lo tanto limitado al ser humano? ¿Carecen de conocimiento matemático los animales y los niños en etapas muy tempranas de su desarrollo? ¿Son las habilidades matemáticas un logro evolutivo presente en varias especies y desarrolladas al máximo por el ser humano? En lo que sigue, trataremos de abordar estas cuestiones. Sin embargo, es justo alertar a los lectores que la hipótesis de trabajo que consideramos los autores (no original por cierto), es que el significado básico de los números (la representación de cantidades), pareciera ser una información que traemos incorporada dentro nuestro, como un componente más de nuestro instinto y por lo tanto plausible de estar presente en otras especies en las cuales el procesamiento numérico es claramente una ventaja evolutiva.

EL SENTIDO NUMÉRICO

Una leona, sin previa enseñanza, puede notar que su grupo es más numeroso que el contrincante y así iniciar un ataque en busca de comida para sí y para su cría. Un ser humano de tan sólo seis meses de vida puede discriminar visualmente cuando se le presentan, primero, un grupo con dos objetos, y luego, con tres objetos. En ambos casos, se trata de animales que no han sido adiestrados aritméticamente y en los cuales se puede suponer que el entorno no ha influido culturalmente para tener un manejo intuitivo de cantidades. Se ha observado a través de elegantes estudios cognitivos, que bebés de entre cinco y siete meses de edad tendrían la capacidad de discriminar visualmente conjuntos de dos y de tres objetos, sin una enseñanza previa. En estas pruebas, se hacía que los bebés observaran ciertas diapositivas detenidamente durante un período de tiempo, las que se cambiaban cuando el bebé dirigía la mirada hacia otra parte. Al principio de la prueba, las diapositivas siempre contenían dos puntos negros, aunque separados entre sí por distancias variables. Después de un tiempo, el bebé comenzaba a mirar las diapositivas durante lapsos progresivamente más cortos, lo cual significaría que el bebé se aburría. Entonces se cambiaba a diapositivas con tres puntos e inmediatamente el bebé volvía a mirar fijo, durante un período más largo. Se obtuvieron los mismos resultados mostrando primero las diapositivas con 3 puntos y luego con 2 puntos.

Estos experimentos, inicialmente realizados con bebés de entre 5 y 7 meses de edad, mostraron los mismos resultados cuando se pusieron en práctica con recién nacidos. Esto sugeriría que los bebés poseen una capacidad innata para el procesamiento numérico, o al menos que cambios en las cantidades de objetos que se le presentan serían capaces de captar su atención. Obviamente, estos cambios de atención no estarían determinados exclusivamente por cambios en el área total observada o la separación de los objetos. Por otra parte, se ha observado que los recién nacidos pueden discriminar palabras de dos o tres sílabas, controlando el contenido fonético, la duración y la velocidad del discurso.

En relación a las habilidades “matemáticas” de los infantes, se han realizado interesantes experimentos. En uno de ellos, se colocaba una marioneta sobre un escenario, el que era cubierto por un telón. Otra marioneta idéntica era colocada delante del telón mientras el bebé observaba. Luego, el telón era abierto. Si había dos marionetas, el bebé no se sorprendía y no miraba durante mucho tiempo al escenario. Si había sólo una, el bebé miraba al escenario durante un tiempo más prolongado, ya que esperaba encontrar dos marionetas en lugar de una. Si se agregaba otra marioneta, al observar tres objetos, el bebé tenía la misma reacción que cuando había encontrado sólo una. Así, sería posible concluir que el bebé puede decir que el agregado de uno a uno es dos, y no uno ni tres.

En otros experimentos similares, se agregaron o quitaron marionetas y se pusieron pelotas en lugar de marionetas. Los resultados sugieren que los bebés utilizan mecanismos abstractos y no de mera localización de objetos.

