

ACTIVACIÓN DEL SURCO INTRAPARIETAL BILATERAL DURANTE LA ADAPTACIÓN NUMÉRICA MEDIDA POR FNIRS: VALIDACIÓN DE UNA TAREA EXPERIMENTAL EN UNA MUESTRA BICULTURAL
ACTIVATION OF THE BILATERAL INTRAPARIETAL SULCUS DURING NUMERICAL ADAPTATION MEASURE BY FNIRS: VALIDATION OF AN EXPERIMENTAL TASK IN A BICULTURAL SAMPLE

Daniela Escobar-Magariño ¹

Qinghua He ²

¹ Facultad de Psicología de la Universidad de La Habana

² Facultad de Psicología de la Universidad de Southwest

Recibido: 8 de junio de 2022

Aceptado: 5 de julio de 2022

Publicado: 31 de enero de 2023

Cómo citar este artículo:

Escobar-Magariño D & Qinghua H. (2023). Activación del surco intraparietal bilateral durante la adaptación numérica medida por fnirs: validación de una tarea experimental en una muestra bicultural s. *Revista cubana de Psicología*, 5 (7), 246-266. <http://www.psicocuba.uh.cu>

RESUMEN

El paradigma de adaptación neural constituye un enfoque clave para el estudio del procesamiento numérico. A pesar de las múltiples ocasiones en las que este ha sido empleado en dicho campo de investigación, no existen muchas experiencias que combinen este paradigma con la Espectroscopía de Infrarrojo Cercano funcional (FNIRS) como método de neuroimágenes para medir la actividad del Surco Intraparietal (SIP) durante la adaptación numérica. En la presente investigación evaluamos la validez de una versión del paradigma de adaptación neural para generar activación en el Surco Intraparietal bilateral que sea medible a través de FNIRS en una muestra de nativos chinos y nativos árabes. Para ellos, 4 estudiantes universitarios nativos del chino y 4 estudiantes universitarios nativos del árabe, completaron la tarea diseñada, mientras se medía la actividad en la corteza parietal con FNIRS. La actividad del Surco Intraparietal detectada durante la realización de la tarea diseñada fue media; lo cual podría estar relacionado con limitaciones del aparato, que

aumentan el ruido de la señal y disminuyen el poder estadístico de los datos; o a algunas variables que no fueron debidamente controladas durante la aplicación de la tarea. En función de estas conclusiones, se realizaron modificaciones a la tarea, y al diseño de la investigación que la empleará como instrumento.

Palabras claves: adaptación numérica; FNIRS; SIP bilateral; nativos árabes; nativos chinos.

ABSTRACT

The Adaptation Paradigm constitutes a key approach to the study of number processing. Despite the many times it has been used in this field of research, there are not many experiences that combine this paradigm with functional Near Infrared Spectroscopy (FNIRS) as a neuroimaging method to measure the activity of the Intraparietal Sulcus (IPS) during numerical adaptation. In the present study, we measured if the modifications made to the Adaptation Paradigm generate activation in the bilateral Intraparietal Sulcus, that is measurable through FNIRS in a sample of native Chinese speakers and native Arabic speakers. For that, 4 native Chinese college students and 4 native Arabic college students completed the designed task, while the activity in the parietal cortex was measured with FNIRS. The activity of the Intraparietal Sulcus detected during the performance of the designed task was medium; which could be related to limitations of the device, that increase the noise of the signal and decrease the statistical power of the data; or to some variables that were not properly controlled during the experimental procedure. Based on these conclusions, modifications were made to the task and to the research design that will use it as an instrument.

Keywords: numerical adaptation; fNIRS; bilateral IPS; Arabic Speakers; Chinese Speakers.

INTRODUCCIÓN

El paradigma de adaptación neural (*Adaptation Paradigm* en inglés (Grill-Spector y Malach, 2001); traducido según (Contreras, Banaji y Mitchell, 2019)) ha servido como un enfoque clave para estudiar el procesamiento numérico. Fue introducido por primera vez por Grill-Spector y Malach (2001) como una forma de lidiar con las limitaciones espaciales de la resonancia magnética funcional (IRMf) en el estudio de las propiedades invariantes de las neuronas corticales humanas. Dichos autores identificaron un grupo de neuronas sensibles a un objetivo específico y las expusieron al mismo repetidamente hasta que las neuronas se adaptaron a este estímulo, es decir, su activación en respuesta a este estímulo disminuyó.

Luego, variaron una propiedad específica del estímulo y midieron la recuperación de la actividad posterior a la adaptación. El grado de recuperación, o la falta de ella, es un indicador de la sensibilidad de las neuronas a la propiedad alterada (Grill-Spector y Malach, 2001).

Este paradigma se ha utilizado en varios campos de la investigación neurocientífica como la percepción visual (Brozzoli, Gentile, Petkova *et al.*, 2011; Yee, Drucker y Thompson-Schill, 2010), el procesamiento del lenguaje (Dufor y Rapp, 2013; Yu, Mo, Li *et al.*, 2015) y la cognición matemática (Goffin, Sokolowski, Slipenkyj *et al.*, 2019; Vogel, Goffin, Bohnenberger *et al.*, 2017). Se adaptó por primera vez al estudio de la cognición matemática a mediados de la década de los 2000s. Piazza, Izard, Pinel *et al.* (2004), trataron de demostrar paralelismos entre el procesamiento numérico humano y el de los monos. Le presentaron a 12 participantes un número fijo de puntos durante varios ensayos; y luego introdujeron una variación de la cantidad presentada para la recuperación de la actividad neuronal luego de la adaptación. Encontraron que existe una respuesta selectiva del Surco Intraparietal (SIP) a la visualización pasiva de conjuntos de elementos con un número variable; lo que sugiere que la codificación de números aproximados en los humanos se realiza como una escala interna comprimida. Con este experimento también establecieron el valor del paradigma de adaptación neural en el estudio del procesamiento numérico (Piazza, Izard, Pinel *et al.*, 2004).

