

Math, monkeys, and the developing brain

Jessica F. Cantlon¹

Department of Brain and Cognitive Sciences, University of Rochester, Rochester, NY 14627

Edited by Francisco J. Ayala, University of California, Irvine, CA, and approved May 10, 2012 (received for review February 28, 2012)

Thirty thousand years ago, humans kept track of numerical quantities by carving slashes on fragments of bone. It took approximately 25,000 y for the first iconic written numerals to emerge among human cultures (e.g., Sumerian cuneiform). Now, children acquire the meanings of verbal counting words, Arabic numerals, written number words, and the procedures of basic arithmetic operations, such as addition and subtraction, in just 6 y (between ages 2 and 8). What cognitive abilities enabled our ancestors to record tallies in the first place? Additionally, what cognitive abilities allow children to rapidly acquire the formal mathematics knowledge that took our ancestors many millennia to invent? Current research aims to discover the origins and organization of numerical information in humans using clues from child development, the organization of the human brain, and animal cognition.

analog magnitude | functional MRI | mathematics education |
numerical cognition | numerosity

regions involved in analog numerical processing are related to the development of math IQ (18). Taken together, current findings implicate continuity in the primitive numerical abilities that are shared by humans and nonhumans, as well as a degree of continuity in human numerical abilities ranging from primitive approximation to complex and sophisticated math.

Oldest Numbers in the World

The fact that humans have been recording tallies with sticks and bones for 30,000 y is impressive, but the critical issue is this: what cognitive abilities enabled them to encode quantities in the first place? To identify the inherent constraints on humans' ability to process numerical information, it is helpful to consider the evolutionary history of numerical thought. We can look for clues to the evolutionary precursors of numerical cognition by comparing human cognition with nonhuman primate cognition. The degree to which humans and nonhuman primates share numerical abilities is

MATEMÁTICA, MONOS Y DESARROLLO CEREBRAL.

Esta investigación tiene como objetivo descubrir los orígenes y la organización de la información numérica en humanos utilizando claves del desarrollo infantil, la organización del cerebro humano y la cognición animal. Es un artículo de revisión que rastrea los orígenes del procesamiento numérico desde las habilidades cuantitativas “primitivas” (que se usan para estimar el valor de un objeto o evento, por ejemplo, su distancia, longitud, etc.) hasta el cociente de inteligencia matemática (CI). En este artículo se busca comprender la organización de las facultades conceptuales básicas, y cómo se originaron nuestras habilidades matemáticas formales.

Diferentes estudios han demostrado que los humanos adultos, los niños y los primates comparten algoritmos cognitivos para codificar valores numéricos como análogos, comparar valores numéricos y aritmética. Los hallazgos actuales implican continuidad en las habilidades numéricas primitivas que son compartidas por humanos y no humanos, así como un grado de continuidad con las habilidades numéricas humanas que van desde la aproximación primitiva a las matemáticas complejas y sofisticadas.

El grado en que humanos y primates no humanos comparten habilidades numéricas es evidencia de que esas habilidades pueden derivar de un ancestro común. Los primates no humanos comparten tres mecanismos de procesamiento numérico esenciales con los humanos modernos:

- **La capacidad de representar valores numéricos:**

Ambos grupos representan los valores numéricos en un **formato analógico**. Los datos empíricos de monos y humanos y el ajuste del modelo analógico demuestran que, aunque los humanos tienen un medio para representar valores numéricos con precisión usando palabras y números arábigos, todavía tienen un sistema numérico analógico aproximado que funciona esencialmente de la misma manera que en monos.

- **Un mecanismo general para la comparación mental:**

Conocido como efecto de **congruencia semántica**, que es la firma de un proceso de comparación mental en el que se establecen puntos de referencia mentales dependientes del contexto (por ejemplo, para "elegir más pequeño" y para "elegir más grande"), y el tiempo de reacción está determinado por la distancia de los elementos de la prueba de los puntos de referencia. En los seres humanos, el efecto de congruencia semántica se observa para una variedad de comparaciones mentales de estímulos tanto perceptivos como conceptuales: brillo, tamaño, distancia, temperatura, ferocidad, números, etc. Datos de primates no humanos indican que el proceso de comparación mental que produce el efecto de congruencia semántica es primitivo, generalizado y no verbal para juzgar cantidades y otras propiedades unidimensionales.