Muchos de estos experimentos dan lugar a discusión acerca de si reflejan la representación de habilidades aritméticas en edades tempranas. Otro enfoque sugiere que los bebés tienen la habilidad de mantener una huella de tres o cuatro objetos a través de una representación del “archivo del objeto”, en la cual la numerosidad podría estar codificada implícitamente y no representada explícitamente. El grupo de Elizabeth Spelke, en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), ha estudiado la capacidad de los infantes de detectar cantidades presentadas en forma visual. Bebés de 6 meses de edad fueron capaces de discriminar cantidades cuando éstas eran presentadas en cocientes de “2” (16 *versus* 8). El mismo grupo investigó las capacidades de discriminación de cantidades presentadas en forma auditiva, llegando a los mismos resultados. Sin embargo, bebés de 9 meses de edad fueron capaces de discriminar cantidades presentadas en otros cocientes. En general, este grupo considera que los niños son capaces de discriminación de cantidades (numerosidad), a lo largo de su desarrollo, hasta la emergencia del lenguaje y la discriminación numérica simbólica. En trabajos posteriores, los autores consideraron que si bien algunos conceptos numéricos como el de “números reales” son patrimonio sólo de los humanos adultos, otras habilidades numéricas están presentes en humanos adultos, niños y aun otras espe-

cies. En este subgrupo, existirían habilidades numéricas relacionadas con un sistema más rudimentario de captación de grandes diferencias en las cantidades y un sistema de aproximación. A lo largo de su desarrollo, los humanos adultos, en cambio, desarrollarían un sistema más “fino” para la representación precisa de pequeñas cantidades. Los niños en edad preescolar, entonces, podrían comparar y aun adicionar conjuntos de elementos presentados en dos formatos al menos (visual y auditivo), sin obviamente intentar siquiera contarlos. Parecería que un “vistazo” o escucha de conjuntos de elementos pueden ser procesados instintivamente. De hecho, teniendo como modelo los trabajos del grupo de Spelke, hemos montado en el Instituto de Ciencias Básicas y Medicina Experimental del Hospital Italiano (ICBME), un *software* para implementar estas pruebas. Sorprendentemente, ningún adulto fue capaz de obtener resultados satisfactorios en las pruebas que se han administrado en niños. La observación siempre fue la misma: los adultos muestran tendencia a contar los objetos presentados en la pantalla de la computadora, pero los tiempos de representación son tan breves que hacen imposible este tipo de operación de “conteo”.

Los resultados del grupo de Spelke y otros, no son meramente académicos: de existir un sentido o instinto numérico innato, la educación de los niños no puede dejar de tener en cuenta el conocimiento de los aspectos psicológicos y biológicos de este “sentido numérico”.

¿Y qué de las habilidades geométricas? ¿Se parece nuestro mundo captado acriticamente por los sentidos a la geometría de Euclides por una cuestión cultural, o simplemente porque previamente al nacimiento ya traemos un “cableado” cerebral que sólo nos permite construirlo de esta manera? ¿Cómo probar esto? ¿Dónde encontrar un grupo humano lo suficientemente aislado de la cultura y escolarización geométrica? En un trabajo reciente de la revista *Science*, Stanislas Dehaene, del INSERM francés y Elizabeth Spelke, de la Universidad de Harvard, estudiaron una tribu del Amazonas lo suficientemente aislada como para probar la hipótesis de un “instinto geométrico” previo a la escolarización. Entre estos individuos, los investigadores hallaron que los niños del grupo Mundurukú utilizan conceptos geométricos básicos, como los de “punto”, “línea”, “paralela” y otros, cuando se les presentan diversas imágenes o para localizar objetos en planos.

Si la capacidad para la matemática tiene un sustrato cerebral específico, el cual está bajo control genético, uno, siendo coherente con una continuidad evolutiva, debería encontrar los precursores de esta habilidad en los animales. En experimentos con animales, éstos han sido capaces de responder a la presentación de estímulos visuales, auditivos y motores en diferentes cantidades. La duda inmediata es cómo puede uno estar seguro de que los animales están procesando números en vez de algún otro parámetro del estímulo. Para responder a esta pregunta, se han realizado varios experimentos en animales que previamente habían

sido entrenados para discriminar cantidades, ya sea de forma visual o auditiva y luego ambas formas en combinación. Es decir, presentando las cantidades en forma multimodal. Los animales respondieron correctamente a los diferentes estímulos, lo que sugiere que poseen una capacidad abstracta para procesar números.