Varias investigaciones han utilizado este paradigma en el estudio de la cognición numérica desde entonces, utilizando diferentes formatos de estímulo (Cohen Kadosh, Bahrami, Walsh *et al.*, 2011; Roggeman, Santens, Fias *et al.*, 2011), participantes con diversas características (Cantlon, Brannon, Carter *et al.*, 2006; Holloway, Battista, Vogel *et al.*, 2013; Kersey y Cantlon, 2017) y diferentes métodos de neuroimagen (Castaldi, Aagten-Murphy, Tosetti *et al.*, 2016; Hyde, Boas, Blair *et al.*, 2010; Hyde y Spelke, 2012). Holloway, Battista, Vogel *et al.* (2013) realizaron un estudio de Imágenes de Resonancia Magnética funcional (IRMf) en el que compararon las respuestas cerebrales a la adaptación a dígitos en formato simbólico (notación arábiga occidental: 1, 2, 3, etc.) frente a caracteres chinos (que representaban cantidades numéricas: 一, 二, 三, etc.) en un grupo de participantes bilingües hablantes de chino e inglés vs. un grupo de participantes de habla inglesa sin conocimiento previo de chino. Encontraron activación del SIP y del giro fusiforme izquierdo como resultado de la visualización de los números arábigos occidentales en ambos grupos. También encontraron activación en el SIP derecho en respuesta a los caracteres chinos, pero solo para los lectores chinos. Estos resultados sugieren, en primer lugar, que las diferencias lingüísticas y culturales no influyen en la representación numérica de los números arábigos occidentales. En segundo lugar, la activación del SIP derecho para los caracteres chinos en el grupo de participantes con conocimiento de chinos sugiere que, cuando se tiene en cuenta una representación

simbólica de números menos automatizada, los participantes necesitan un procesamiento de magnitud semántica del significado de este sistema (Holloway, Battista, Vogel et al., 2013).

Además, en un artículo publicado en 2015, Vogel, Goffin y Ansari reportaron el resultado de dos experimentos utilizando el paradigma de adaptación neural. En el primer experimento, evaluaron la respuesta del SIP en función de la proporción numérica en una muestra de participantes de habla inglesa. En el segundo experimento, analizaron las diferencias y semejanzas de la respuesta cerebral a los números presentados en una modalidad visual o auditiva en una muestra de participantes de habla alemana. Dos resultados importantes se reportan en este estudio: primero, no hubo diferencias significativas en la respuesta cerebral a la modalidad presentada visualmente en los experimentos 1 y 2. En ambos experimentos, encontraron una activación del SIP izquierdo como resultado de la adaptación a números presentados en formato simbólico (notación arábica occidental). Este resultado está en línea con los hallazgos previos de Holloway, Battista, Vogel *et al.* (2013) de que las diferencias culturales y lingüísticas no influyen en la representación de las magnitudes numéricas simbólicas presentadas en la notación arábica occidental. En segundo lugar, las modalidades visual y auditiva provocaron una activación del SIP izquierdo como resultado de la adaptación, sin diferencias significativas entre sí (Vogel, Goffin y Ansari, 2015). Distinto a los resultados reportados por Holloway, Battista, Vogel *et al.* (2013) con caracteres chinos, los resultados de Vogel, Goffin y Ansari (2015) no sugieren diferencias entre la respuesta neuronal a ambos sistemas simbólicos (notación arábica occidental vs. auditivo). Por lo tanto, de estos dos resultados diferentes surge la pregunta de cómo procesa el cerebro diferentes sistemas simbólicos y cómo se lateraliza esta respuesta.

Del mismo modo, aunque la investigación disponible no sugiere efectos culturales o lingüísticos en el procesamiento de magnitudes numéricas simbólicas representadas con la notación arábica occidental (Holloway, Battista, Vogel *et al.*, 2013; Vogel, Goffin y Ansari, 2015), no todos los países y culturas utilizan este sistema para la representación simbólica de cantidades.

Cuando hablamos de la representación simbólica de cantidades podemos referirnos a un sistema auditivo o a una cadena de sonidos que significan una cantidad específica (por ejemplo, cuando escuchamos la palabra “tres” en español y la asociamos con una cantidad específica) (que es el empleado en el experimento 2 de Vogel et al., 2015). También podemos referirnos al uso de palabras numéricas, o numerales, en cada idioma como un sistema numérico simbólico, que son las palabras que usamos para nombrar una cantidad específica (por ejemplo, “three” en inglés). También están los dígitos que forman parte del sistema numérico hindú-árabigo y que generalmente se usan para representar una cantidad específica (por ejemplo, el dígito “3” en la notación arábica occidental).

El sistema numérico hindú-árabigo es un sistema decimal posicional y también es uno de los sistemas más utilizados para representar números en todo el mundo. Consta de diez dígitos que van del cero al nueve. Tiene su origen en el trabajo de los matemáticos indios, que luego fue adoptada por los matemáticos árabes, desde donde se extendió a otras partes del mundo. Hay tres familias principales, o notaciones, en las que suele dividirse este sistema: los números arábigos occidentales (0,1,2,3...9), utilizados principalmente en los alfabetos latino, cirílico y griego; los números arábigos orientales (٠...٩), utilizados principalmente en el alfabeto árabe; y los numerales indios (०,१,२,३...९), utilizados principalmente en la familia brahmánica (Wikipedia, sistema de numeración hindú-árabe, n.d.). Es interesante, por ejemplo, que los hablantes de chino actualmente suelen utilizar una mezcla del sistema numérico hindú-árabigo en la notación arábica occidental con caracteres chinos (一, 二, 三, ..., 九, 十), que corresponden a los números en el idioma hablado (Wikipedia, 无日期) (ver Figura 1. para un resumen) (consultar Ganayim et al. 2020 para una descripción del sistema de notación arábica oriental).

Figura 1. Resumen de las diferentes notaciones simbólicas discutidas.

Símbolos	Notación	Alfabeto
0,1,2,3...9	Numerales Arábigos Occidentales	Alfabetos latino, cirílico y griego
٠,١,٢,٣...٩	Numerales Arábigos Orientales	Alfabeto árabe
०,१,२,३...९	Numerales Indios	Alfabetos bráhmicos
一,二,三...九,十	Caracteres Chinos	Idioma chino

Elaboración de la autora.

Fuente. Autoras

Hasta donde tenemos conocimiento no existe, hasta la fecha, estudios que hayan analizado las diferencias o puntos en común de la adaptación neural a los números representados en la notación arábica oriental y otras notaciones del sistema numérico hindú-árabigo.

En un meta-análisis con estudios que emplearon el paradigma de adaptación neural para el estudio de la cognición numérica (Escobar-Magariño, Turel y He, 2022), encontramos una activación bilateral lateralizada a la derecha del surco intraparietal (SIP) para los estudios que emplearon estímulos en formato no simbólico; y una activación bilateral del SIP lateralizada a la izquierda para estudios en formato simbólico. También se encontró actividad cerebral en la Corteza Frontal y la Corteza Visual.

Una vez más, surge la cuestión de cómo el SIP procesa estímulos en diferentes formatos simbólicos y cómo se lateraliza este proceso, junto con la pregunta sobre las diferencias en la respuesta del SIP al procesamiento de estímulos en formato simbólicos vs. no simbólicos.