- **Algoritmos aritméticos para realizar sumas y resta:**

La aritmética es la capacidad de combinar mentalmente valores para crear un nuevo valor sin haber observado directamente ese nuevo valor. Los monos y los seres humanos comparten características en sus capacidades aritméticas: muestran un efecto de proporción cuando realizan una suma no verbal rápida, la precisión de sus

resultados depende de la relación entre los valores de los estímulos de elección y el rendimiento empeora a medida que aumenta el valor del resultado del problema. Sin embargo, difieren en el efecto de práctica: seres humanos adultos y niños pequeños, demuestran este efecto, en el que el rendimiento en un problema mejora cuanto más se practica, a diferencia de los monos.

Dichas habilidades reflejan un sistema cognitivo para el razonamiento numérico que es primitivo y se basa en representaciones de magnitud analógica. Existe evidencia de múltiples fuentes de que el procesamiento numérico analógico recluta un sustrato neuronal común en monos, humanos adultos y niños pequeños, que une las especies y las etapas del desarrollo humano y es independiente del lenguaje y la experiencia matemática formal. Hay una continuidad entre humanos y animales en estos mecanismos subyacentes.

Las facultades cognitivas que los niños utilizan inicialmente para operaciones numéricas analógicas no simbólicas proporcionan un andamiaje para el conteo verbal en la primera infancia. Cuando los niños aprenden una palabra de conteo verbal conocen la cantidad aproximada a la que corresponde sin contar, lo que sugiere que las palabras numéricas se adjuntan al código numérico analógico tan pronto como se aprenden. Las representaciones numéricas analógicas se utilizan para asignar significados semánticos a los símbolos numéricos en el desarrollo humano.

Un sistema numérico primitivo se transforma conceptualmente en un sistema de números simbólicos. Pero además del razonamiento analógico, existen otras habilidades cuantitativas que pueden ser precursoras de la cognición numérica simbólica: la capacidad de juzgar intensidades no numéricas como el tamaño, el tiempo, el brillo, la altura, el peso, la velocidad, el tono y el volumen. Los diferentes tipos de representación de magnitud, incluido el tamaño, número y tiempo comparten algunos recursos neuronales en la corteza parietal, pero no otros.

¿Cómo se relaciona el número con otras cantidades?

- Las representaciones integradas de información procedente de sentidos, modalidades o dominios cognitivos separados surgen de la exposición a las

correlaciones del entorno. Las correlaciones empíricas entre diferentes cantidades se absorben a través de la experiencia.

- Las relaciones entre magnitudes podrían desarrollarse a través del conocimiento conceptual de cómo se estructuran esas dimensiones.
- La representación de la cantidad e intensidad está presente desde el nacimiento, y estas representaciones amodales pueden tomar dos formas: redundancia intersensorial (información de varios sentidos) o intensidad relativa. La redundancia de información sería la principal fuente de superposición representacional.
- Una percepción experimentada en una modalidad estimula automáticamente una percepción en otra modalidad.
- Las relaciones entre las magnitudes derivan de su historia evolutiva más que de procesos de desarrollo.

Relación habilidades numéricas analógicas- CI matemáticas formales.

Las diferencias individuales en el coeficiente intelectual matemático se predicen por las diferencias en la sensibilidad numérica analógica. La capacidad primitiva para estimar valores numéricos de conjuntos de objetos está relacionada con el desarrollo de habilidades matemáticas. Otros estudios también hablan del papel de la función ejecutiva y la memoria de trabajo. Existe una superposición neuronal en los sustratos subyacentes a las representaciones numéricas y analógicas en humanos en regiones del **surco intraparietal**.

En los humanos, a menudo se recluta una segunda región del cerebro durante las tareas numéricas simbólicas: la **corteza prefrontal**, en particular la circunvolución frontal inferior. Se involucra en juicios abstractos y representaciones semánticas, símbolos y reglas.

Las interacciones entre las regiones frontal y parietal son importantes para el desarrollo de la cognición numérica exclusivamente humana, la codificación simbólica: el surco intraparietal calcula representaciones numéricas primitivas y la corteza prefrontal facilita los vínculos entre esos cálculos numéricos analógicos y representaciones numéricas simbólicas en humanos. La conectividad de esta red

funcional frontoparietal predice los puntajes de las pruebas de CI de matemáticas en los niños y da lugar a los conceptos matemáticos formales en humanos.

Conclusión: La capacidad humana única para realizar matemáticas complejas y sofisticadas se remonta a un sistema computacional más simple que se comparte entre muchos animales: el sistema numérico analógico. Los animales humanos y no humanos poseen un sistema común para hacer juicios numéricos a través de representaciones analógicas. A lo largo del desarrollo, las representaciones numéricas analógicas interactúan con la capacidad exclusivamente humana de representar valores numéricos simbólicamente, lo que sugiere una relación entre los sistemas numéricos "primitivos" y modernos. Estos dos son sistemas relacionados.