Para demostrar que las habilidades aritméticas tienen una base biológica con una larga evolución histórica, no es suficiente evidenciar que tanto los animales como los pre-verbales poseen habilidades rudimentarias para procesar números, sino que debería existir una relación filogenética que demuestre la homología entre los animales y los seres humanos. De hecho, se han presentado dos características que comparten los animales con los humanos en relación al procesamiento numérico: el efecto de la distancia y el valor numérico. El efecto de la distancia es una disminución sistemática en la discriminación numérica a medida que la distancia entre los números disminuye. El efecto del valor indica que para una distancia constante entre los números, la capacidad disminuye cuanto mayor es el valor del número. Estos dos efectos fueron identificados en diferentes especies animales cuando el animal debía identificar cuál número era más grande en presencia de dos cantidades numéricas, o decir si dos cantidades eran la misma o no. Esto demostró que los animales no están limitados al procesamiento de números pequeños únicamente, como sí sucede con los pre-verbales, de los cuales hay evidencia que sugiere que son capaces de discriminar 2 y 3, ó 4 y 5, pero no 4 y 6.

Los efectos de la distancia y el valor numérico indican que los animales y los infantes parecen poseer una representación confusa de los números, en la cual la imprecisión crece a medida que el número es representado. Como consecuencia, sólo pequeños números pueden ser representados exactamente, mientras que otras cantidades son cada vez más imprecisas.

Superficialmente, este modo de representación parece diferir en la clase de representación que los humanos escolarizados usan en aritmética. Los animales están limitados a cálculos elementales, aproximados y no simbólicos, mientras que los adultos pueden hacer cálculos simbólicos con una exactitud arbitraria. Pero esto no quiere decir que no exista una continuidad filogenética en el procesamiento matemático, ya que estos efectos se mantienen en los adultos. Al comparar números arábigos, es más fácil y rápido decidir que 8 es más grande que 4, en lugar de decidir que 8 es mayor que 7, incluso con intensivo entrenamiento. El efecto de la distancia se encuentra también en números de dos dígitos. El efecto del valor numérico está relacionado con la habilidad que tenemos para nombrar la numerosidad de un conjunto de objetos presentados simultáneamente, cuando está debajo de 3 ó 4, pero no más allá. Incluso en adultos altamente entrenados, la multiplicación, adición o la comparación entre dos números grandes como 8 y 9 resulta demasiado lenta en relación con la ejecución de tales operaciones con dígitos como 2 y 3.

Este comportamiento de los humanos, que obedece a los efectos de distancia y valor numérico a pesar de que los números se representen simbólicamente, sugiere dos conclusiones. Primero, que el cerebro humano contiene una representación analógica de la cantidad numérica muy similar a la observada en animales e infantes pre-verbales, organizada por la proximidad numérica y con una creciente confusión para números cada vez más grandes. Segundo, que cuando los números son presentados en forma de dígitos arábigos o con palabras, el cerebro convierte internamente estos números desde su formato simbólico a una representación analógica cuantitativa. Este acceso interno a la cantidad parece ser un paso obligatorio en el procesamiento numérico, porque el efecto de la distancia es encontrado aún cuando los sujetos tienen que decir si dos dígitos son iguales o diferentes.

Y EL CEREBRO...

Utilizando técnicas de emisión de positrones, se ha estudiado el cerebro de voluntarios que efectuaban tareas complejas de cálculo, observándose una alteración metabólica en las regiones frontales y parietales. Más adelante, se observó una importante participación del lóbulo parietal. Analizando estos datos y combinándolos con análisis neuropsicológicos, se ha planteado una hipótesis que propone un *modelo de triple-código*. En este modelo, dependiendo de la tarea designada, la información numérica puede ser manipulada mentalmente en tres formatos diferentes:

1. *Sistema cuantitativo y Representación semántica* no verbal de las relaciones de la distancia y el valor entre los números, que podría ser categoría-específica.
2. *Sistema verbal*, en el cual los números están representados como un “cordel de palabras” (por ejemplo, treinta y siete).
3. *Sistema visual*, en el cual los números están representados como un cordel de números arábigos (por ejemplo, 37).

Este modelo predice que cada uno de los tres sistemas está asociado con tres circuitos del lóbulo parietal: un sistema bilateral intraparietal asociado con el sistema cuantitativo; el giro angular izquierdo asociado con el sistema verbal y un sistema superior posterior parietal de atención espacial y no espacial.

Aunque este modelo parece ser demasiado simple, permite explicar una variedad de observaciones comportamentales y neuropsicológicas.