Hasta ahora, los estudios publicados que utilizan el paradigma de adaptación en el procesamiento numérico han utilizado principalmente IRMf para la adquisición de datos (Cantlon, Brannon, Carter *et al.*, 2006; Castaldi, Aagten-Murphy, Tosetti *et al.*, 2016; R. Cohen Kadosh, K. Cohen Kadosh, Kaas *et al.*, 2007; Cohen Kadosh, Bahrami, Walsh *et al.*, 2011; Goffin, Sokolowski, Slipenkyj *et al.*, 2019; Holloway, Battista, Vogel *et al.*, 2013; Jacob y Nieder, 2009; Kersey y Cantlon, 2017; Notebaert, Nelis y Reynvoet, 2011; Piazza, Izard, Pinel *et al.*, 2004; Piazza, Pinel, Le Bihan, *et al.*, 2007; Roggeman, Santens, Fias *et al.*, 2011; Vogel, Goffin y Ansari, 2015, Vogel, Goffin, Bohnenberger *et al.*, 2017). También se han publicado 4 estudios que utilizan electroencefalograma/potenciales relacionados a eventos (EEG/PRE) (Hsu y Szucs, 2012; Hyde y Spelke, 2011, 2012; Soltézs, D. Szűcs y L. Szűcs, 2010) y 2 estudios utilizando Espectroscopía Infrarroja Cercana (funcional) (fNIRS por sus siglas en inglés) (Edwards, Wagner, Simon *et al.*, 2016; Hyde, Boas, Blair *et al.*, 2010).

fNIRS es una técnica de neuroimagen óptica que utiliza luz infrarroja para monitorear los cambios hemodinámicos en la corteza cerebral. Se basa en la absorción óptica intrínseca de sangre y puede registrar simultáneamente la varianza de la desoxihemoglobina, la hemoglobina oxigenada y la concentración total de hemoglobina. En esta técnica, la luz se envía continuamente a través de emisores de luz atravesando el tejido cerebral, y luego se recoge mediante detectores de luz. fNIRS es un método económico y portátil que puede tolerar cierto grado de movimiento. Tiene mejor resolución espacial que el EEG y mejor resolución temporal que la IRMf (Karmiloff-Smith, 2010).

El estudio de Hyde, Boas, Blair *et al.* (2010) utilizó FNIRS en una muestra de infantes y los adaptó a conjuntos de puntos con numerosidad variable. Este estudio es, hasta donde sabemos, la primera experiencia que empleó el paradigma de adaptación neural para estudiar el procesamiento numérico con esta técnica. En un estudio de seguimiento, Edwards, Wagner, Simon *et al.* (2016) también investigaron la adaptación numérica con FNIRS en 13 bebés (edad media = 6,64 meses). Siguieron una estructura de tareas similar a la de Hyde, Boas, Blair *et al.* (2010) pero emplearon una máquina de FNIRS con más canales. Ambos estudios arrojaron resultados similares: se encontró una activación del SIP lateralizada a la derecha como resultado de la adaptación numérica no simbólica en bebés preverbales (Edwards, Wagner, Simon *et al.*, 2016; Hyde, Boas, Blair *et al.*, 2010).

Hasta la fecha no se han reportado estudios en muestras de participantes adultos que combinen el

paradigma de adaptación neural y FNIRS en el estudio del procesamiento numérico.

Teniendo en cuenta la información antes mencionada, decidimos investigar las características de la respuesta del SIP cuando se adapta a cantidades numéricas presentadas en diferentes formatos en una muestra bicultural. Para ello, nos propusimos adaptar y validarla versión del paradigma de adaptación neural para estudiar el procesamiento numérico que emplearon Holloway, Battista, Vogel *et al.* (2013) de modo que se adecuara a nuestros intereses investigativos. Así, adaptaremos dicho paradigma para incluir una tarea no simbólica y cuatro tareas simbólicas con 4 sistemas de representación diferentes: números arábigos occidentales, números arábigos orientales, numerales en chino (caracteres chinos) y numerales en árabe. En la presente investigación evaluaremos la validez de esta adaptación del paradigma empleado por Holloway, Battista, Vogel *et al.* (2013) para generar activación en el SIP bilateral que sea medible a través de FNIRS en una muestra de nativos chinos y nativos árabes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Participantes

Formaron parte del proceso de validación un total de 8 participantes. Estos fueron distribuidos en dos grupos a partir de su lenguaje nativo. Se diseñó una pequeña encuesta para recopilar datos sociodemográficos y datos de habilidades lingüísticas. Esta encuesta se completó en línea antes de la sesión experimental. Para ambos grupos, la encuesta recopiló información sobre nombre, edad, sexo, nacionalidad y número de teléfono. Para el grupo chino, se evaluó la información relacionada con el conocimiento del idioma árabe (nivel de idioma árabe, años de aprendizaje del idioma, prueba de idioma). Para el grupo árabe se evaluó la misma información, pero para el idioma chino. Además, también se preguntó cuánto tiempo habían estado viviendo los participantes en China.

Así, un total de 4 (1 F) participantes conformaron el grupo de nativos chinos (Media de edad $X=19.500$; $DE=1.291$). Todos los participantes del grupo de chinos eran estudiantes de pregrado de la Universidad del Suroeste, de Chongqing, China, en el momento de la aplicación. Asimismo, no tenían conocimiento previo de árabe.

Un total de 4 (3 F) participantes conformaron el grupo de nativos árabes (Media de edad $X=25.000$; $DE=3.367$). Uno de los participantes era estudiante de pregrado de la Universidad del Suroeste, de Chongqing, China, las otras tres eran estudiantes de maestría de la misma universidad. Igualmente, todos tenían un nivel alto de dominio del idioma chino, y llevaban entre 1 y 5 años residiendo en China en el

momento de la aplicación.

Todos los participantes recibieron una remuneración de 70 RMB por su participación.

