

Revisión

Genética y aprendizaje: Cómo influyen los genes en el logro educativo

David Bueno i Torrens*

Sección de Genética Biomédica, Evolutiva y del Desarrollo, Facultad de Biología,
Universidad de Barcelona; dbueno@ub.edu.

Resumen

El cerebro es el órgano del pensamiento. El pensamiento se define como el acto de pensar; es decir, de ejercer la facultad de concebir, juzgar o inferir, o considerar algo, una opinión o un conjunto de ideas sobre un tema determinado. Incluye implícitamente los procesos de aprendizaje. Las funciones mentales, que contienen todos los aspectos del comportamiento humano, como los relacionados con el aprendizaje, surgen de la actividad del cerebro. Las conexiones neuronales que generan y dan soporte a las funciones mentales se forman en el transcurso de la vida, lo que permite el aprendizaje de nuevos conceptos y habilidades. Tanto la formación y el funcionamiento del cerebro, así como la plasticidad neuronal están influenciados por la actividad de un conjunto de genes y por modificaciones epigenéticas, que contribuyen a la regulación de la expresión génica adaptándola a las condiciones ambientales. En esta revisión, dirigida especialmente a profesionales de la educación, se analizan las aportaciones genéticas y epigenéticas en aspectos mentales relacionados con los procesos de aprendizaje en términos de heredabilidad. Argumentaré que, a pesar de que, si no todos, la mayoría de los aspectos relacionados con el aprendizaje tienen un trasfondo genético claro, los procesos educativos permiten incrementar o disminuir las capacidades innatas de cada persona. Hablaré, por tanto, de la importancia de la educación en el contexto de la heredabilidad de los procesos vinculados al aprendizaje. La conclusión será que, aunque en la mayoría de estos procesos cerebrales la heredabilidad es relativamente alta, las prácticas educativas constituyen un elemento clave para el desarrollo de los estudiantes, dado que permiten potenciar o, alternativamente, disminuir todas las capacidades cognitivas. Por lo tanto, uno de los objetivos principales de la educación en un mundo cambiante e incierto debería ser formar personas adaptables y versátiles que puedan y quieran aprovechar al máximo sus capacidades. Los conocimientos derivados de la genética y la epigenética, así como de la neurociencia deberían utilizarse para mejorar la comprensión que tenemos los profesionales de la educación sobre los orígenes biológicos de las diferencias en las capacidades cognitivas, lo cual debería permitir desarrollar prácticas educativas más respetuosas y flexibles para alcanzar el objetivo mencionado, formar personas adaptables y versátiles que puedan y quieran aprovechar al máximo sus capacidades en un entorno cambiante e incierto.

*Correspondencia:

David Bueno i Torrens
dbueno@ub.edu

Citación:

Bueno D. Genética y aprendizaje:
Cómo influyen los genes en el
logro educativo. JONED. Journal of
Neuroeducation. 2020; 1(1); 38-51.
doi: 10.1344/joned.v1i1.31788

Declaración ética

Al ser una revisión bibliográfica no
hay aspectos éticos que declarar.

Contribuciones de los autores

El autor confirma que es el único
colaborador de este trabajo
y que lo ha aprobado para su
publicación.

Fuentes de financiación

Este trabajo ha sido financiado
por el Ministerio de Ciencia,
Innovación y Universidades
(Subvención BFU201786152-P).

Declaración de conflictos de interés

El autor declara que la
investigación se llevó a cabo
en ausencia de relaciones
comerciales o financieras que
se pudieran interpretar como
posibles conflictos de interés.

Artículo original

Este artículo ha sido traducido
y adaptado por el autor a partir
de: Bueno, D. Genetics and
Learning: How the Genes Influence
Educational Attainment Front.
Psychol. 2019; 10: 1622. doi:
10.3389/fpsyg.2019.01622.

*El manuscrito ha sido aceptado
por todos los autores, en el caso
de haber más de uno, y las figuras,
tablas e imágenes no están sujetos
a ningún tipo de Copyright.*

Abstract

The brain is the organ of thought. The word thought is defined as the act of thinking about or considering something: an idea or opinion, or a set of ideas about a particular subject. It implicitly includes the processes of learning. Mental func-