En estudios de neuro-imagen, se ha observado que la región más activa del cerebro durante el desarrollo de tareas que requieren procesamiento numérico, es la del segmento horizontal del surco intraparietal (HIPS), que codifica para la representación analógica de la magnitud numérica (Figura 1). Se piensa que una especie de mapa espacial o “línea numérica”, una representación no verbal de la cantidad numérica, está presente en ambos hemisferios del HIPS; supelementalmente, esto es lo que nos “dota” del conocimiento

intuitivo sobre el valor numérico y la relación de proximidad entre los números.

Diferentes experimentos permitieron demostrar que el HIPS es más activo cuando el sujeto estima el resultado aproximado de un problema de adición que cuando computa la solución exacta. También, esta región es más activa durante operaciones que requieren una manipulación genuina de las cantidades numéricas, tales como la resta, más que aquellas que requieren del aprendizaje de memoria, como la multiplicación. Más aún, su activación está modulada por parámetros semánticos, como el valor absoluto de los números.

El HIPS es más activo a la hora de comparar números que al procesar otras categorías de objetos en escalas no numéricas (como días de la semana, letras o colores).

Los números arábigos, el deletreo de las letras de un número y hasta los estímulos no simbólicos como las manchas, pueden activar esta región si el sujeto atiende al número correspondiente. La activación del HIPS derecho se observó cuando los sujetos atendían al número sin importar la modalidad del estímulo. En otro estudio, la activación bilateral del HIPS se encontró al realizar una tarea comparativa entre la distancia de dos números, y este efecto se observó cuando los números eran presentados como palabras o como dígitos. Estos resultados son consistentes con la hipótesis de que el HIPS codifica de forma abstracta el significado cuantitativo de los números, más que los símbolos numéricos en sí.

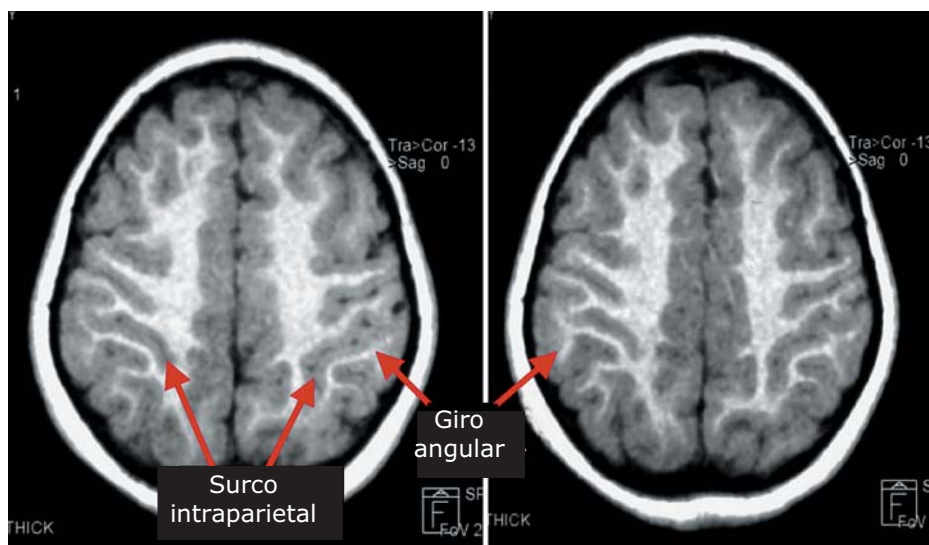
La activación del HIPS también se demostró en una tarea en la cual los sujetos no eran conscientes de los números. En un estudio de comparación en el que se presentaba un número particular, se observó menor activación en ambos

hemisferios de la región parietal cuando el número observado y el número seleccionado representaban la misma cantidad (en forma subliminal y presentado en otro formato, por ejemplo: 1 y uno), que cuando los números eran diferentes (por ejemplo: 1 y cuatro), sugiriendo que esta región comprende distintos arreglos neurales para diferentes cantidades. Por lo tanto, cuando tales arreglos trabajan de forma simultánea, hay una mayor activación que cuando trabaja uno solo.