Tarea

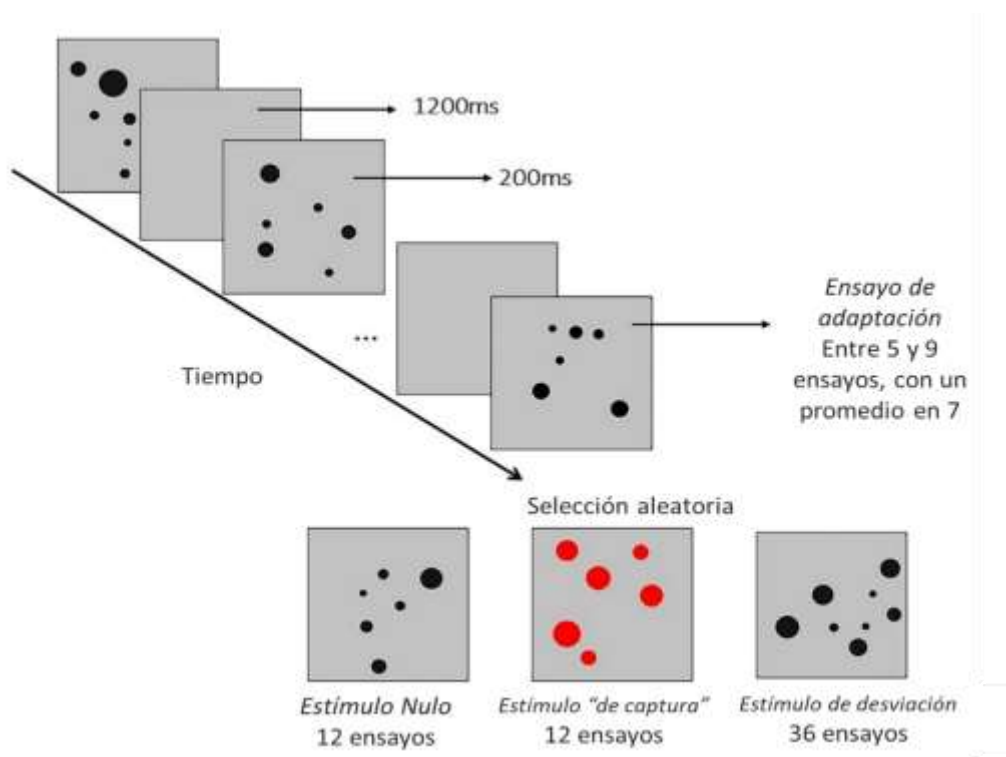
El experimento se adaptó a partir del procedimiento descrito por Holloway, Battista, Vogel *et al.* (2013). Un formato de presentación similar se empleó en el diseño de la condición no simbólica y las cuatro condiciones simbólicas (numerales arábigos occidentales, numerales arábigos orientales, caracteres chinos y numerales en árabe). Se instruyó a los participantes para que presionaran un botón cada vez que se presentara un estímulo en un color diferente. Luego, los estímulos se presentaron en secuencias separadas, las cuales consistía en un conjunto de estímulos. El conjunto de estímulos consistió en un grupo de estímulos de adaptación, seguidos por un estímulo de desviación, un estímulo nulo o un estímulo “de captura”, los cuales fueron presentados durante un total de 200 ms:

- Estímulos de adaptación: se definió la cantidad numérica de adaptación y luego se presentó consecutivamente entre 5 y 9 veces, con un promedio de 7 veces.
- Estímulo de desviación: se definió un conjunto de cantidades numéricas como cantidades de desviación de la adaptación en proporciones de 1,25; 1,5 y 2,0 de la cantidad de adaptación (en concordancia con las proporciones propuestas por Holloway, Battista, Vogel *et al.* (2013)).
- Estímulo nulo: la cantidad numérica presentada fue la misma, y con las mismas características visuales, que el estímulo de adaptación.
- Estímulo “de captura”: la cantidad numérica presentada fue la misma a la presentada como estímulo de adaptación, pero esta se mostró en un color diferente (rojo) y se esperaba que el participante presionara un botón al ver este estímulo.

La aparición de estímulos de desviación, nulos o “de captura” se aleatorizó entre las secuencias. En cada secuencia, después de presentar un estímulo, aparecería una pantalla en blanco durante 1200 ms (ver la Figura 2). Las tareas se programaron mediante el software E-prime 2.0. Cada participante debió completar un total de 5 bloques, correspondientes a las cinco condiciones experimentales (1 en formato no simbólico y 4 en formato simbólico). Cada bloque se programó como una aplicación independiente de E-prime, con una duración promedio de 10 minutos. Los participantes pudieron descansar entre el

inicio de un bloque y el siguiente, mientras se preparaba el inicio del próximo bloque. El orden en el que cada participante completó cada bloque se decidió aleatoriamente por los experimentadores.

Figura 2. Representación de la tarea de adaptación neural que completaron los participantes. Los estímulos presentados corresponden a la condición no simbólica utilizada en el experimento.



Se diseñaron dos versiones del experimento. Uno tenía las instrucciones escritas en chino y se presentó al grupo de chinos; el otro tenía las instrucciones escritas en árabe y fue presentado al grupo de árabes. Ambas versiones eran idénticas en diseño e información presentada, solo diferían en el idioma.

Se instruyó a los participantes para que prestaran atención a la pantalla y presionaran la barra espaciadora si los estímulos percibidos se volvían rojos (estímulo "de captura"). E-prime registró el tiempo de reacción para cada estímulo "de captura" en los 5 bloques. El único propósito de esta instrucción era mantener la atención de los participantes en la pantalla.

Las instrucciones antes de cada bloque diferían ligeramente: para la condición no simbólica, la instrucción decía "Verás un grupo de puntos", y continuaba diciendo que presionaran la barra espaciadora si los estímulos percibidos se volvían rojos. Para los números arábigos occidentales y arábigos orientales, la instrucción decía "Verá un grupo de números", y continuaba de la misma manera que la condición no

simbólica. Para los caracteres chinos y numerales en árabe, la instrucción decía "Verá algunas palabras", y continuaba de la misma manera que las otras condiciones.

La cantidad de adaptación para los estímulos de adaptación, nulo y "de captura" se estableció en 6, como lo han hecho estudios anteriores (Cantlon, Brannon, Carter *et al.*, 2006; Holloway, Battista, Vogel *et al.*, 2013; Notebaert, Nelis y Reynvoet, 2011). Las cantidades de desviación se fijaron en 3, 4, 5, 8, 9 y 12, según las proporciones de 1,25; 1,5 y 2,0 de la cantidad de adaptación.

Se incluyeron cinco tareas diferentes: condición no simbólica, condición de números arábigos occidentales, condición de números arábigos orientales, condición de caracteres chinos, condición de numerales en árabe.

Los estímulos se presentaron sobre un fondo gris con un color negro/rojo. Para evitar la adaptación a la forma o posición, se utilizaron dos fuentes (Arial y Times New Roman) y los estímulos aparecían en una posición aleatoria en la pantalla. Los estímulos para las condiciones de números arábigos occidentales, números arábigos orientales, caracteres chinos y numerales en árabe se crearon utilizando E-prime. Los estímulos de la condición no simbólica se construyeron controlando parámetros intensivos (área total de los elementos) y extensivos (bordes) (Dehaene, Izard, and Piazza 2005; Gebuis and Reynvoet 2012).

Procedimiento para la recogida y análisis de datos

Se utilizó una máquina FOIRE-3000 FNIRS (FOIRE-3000/16, Shimadzu Corporation, Japón) para medir los cambios en la concentración de oxihemoglobina (HbO), desoxihemoglobina (HbR) y hemoglobina total (tHb) en cada canal según en la ley de Beer-Lambert modificada. La máquina tiene 12 pares de optodos (6 transmisores y 6 receptores) y usamos 28 canales. Se colocaron seis pares (y 14 canales) de optodos en el área frontal, tres pares (y 7 canales) en el hemisferio izquierdo y tres pares (y siete canales) en el derecho. Los otros seis pares (y 14 canales) se colocaron en las áreas parietales, con la misma distribución hemisférica. Se diseñó un gorro para este propósito. Antes del comienzo de la tarea, se comprobaron todos los optodos y canales para detectar satisfactoriamente la señal y el contacto con el cuero cabelludo. La tarea completa duró aproximadamente 1 hora. Los participantes se sentaron en una silla cómoda frente a una computadora de escritorio en una habitación aislada y tranquila. El tiempo de respuesta se recogió mediante E-prime. Se incluyó una línea de código en la tarea E-prime para asegurar la sincronización entre dicho programa y la máquina FNIRS.