Finalmente, observaciones neuropsicológicas confirman el rol crucial del HIPS en la representación de las cantidades numéricas. Varios casos individuales de personas con lesiones cerebrales o en período de desarrollo, han presentado la doble disociación de los números respecto de otras categorías de palabras a nivel semántico. Por un lado, pacientes con deterioros groseros en el procesamiento semántico, tienen una reducida habilidad para la comprensión y el cálculo numérico. Dichas lesiones afectan ampliamente la región temporofrontal, mientras que son escasas en las zonas intraparietales.

Algunos pacientes que sufren del síndrome de Gertman (un tipo especial de acalculia con características tales como agrafia, agnosia de dedo y dificultades en la distinciones derecho-izquierdo), han sido motivo de estudio debido a que tales deficiencias están causadas por lesiones centradas en el surco intraparietal izquierdo, lo cual es compatible con los resultados obtenidos del estudio de imágenes cerebrales que mostraron la activación del surco intraparietal durante tareas de manipulación numérica independientes del lenguaje. Cuando se realizó un análisis de resonancia magnética funcional (fMRI) con los mismos sujetos, para comparar la localización de la activación parietal

Figura 1. Imagen transversal del cerebro, obtenida por técnica de resonancia magnética nuclear (MRI), donde se observan dos estructuras parietales involucradas en el procesamiento de objetos matemáticos, el surco intraparietal (HIPS) y el giro angular (AG). Cortesía de la Dra. Cristina Besada, Sección de Neuroradiología del Servicio de Diagnóstico por Imágenes del Hospital Italiano de Buenos Aires.

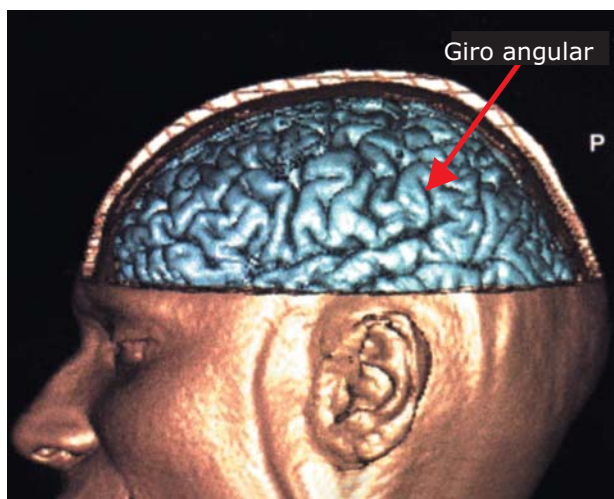


durante la sustracción numérica con la observada durante la realización de tareas que involucran el lóbulo parietal (tales como movimiento ocular y atención, asir con la mano, señalar con el dedo y tareas de lenguaje de detección fonológica), se encontró una región de “cuatro esquinas” en el surco intraparietal, en la cual hay cuatro áreas en yuxtaposición: cálculo, cálculo y lenguaje, tareas manuales solamente, y un área activada durante tareas visuoespaciales. Lesiones simultáneas en estas regiones podrían implicar un deterioro conjuntivo del cálculo, procesamiento de la palabra, movimiento y conocimiento del dedo, y en las referencias de alto nivel espacial. Dado que las ramificaciones de la arteria cerebral media, la arteria del giro angular, se encargan de alimentar toda esta región cortical, podría explicarse por qué tales lesiones conjuntivas son tan frecuentes: los límites entre estas regiones corticales, así como también en los patrones de ramificación de esta arteria explicaría por qué el déficit del síndrome de Gertman podría ser disociado.

El HIPS es la región más importante para el correcto desarrollo de las habilidades numéricas. Sin embargo, no es el único sistema involucrado en el procesamiento numérico. Muchos estudios sugieren que procesos basados en el lenguaje juegan un rol importante en los cálculos exactos, pero no en los aproximados.

Un estudio reciente de la actividad del cerebro permitió diferenciar dos sistemas en el lóbulo parietal, que a menudo están involucrados en tareas numéricas, aunque su función primaria no es específica para los números. Se encontró una región relacionada al lenguaje en el giro angular izquierdo asociada con el procesamiento verbal de los números, y una región visuoespacial en el lóbulo parietal superior posterior, posiblemente asociado con la atención.

Figura 2. Reconstrucción tridimensional del lóbulo parietal izquierdo donde se observa el giro angular (AG). Imagen de MRI. Cortesía de la Dra. Cristina Besada, Sección de Neuroradiología del Servicio de Diagnóstico por Imágenes del Hospital Italiano de Buenos Aires.



En estudios de neuroimagen, se pudo observar que el *giro angular* (AG), a menudo se activa durante el procesamiento numérico (Figuras 1 y 2). Sus propiedades funcionales son muy diferentes a las del HIPS. El giro angular izquierdo no parece estar relacionado con los procesos de cantidades, pero muestra una gran actividad en tareas que requieren del procesamiento verbal. Es por esto que se propone que esta región es parte del sistema del lenguaje, y contribuye al procesamiento numérico sólo en algunas operaciones aritméticas, tales como la multiplicación, haciendo una fuerte demanda verbal en el código verbal de los números. Apoyando esta hipótesis, parecería que el giro angular izquierdo no está involucrado en cálculos, pero sí en procesos mediados por el lenguaje, tales como la lectura o el aprendizaje de memoria.

En un estudio de fMRI de seis tareas diferentes, el giro angular izquierdo fue el único sitio parietal donde hubo superposición de la actividad para cálculos y detección fonética, pero no hubo activación durante las otras cuatro tareas visuoespaciales. Esto indicaría que el giro angular izquierdo no es específico para los cálculos.

Algunos estudios indican que relacionado a los cálculos, existe una regulación en la activación del giro angular en proporción directa a los requerimientos verbales de la tarea. Primero, el giro angular es más activo en cálculos exactos que en aproximación. Esto concuerda con datos del comportamiento que indican que los hechos aritméticos exactos están almacenados en un formato del lenguaje específico (bilingüal), mientras que el conocimiento sobre aproximación es independiente del lenguaje y muestra un clásico efecto de distancia numérica asociado con el sistema cuantitativo no verbal. Segundo, dentro del cálculo exacto, el giro angular izquierdo muestra una importante activación para operaciones que requieren acceso a un aprendizaje de memoria verbal para hechos aritméticos, tales como la multiplicación, en vez de para operaciones que no están almacenadas y requieren alguna forma de manipulación cuántica.

En resumen, la contribución del giro angular izquierdo al procesamiento numérico está relacionada con las bases lingüísticas de los cálculos aritméticos. Su contribución parece ser esencial para la recuperación de hechos almacenados en una memoria verbal, pero no para otras tareas numéricas (como la resta, la comparación de números, o los cálculos complejos).

La participación del AG izquierdo en el procesamiento matemático estaría relacionada con las bases lingüísticas de los cálculos matemáticos. Esta diferenciación funcional entre el HIPS y el AG puede ser evidenciada en pacientes que sufren acalculia: varios sujetos presentan mayores deterioros en la resolución de una multiplicación que en la sustracción, y muchos otros al revés. Se ha sugerido que tales disociaciones reflejan una distinción fundamental entre los hechos matemáticos aprendidos y almacenados en la memoria, la multiplicación, y el puro entendimiento del sig-

nificado numérico que subyace en operaciones tales como la sustracción. Debido al mecanismo de memorización, la multiplicación requiere de la integridad de una representación basada en el lenguaje del significado numérico; en contraste, la sustracción no es aprendida de memoria, aunque se postula que estaría involucrada alguna manipulación interna de las cantidades numéricas, tal como lo observado en niños y primates no humanos, que están capacitados para resolver pequeños problemas de sustracción.

Un caso muy especial mostró claramente el deterioro de la multiplicación con escasez en la sustracción. Se estudiaron dos pacientes que tenían déficit en la lectura, cuyas lesiones afectaban el acceso al lenguaje a través de los símbolos visuales. Lo sorprendente fue que uno de ellos podía resolver la sustracción mejor de lo que podía leer el problema. Esto corroboraría aún más la idea de que la sustracción, pero no la multiplicación, sería independiente respecto del sistema de lenguaje.