Se utilizó un puntero de digitalización en 3D para corregir las ubicaciones de los canales y optodos

neuroanatómicos en el gorro que se construyó. En primer lugar, se marcaron en el gorro los cinco puntos de referencia, Nz (nasion), Iz (inion), AL (punto preauricular izquierdo), AR (punto preauricular derecho) y Cz (cero central). Luego, se registraron las coordenadas de los optodos y canales. NIRS_SPM, un paquete de software basado en MATLAB (http://www.nitrc.org/projects/nirs_spm/), se usó más tarde para obtener la representación de la ubicación espacial de los optodos y canales en una plantilla de cerebro humano. Con el mismo software, pudimos recuperar los datos de ubicación individual por canal en el espacio (MNI) (ver la Tabla 1).

Tabla 1. Coordenadas MNI y etiquetas anatómicas de las áreas principales de cada canal determinado usando el puntero de digitalización en 3D y procesado usando NIRS-SPM.

Canales	Coordenadas MNI			Etiquetas Anatómicas	% de superposición
	x	y	z		
Corteza parietal derecha					
CH1	52	-58	55	R Parietal Inferior	0.683
CH2	41	-63	60	R Parietal Superior	0.458
CH3	59	-51	50	R Parietal Inferior	0.890
CH4	40	-59	63	R Parietal Superior	0.675
CH5	20	-56	74	R Parietal Superior	0.942
CH6	53	-49	57	R Parietal Inferior	0.786
CH7	31	-50	73	R Parietal Superior	0.658
Corteza frontal derecha					
CH8	41	24	55	R Frontal Medial	0.992
CH9	14	35	60	R Frontal Superior Medial	0.531
CH10	47	31	42	R Frontal Medial	1.000
CH11	23	40	54	R Frontal Superior	0.884
CH12	4	39	56	R Frontal Superior Medial	0.578
CH13	42	44	34	R Frontal Medial	1.000
CH14	16	52	46	R Frontal Superior	0.667
Corteza parietal izquierda					
CH15	-38	-67	57	L Parietal Superior	0.498
CH16	-57	-66	37	L Angular	0.985
CH17	-12	-56	74	L Precuneus	0.625
CH18	-42	-53	64	L Parietal Inferior	0.522
CH19	-65	-49	33	L SupraMarginal	0.825
CH20	-38	-41	70	L Postcentral	0.624
CH21	-61	-46	48	L Parietal Inferior	0.867

Corteza frontal izquierda						
CH22	-20	37	56	L	Frontal Superior	0.751
CH23	-43	29	46	L	Frontal Medial	1.000
CH24	-11	46	52	L	Frontal Superior Medial	0.510
CH25	-24	48	44	L	Frontal Superior	0.855
CH26	-47	37	33	L	Frontal Medial	0.752
CH27	-12	58	40	L	Frontal Superior	0.663
CH28	-35	53	29	L	Frontal Medial	0.930

NIRS-SPM (Versión 4), un software basado en MATLAB, se implementó para analizar los datos de FNIRS y extraer los valores beta (Tak y Ye, 2011). En primer lugar, se utilizó la ley de Beer-Lambert modificada (Cope y Depty, 1988) para calcular los cambios de hemoglobina a partir de los datos de densidad óptica. En segundo lugar, se generó un Modelo Lineal General (GLM por sus siglas en inglés) para los cambios de concentración en la oxihemoglobina (HbO). Los cambios de alto contraste de la HbO en los estudios de FNIRS hacen que esta medida sea el marcador más utilizado para medir la actividad funcional en este tipo de estudio (Li, Chen, Turel *et al.*, 2021). Para generar un GLM, se hizo un vector de inicios para cada ensayo de cada tipo de estímulo (de desviación, “de captura” o nulos) (el vector nulo incluía los estímulos nulos y de adaptación) en cada condición (condición no simbólica, números arábigos occidentales, números arábigos orientales, caracteres chinos y numerales en árabe) usando el tiempo de inicio de cada estímulo registrado por E-prime. Se implementó un algoritmo de eliminación de tendencia Wavelet-MDL y el número de ensayos se fijó en 3 ensayos en cada condición. Para corregir la autocorrelación temporal en los datos NIRS, NIRS-SPM implementa un filtro de paso bajo. Se aplicó el método de precoloración hrf (función de respuesta hemodinámica), como lo sugieren los creadores del programa. Por último, los parámetros GLM y las correlaciones temporales se estimaron en un análisis individual (ver Tak y Ye, 2011, pág. 27-30 para una descripción detallada de todo el proceso).

Los datos resultantes, los valores beta de los canales FNIRS para cada tipo de prueba en cada condición, se generaron en un archivo MATLAB. Los valores beta para cada participante se recolectaron en una base de datos SPSS donde se realizaron las pruebas estadísticas. Para establecer la validez de la tarea diseñada para generar activación en el SIP bilateral que sea medible a través de FNIRS en la muestra seleccionada, realizamos pruebas t para una muestra. Dado que lo principal en esta investigación es medir la presencia de activación como resultado de la tarea en el área de interés, solo se evaluaron los canales de las áreas parietales derecha (CH 1-7) e izquierda (CH 15-21).

RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de la prueba t para una muestra para el grupo de chinos y para el grupo de árabes, en cada una de las condiciones. Se mostrarán los resultados de los canales que cubren la corteza parietal derecha (CH 1-7) e izquierda (CH 15-21). Se analizaron los valores beta para los ensayos de los estímulos de desviación (Desv), y los valores beta resultantes de promediar todos los ensayos de todos los estímulos (de adaptación, de desviación, nulo y “de captura”) (Todos).

Grupo de chinos

Tabla 2. Muestra los resultados estadísticamente significativos, o con tendencia a la significación estadística, de la prueba t de una muestra para los canales que cubren la corteza parietal derecha e izquierda.

Canales		No simbólica			Caracteres chinos			Numerales en árabe		
		X	t(3)	p	X	t(3)	p	X	t(3)	p
Corteza parietal derecha										
CH7	Desv	0.034	4.688	0.018				0.094	3.470	0.040
	Todos							0.071	5.766	0.010
Corteza parietal izquierda										
CH20	Desv									
	Todos							0.044	3.411	0.042
CH21	Desv				-0.114	-2.671	0.076			
	Todos				-0.094	-2.807	0.067			

Tal y como se evidencia en la Tabla 3 de las condiciones (condición no simbólica, condición de caracteres chinos, y condición de numerales árabes) muestran activación estadísticamente significativa al menos en uno de los hemisferios.

Grupo de árabes

Tabla 3. Muestra los resultados estadísticamente significativos, o con tendencia a la significación estadística, de la prueba t de una muestra para los canales que cubren la corteza parietal derecha e izquierda.

Canales		Numerales en árabe		
		X	t(3)	p
Corteza parietal derecha				
CH6	Desv			
	Todos	0.078	3.057	0.055
CH7	Desv	0.109	2.541	0.085
	Todos			

Tal y como se evidencia en la Tabla 3, para el grupo de árabes se encontró una tendencia a la significación estadística, lo que sugiere la posible presencia de actividad en la corteza parietal derecha, en la condición de numerales en árabe.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente estudio se realizó con el objetivo de medir la presencia de activación en el SIP bilateral como resultado de la tarea diseñada, que constituye una modificación del paradigma de adaptación neural para el estudio del procesamiento numérico presentado por Holloway, Battista, Vogel *et al.* (2013). La modificación propuesta consistió en incluir en el mismo experimento 5 formatos de representación numérica: 1 no simbólico, y 4 simbólicos (números arábigos occidentales, números arábigos orientales, caracteres chinos y numerales en árabe). Esta modificación se propuso con el objetivo de comparar la respuesta cerebral a la adaptación numérica en diferentes formatos de representación de un grupo de nativos del chino vs. un grupo de nativos del árabe.

En consecuencia con los resultados de investigaciones previas, (Holloway y Ansari, 2010; Vogel, Goffin y Ansari, 2015) nos concentramos en medir la actividad en la región del SIP. La evidencia existente sugiere que esta área es un sitio importante de activación en muchos estudios de neuroimagen relacionados con el procesamiento numérico (Dehaene y Cohen, 1995; Holloway y Ansari, 2010; Reigosa-Crespo, Valdés-Sosa, Butterworth *et al.*, 2012). La activación de SIP se ha encontrado en diferentes tipos de tareas, como la comparación de números (Cappelletti, Lee, Freeman *et al.*, 2009; Holloway y Ansari, 2010; Pinel, Dehaene, Rivière *et al.*, 2001), la visualización pasiva de cantidades (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Kaas *et al.*, 2007; Piazza, Izard, Pinel *et al.*, 2004; Piazza, Pinel, Le Bihan *et al.*, 2007; Vogel, Goffin, Bohnenberger *et al.*, 2017), y el procesamiento aritmético (Bugden, Price, McLean *et al.*, 2012; Eger, Sterzer, Russ *et al.*, 2003; Venkatraman, Ansari y Chee, 2005). También se ha encontrado actividad del SIP en estudios del desarrollo (Cantlon, Brannon, Carter *et al.*,

2006; Holloway y Ansari, 2010; Vogel, Goffin y Ansari, 2015), lo que demuestra que es un área central de activación para el procesamiento de números tanto para niños como para adultos. En conjunto, esta evidencia sugiere que el SIP bilateral se activa cada vez que se recluta el código de cantidad durante el procesamiento numérico (Dehaene, Piazza, Pinel *et al.*, 2003).

Es por eso que el presente estudio se centró en medir a través del FNIRS la actividad del SIP durante la realización de la tarea de adaptación numérica propuesta. Nuestros resultados muestran que la posibilidad de detectar actividad en el SIP a través del FNIRS con la tarea diseñada es media.

En primer lugar, es evidente que en el grupo de chinos fue mucho más fácil detectar actividad en el SIP bilateral durante la realización de la tarea. Para este grupo, encontramos actividad en canales que cubrían la corteza parietal tanto derecha como izquierda en tres de las cinco condiciones experimentales: condición no simbólica, condición de caracteres chinos y condición de numerales arábigos. Es esperado para este grupo la presencia de actividad en el SIP como resultado del procesamiento de los estímulos en la condición no simbólica y en la condición de caracteres chinos, pues son dos de las condiciones de mayor familiaridad para los participantes. De igual modo, era esperada la ausencia de actividad durante el procesamiento de los estímulos en la condición de numerales arábigos orientales, ya que resulta un estímulo completamente desconocido para los participantes. Sin embargo, dos resultados sí resultan inesperados: el primero es la presencia de actividad en el SIP durante el procesamiento de los numerales en árabe, ya que este estímulo era totalmente desconocido para los participantes. De igual modo, era esperado la presencia de actividad en el SIP durante el procesamiento de los estímulos en la condición de números arábigos occidentales, la cual no fue detectada en esta muestra de 4 participantes. Estos dos últimos resultados pueden ser consecuencia del tamaño reducido de la muestra.

En el caso del grupo de árabes, sólo se encontró actividad en el SIP derecho durante la adaptación a los estímulos de la condición de numerales en árabe. Esta actividad era esperada, ya que estos estímulos constituyen palabras en el idioma natal de los participantes, con lo cual debían generar actividad significativa en el área durante el procesamiento. Igualmente, no sorprende la ausencia de actividad durante el procesamiento de los números arábigos occidentales, ya que esta no es la notación preferida para la presentación de dígitos en los países árabes. Sí esperábamos presencia de actividad en el SIP durante el procesamiento de cantidades en formato no simbólico, de números arábigos orientales y de caracteres chinos. En el caso de los dos últimos, son estímulos conocidos para los participantes, que son de origen árabe y que, además, tienen un conocimiento elevado del idioma chino.

El procesamiento de cantidades en formato no simbólico se considera una habilidad innata en seres

humanos, sobre la cual se desarrolla todo el conocimiento matemático posterior. Esta idea se basa, principalmente en dos grupos de evidencias. En primer lugar, estudios filogenéticos han demostrado que algunas especies animales son capaces de detectar y manipular determinadas cantidades sin previo entrenamiento (Ansari, 2010; Cantlon, Platt, y Brannon, 2009; Nieder, 2005). Igualmente, estudios realizados con bebés y niños que aún no han desarrollado el lenguaje evidencian las capacidades de estos para realizar operaciones de comparación y adición y sustracción de conjuntos sencillos (Feigenson, Dehaene y Spelke, 2004; Xu y Spelke, 2000). Es por esta razón que esperábamos actividad en el SIP durante el procesamiento de los estímulos en la condición no simbólica.