Gracias a dos estudios realizados para evaluar el deterioro temporal en el cálculo, causado por estimulación eléctrica cerebral, se logró una importante evidencia de las disociaciones entre el procesamiento de la cantidad por parte del HIPS, y el procesamiento verbal numérico del AG. Colocando diversos listones de electrodos sobre las regiones parietal izquierda, temporal superior y frontal posterior, se encontró que la estimulación de un electrodo, situado en la región izquierda del parietal inferior, cercano al giro angular, causaba sistemáticamente una disrupción en la ejecución de la multiplicación, más que en la ejecución de la adición (27% vs. 87% correctos). Sorprendentemente, se observó que el desarrollo de los problemas de multiplicación empeoraba cuando las respuestas eran dadas oralmente, con respecto a cuando eran *tipiadas*, sugiriendo que la estimulación eléctrica también afectaba el codificado verbal de los números.

La adición, por su parte, también está presente dentro del conjunto de operaciones que representan disociaciones. En particular, la adición se asemeja a la multiplicación en que puede ser resuelta a través de un mecanismo que recurre a la memoria. Por otro lado, es similar a la sustracción porque puede ser resuelta por medio de estrategias de manipulación cuantitativa. Es por esto que el mecanismo de la adición es difícil de predecir y varía considerablemente entre paciente y paciente. En el modelo de disociaciones propues-

to, la ejecución de la adición no puede disociarse de la sustracción ni la multiplicación en conjunto. Es decir, que si no presenta deterioros en la adición tampoco debería presentar deterioros en la sustracción ni la multiplicación, pues esto implicaría que tanto el circuito verbal como el cuantitativo están intactos. Sin embargo, tampoco es posible que tenga deterioradas tanto la sustracción como la multiplicación y no presente dificultades en la adición, dado que implicaría que ambos sistemas están deteriorados.

Todos los datos de disociaciones entre operaciones matemáticas provenientes de estudios neuro-psicológicos permiten sugerir que no existen tantos circuitos cerebrales como operaciones matemáticas haya. Más bien podría postularse que existe una disociación entre el circuito cuantitativo y el circuito verbal.

Por último, los estudios de neuro-imagen han revelado una tercera región activa durante el desarrollo de tareas que implican procesamientos numéricos. En el lóbulo parietal posterior superior, esta región se ubica posterior al HIPS, y superior y medial con respecto al AG. Está activa durante la comparación y la aproximación numérica, la sustracción de dos dígitos, y el conteo. También se observó que su activación aumenta cuando los sujetos realizan dos operaciones en vez de una, aunque está claro que esta región no es específica del dominio numérico, sino que juega un papel central en un conjunto de tareas visuoespaciales.

CONCLUSIÓN

Si bien parecería haber un resurgimiento de un *localizacionismo* cerebral fuerte a partir del uso de las imágenes computarizadas, las habilidades mentales relacionadas con tareas complejas, tales como el procesamiento numérico, resultan bastante difíciles de aislar y localizar en una determinada área cerebral. Por el momento, aunque las técnicas de neuro-imagen han permitido diferenciar tres regiones del cerebro implicadas en el proceso matemático, en conjunto con estudios neuropsicológicos se ha revelado que al menos dos de estas regiones no son específicas para el campo numérico (el giro angular y el PSPL-*Posterior Superior Parietal Lobe*). En contraste con éstas, el HIPS ha tenido mayor participación en el campo numérico. De hecho, su activación es mayor con palabras numéricas que con otro estilo de palabras y está incrementada de acuerdo a la cantidad que se requiera, aunque es independiente de la notación de los números utilizada.

REFERENCIAS

- Dehaene S. The number sense. New York: Oxford University Press, 1997.
- Dehaene S, Dehaene-Lambertz G, Cohen L. Abstract representations of numbers in the animal and human brain. Trends Neurosci 1998;21(8):355-61. Errata en: Trends Neurosci 1998;21(12):509.
- Dehaene S, Molko N, Cohen L, Wilson AJ. Arithmetic and the brain. Curr Opin Neurobiol 2004 Apr;14(2):218-2.
- Dehaene S, Piazza M, Pinel P, Cohen L. Hthree parietal circuits for number processing. Cogn Neuropsychol 2003;20(3-6):487-506.
- Dehaene S, Spelke E, Pinel P, Stanescu R, Tsivkin S. Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. Science 1999;284(5416):970-4.
- Lipton JS, Spelke ES. Origins of number sense. Large-number discrimination in human infants. Psychol Sci 2003;14(5):396-401.
- Xu F, Spelke ES. Large number discrimination in 6-month-old infants. Cognition 2000;74(1):B1-B11.