Dado que cierta actividad fue detectada para el grupo de chinos en algunas de las condiciones, pero no para el grupo de árabes; es posible pensar en una baja sensibilidad del FNIRS para detectar la actividad del SIP en el grupo de árabes. Efectivamente, al ser el FNIRS un método que se basa en la emisión y absorción de luz infrarroja que pasa a través del cráneo y rebota hacia los detectores de luz en función de los niveles de sangre oxigenada, es muy fácil que existan elementos que comprometan la calidad de la señal. En particular, el color, cantidad y textura del cabello de los participantes es un elemento que puede contaminar la señal de luz emitida, y disminuir la sensibilidad de los receptores de luz. Incluso cuando en el momento de la aplicación se intencione el contacto entre los optodos y el cráneo del participante, el tipo de cabello de este interfiere durante el proceso de recogida de datos. La interferencia durante la recogida de la señal disminuye su intensidad, lo cual consecuentemente disminuye el poder estadístico de los datos, sobre todo en una muestra tan pequeña, ya que el ruido de la señal es muy alto. Una manera de remediar este problema es aumentar el tamaño de la muestra, de modo tal que aumente el poder estadístico de los datos.

Asimismo, durante la aplicación de la tarea no existió un tiempo de descanso uniforme entre un bloque y el siguiente. Este tiempo estuvo sujeto a elementos como el tiempo en el que el examinador se demoró en empezar el siguiente bloque, o la disposición del propio participante de continuar la tarea. Si bien no es posible, dados los datos que tenemos, medir si esta variable tuvo un efecto directo sobre los resultados; sí consideramos que la misma puede ser controlada al incluir todos los bloques como parte de la misma aplicación, y agregar una pantalla en blanco entre el fin de un bloque y el comienzo del siguiente que aparezca siempre durante la misma cantidad de tiempo. De esta manera, siempre existirá el mismo tiempo de descanso entre una condición y la siguiente.

Igualmente, si bien la proporción de aciertos de los participantes durante la ejecución de la tarea no era de interés para los resultados, sí consideramos que es importante que los participantes comprendieran la orden que se les daba, pues esto asegura que estén todo el tiempo mirando a la pantalla, con lo cual se

asegura que ocurra la adaptación neural. Por tanto, se decidió incluir un pequeño ensayo antes del inicio de cada bloque, para que el participante pueda practicar la tarea con cantidades de adaptación y de desviación diferentes a las definidas en la tarea.

De modo general, la actividad del SIP detectada durante la realización de la tarea fue media. Esto podría deberse a limitaciones del aparato, que aumentan el ruido de la señal y disminuyen el poder estadístico de los datos; o a algunas variables que no fueron debidamente controladas durante la aplicación de la tarea. Es por eso que decidimos realizar las siguientes modificaciones a la tarea, y al diseño de la investigación que la empleará como instrumento:

1. Aumentar el tamaño de la muestra de los participantes, tanto de los nativos chinos como de los nativos árabes, a un mínimo de 20 participantes, con el objetivo de aumentar el poder estadístico de los datos recolectados.
2. Incluir los 5 bloques experimentales en una sola aplicación de E-prime, con un tiempo de descanso de 6000 ms después de cada bloque. La aplicación decide aleatoriamente el orden en que se completará cada bloque. El tiempo total necesario para completar el experimento no varió y se mantuvo en 1h aproximadamente.
3. Incluir una breve secuencia de práctica antes de cada bloque para garantizar que los participantes entiendan completamente la instrucción. Los participantes deben obtener al menos un 60 % (2 de 3) de respuestas correctas (pulsar la barra espaciadora cada vez que se presentaba un estímulo rojo) antes de pasar a la secuencia experimental. Las cantidades de adaptación y desviación incluidas en la secuencia de práctica fueron diferentes de las de la secuencia experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSARI, D. (2010). Neurocognitive approaches to developmental disorders of numerical and mathematical cognition: The perils of neglecting the role of development. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.06.001>
- BROZZOLI, C., GENTILE, G., PETKOVA, V. I., & EHRSSON, H. H. (2011). fMRI adaptation reveals a cortical mechanism for the coding of space near the hand. *Journal of Neuroscience*, 31(24), 9023–9031. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1172-11.2011>
- BUGDEN, S., PRICE, G. R., MCLEAN, D. A., & ANSARI, D. (2012). The role of the left intraparietal sulcus in the relationship between symbolic number processing and children's arithmetic competence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(4), 448–457.

<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.04.001>

CANTLON, J. F., BRANNON, E. M., CARTER, E. J., & PELPHREY, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biology*, 4(5), 844–854. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040125>

CANTLON, J. F., PLATT, M. L., & BRANNON, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(2), 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.007>

CAPPELLETTI, M., LEE, H. L., FREEMAN, E. D., & PRICE, C. J. (2009). The Role of Right and Left Parietal Lobes in the Conceptual Processing of Numbers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(2), 331–346.

CASTALDI, E., AAGTEN-MURPHY, D., TOSETTI, M., BURR, D., & MORRONE, M. C. (2016). Effects of adaptation on numerosity decoding in the human brain. *NeuroImage*, 143, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.09.020>

COHEN KADOSH, R., BAHRAMI, B., WALSH, V., BUTTERWORTH, B., POPESCU, T., & PRICE, C. J. (2011). Specialization in the human brain: The case of numbers. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5(JULY), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00062>

COHEN KADOSH, R., COHEN KADOSH, K., KAAS, A., HENIK, A., & GOEBEL, R. (2007). Notation-Dependent and -Independent Representations of Numbers in the Parietal Lobes. *Neuron*, 53(2), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.12.025>

CONTRERAS, J. M., BANAJI, M. R., & MITCHELL, J. P. (2019). *Los patrones multivóxeles en el área fusiforme de la cara distinguen los rostros por sexo y por raza.*

COPE, M., & DEPLY, D. T. (1988). System for long-term measurement of cerebral blood and tissue oxygenation on newborn infants by near infra-red transillumination. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 26, 289–294.

DEHAENE, S., IZARD, V., & PIAZZA, M. (2005). Control over non-numerical parameters in numerosity experiments.

DEHAENE, S., PIAZZA, M., PINEL, P., & COHEN, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3–6), 487–506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>

DEHAENE, STANISLAS, & COHEN, L. (1995). Towards an Anatomical and Functional Model of Number. *Mathematical Cognition*, 1, 83–120.

DUFOR, O., & RAPP, B. (2013). Letter representations in writing: an fMRI adaptation approach. *Frontiers in Psychology*, 4(October), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00781>

- EDWARDS, L. A., WAGNER, J. B., SIMON, C. E., & HYDE, D. C. (2016). Functional brain organization for number processing in pre-verbal infants. *Developmental Science, 19*(5), 757–769. <https://doi.org/10.1111/desc.12333>
- EGER, E., STERZER, P., RUSS, M. O., GIRAUD, A. L., & KLEINSCHMIDT, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron, 37*(4), 719–726. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00036-9)
- ESCOBAR-MAGARIÑO, D., TUREL, O., & He, Q. (2022). Bilateral Intraparietal Activation for Number Tasks in Studies Using Adaptation Paradigm: A Meta-analysis. *Neuroscience, 490*, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2022.02.024>
- FEIGENSON, L., DEHAENE, S., & SPELKE, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences, 8*(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- GANAYIM, D., GANAYIM, S., DOWKER, A., & OLKUN, S. (2020). *Linguistic Effects on the Processing of Two-Digit Numbers*. 49–69. <https://doi.org/10.4236/ojml.2020.101004>
- GEBUIS, T., & REYNVOET, B. (2012). The interplay between nonsymbolic number and its continuous visual properties. *Journal of Experimental Psychology: General, 141*(4), 642–648. <https://doi.org/10.1037/a0026218>
- GOFFIN, C., SOKOLOWSKI, H. M., SLIPENKYJ, M., & ANSARI, D. (2019). Does writing handedness affect neural representation of symbolic number? An fMRI adaptation study. *Cortex, 121*, 27–43. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.07.017>
- GRILL-SPECTOR, K., & MALACH, R. (2001). fMR-adaptation: A tool for studying the functional properties of human cortical neurons. *Acta Psychologica, 107*(1–3), 293–321. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(01)00019-1)
- HOLLOWAY, I. D., & ANSARI, D. (2010). Developmental specialization in the right intraparietal sulcus for the abstract representation of numerical magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience, 22*(11), 2627–2637. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21399>
- HOLLOWAY, I. D., BATTISTA, C., VOGEL, S. E., & ANSARI, D. (2013). Semantic and perceptual processing of number symbols: Evidence from a cross-linguistic fMRI adaptation study. *Journal of Cognitive Neuroscience, 25*(3), 388–400. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00323
- HSU, Y. F., & SZUCS, D. (2012). The time course of symbolic number adaptation: Oscillatory EEG activity and event-related potential analysis. *NeuroImage, 59*(4), 3103–3109. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.017>
- HYDE, D. C., BOAS, D. A., BLAIR, C., & CAREY, S. (2010). Near-infrared spectroscopy shows right

- parietal specialization for number in pre-verbal infants. *NeuroImage*, 53(2), 647–652. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.06.030>
- Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2011). Neural signatures of number processing in human infants: Evidence for two core systems underlying numerical cognition. *Developmental Science*, 14(2), 360–371. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00987.x>
- Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2012). Spatiotemporal dynamics of processing nonsymbolic number: An event-related potential source localization study. *Human Brain Mapping*, 33(9), 2189–2203. <https://doi.org/10.1002/hbm.21352>
- JACOB, S. N., & NIEDER, A. (2009). Tuning to non-symbolic proportions in the human frontoparietal cortex. *European Journal of Neuroscience*, 30(7), 1432–1442. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06932.x>
- KARMILOFF-SMITH, A. (2010). Neuroimaging of the developing brain: Taking “developing” seriously. *Human Brain Mapping*, 31(6), 934–941. <https://doi.org/10.1002/hbm.21074>
- KERSEY, A. J., & CANTLON, J. F. (2017). Neural tuning to numerosity relates to perceptual tuning in 3–6-year-old children. *Journal of Neuroscience*, 37(3), 512–522. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0065-16.2016>
- LI, Y., CHEN, R., TUREL, O., FENG, T., ZHU, C. Z., & HE, Q. (2021). Dyad sex composition effect on inter-brain synchronization in face-to-face cooperation. *Brain Imaging and Behavior*, 15(3), 1667–1675. <https://doi.org/10.1007/s11682-020-00361-z>
- NIEDER, A. (2005). Counting on neurons: The neurobiology of numerical competence. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(3), 177–190. <https://doi.org/10.1038/nrn1626>
- NOTEBAERT, K., NELIS, S., & REYNVOET, B. (2011). The magnitude representation of small and large symbolic numbers in the left and right hemisphere: An event-related fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(3), 622–630. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21445>
- PIAZZA, M., IZARD, V., PINEL, P., LE BIHAN, D., & DEHAENE, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, 44(3), 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014>
- PIAZZA, M., PINEL, P., LE BIHAN, D., & DEHAENE, S. (2007). A Magnitude Code Common to Numerosities and Number Symbols in Human Intraparietal Cortex. *Neuron*, 53(2), 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.11.022>
- PINEL, P., DEHAENE, S., RIVIÈRE, D., & LEBIHAN, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage*, 14(5), 1013–1026.

<https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0913>

- REIGOSA-CRESPO, V., VALDÉS-SOSA, M., BUTTERWORTH, B., ESTÉVEZ, N., RODRÍGUEZ, M., SANTOS, E., TORRES, P., SUÁREZ, R., & LAGe, A. (2012). Basic numerical capacities and prevalence of developmental dyscalculia: The Havana survey. *Developmental Psychology*, *48*(1), 123–135. <https://doi.org/10.1037/a0025356>
- ROGGEMAN, C., SANTENS, S., FIAS, W., & VERGUTS, T. (2011). Stages of nonsymbolic number processing in occipitoparietal cortex disentangled by fMRI adaptation. *Journal of Neuroscience*, *31*(19), 7168–7173. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4503-10.2011>
- SOLTÉZS, F., SZÜCS, D., & SZÜCS, L. (2010). Relationships between magnitude representation, counting and memory in 4- to 7-year-old children: A developmental study. *Behavioral and Brain Functions*, *6*(13), 1–14.
- TAK, S., & YE, J. C. (2011). *NIRS-SPM: Statistical Parametric Mapping for Near-infrared Spectroscopy* (pp. 1–54). Bio Imaging Signal Processing (BISP) Lab. Dept. of Bio and Brain Engineering, KAIST.
- VENKATRAMAN, V., ANSARI, D., & CHEE, M. W. L. (2005). Neural correlates of symbolic and non-symbolic arithmetic. *Neuropsychologia*, *43*(5), 744–753. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.08.005>
- VOGEL, S. E., GOFFIN, C., & ANSARI, D. (2015). Developmental specialization of the left parietal cortex for the semantic representation of Arabic numerals: An fMR-adaptation study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *12*(1), 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.12.001>
- VOGEL, S. E., GOFFIN, C., BOHNENBERGER, J., KOSCHUTNIG, K., REISHOFER, G., GRABNER, R. H., & ANSARI, D. (2017). The left intraparietal sulcus adapts to symbolic number in both the visual and auditory modalities: Evidence from fMRI. *NeuroImage*, *153*, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.03.048>
- XU, F., & SPELKE, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, *74*(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9)
- YEE, E., DRUCKER, D. M., & THOMPSON-SCHILL, S. L. (2010). fMRI-adaptation evidence of overlapping neural representations for objects related in function or manipulation. *NeuroImage*, *50*(2), 753–763. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.036>
- YU, M., MO, C., LI, Y., & MO, L. (2015). Distinct representations of syllables and phonemes in Chinese production: Evidence from fMRI adaptation. *Neuropsychologia*, *77*, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.08.027>