tions, including most if not all aspects of human behaviour, such as those related to learning, arise from the activity of the brain. Neural connections that generate and support mental functions are formed throughout life, which enables lifelong learning of new concepts and skills. Both brain formation and function, as well as neural plasticity, are influenced by the activity of a variety of genes and also by epigenetic modifications, which contribute to the regulation of gene expression by adapting it to environmental conditions. In this review, aimed especially at education professionals, I discuss the genetic and epigenetic contributions to mental aspects related to learning processes in terms of heritability. I will argue that, despite most if not all aspects related to learning having a clear genetic background, innate abilities can be enhanced or diminished through educational processes. Thus, the importance of education, in the context of the inheritability of learning processes, will be discussed. The conclusion I draw is that, despite the relatively high genetic heritability shown in most brain processes associated with learning, educational practices are a key contributor to student development, allowing genetically based skills to be enhanced or alternatively diminished. Therefore, one of the main goals of education in a changing and uncertain world should be to form adaptable and versatile people who can, and want to, make the most of their capabilities. Thus, knowledge derived from genetics and epigenetics, as well as from neuroscience, should be used to enhance education professionals' understanding of the biological origins of differences in mental capabilities, thereby empowering them with the possibility to adopt more respectful and flexible educational practices to attain the goal mentioned above.

Palabras clave: genética, epigenética, heredabilidad, ambiente, aprendizaje, adaptación.

Introducción

Aunque el aprendizaje es una tarea compleja que implica muchas funciones cognitivas, el cerebro es capaz de aprender nuevas habilidades y conceptos en el transcurso de toda la vida, interactuando dinámicamente con el entorno. Biológicamente, la capacidad de aprender permite que las respuestas conductuales se vayan adaptando progresivamente al entorno y se modifiquen aspectos que pueden favorecer la supervivencia del individuo en un ambiente complejo, dinámico y cambiante. La educación se basa en esta capacidad de aprendizaje y debe optimizar las funciones cognitivas teniendo en cuenta la cultura humana. Es decir, en función de cada contexto histórico y social específico, la educación ha de contribuir a formar personas capaces de transformarse mediante el aprendizaje de manera activa y autodirigida durante toda su vida. La educación también debería favorecer que las personas estu-

vieran dispuestas a mejorar sus habilidades y conocimientos en cualquier dirección que elijan hasta el límite de sus posibilidades, a crecer intelectual y emocionalmente. Es decir, debería favorecer que las personas pudieran y quisieran aprovechar al máximo sus capacidades.

El cerebro se forma durante el desarrollo embrionario y fetal bajo la dirección de determinados programas genéticos (para una descripción general del desarrollo del cerebro, véase¹). Sin embargo, su conectoma, que es el mapa de conexiones neuronales, se sigue construyendo y reconstruyendo en el transcurso de toda la vida gracias a la capacidad que tiene de establecer nuevas conexiones neuronales. Este proceso, llamado proceso de plasticidad neuronal, es la base celular del aprendizaje. Desde la perspectiva psicológica, la capacidad de aprender requiere muchas funciones cognitivas diferentes, de habilidades mentales que se utilizan en el proceso de adquisición de conocimientos. Las funciones cognitivas, como la

memoria de trabajo, el control cognitivo, la atención, la inteligencia y las funciones ejecutivas, u otras funciones relacionadas como la motivación y la resiliencia se desarrollan a través de la actividad del cerebro, la cual, a su vez, depende de la conectividad y el funcionamiento neuronales. Tanto la construcción del cerebro como el funcionamiento de sus neuronas se basan en programas genéticos, por lo que los genes deben ejercer al menos cierta influencia sobre las funciones cognitivas implicadas en los procesos de aprendizaje.

El genoma humano está formado por unos 20 300 genes², y todos pueden presentar diversas variantes genéticas o alelos. Los distintos alelos de un mismo gen se distinguen por presentar diferentes secuencias de nucleótidos, lo que conlleva diferencias en el mensaje que codifican. Esto, a su vez, se refleja en las funciones biológicas que controlan o influyen a través de las proteínas que sintetizan. Del mismo modo que algunas personas tienen los ojos verdes mientras que otras los tienen marrones o azules, o que algunas son más altas que otras, las variaciones individuales debidas a las influencias genéticas también se pueden encontrar en las características psicológicas, incluidas las relacionadas con las funciones cognitivas. Por ejemplo, Davies y sus colaboradores³ han identificado 148 genes independientes nuevos, además de los 709 que ya se habían identificado previamente, que están asociados a funciones cognitivas generales, y Zwir y sus colaboradores⁴ han identificado 736 genes que están asociados significativamente al temperamento, algunos de los cuales están compartidos con los de la primera lista.

Por poner otro ejemplo, también se han encontrado varios genes cuyos alelos influyen de manera diferente sobre la memoria de trabajo⁵. La memoria de trabajo es un sistema que permite mantener disponibles simultáneamente, pero de manera temporal, varias informaciones para ser procesadas cognitivamente. Está incluida en las llamadas funciones ejecutivas, que son el conjunto de procesos necesarios para el control cognitivo de la conducta. Por ejemplo, el gen COMT, que codifica una enzima responsable del reciclaje de determinados neurotransmisores como la dopamina, un neurotransmisor que a su vez se asocia a la motivación ya las sensaciones de recompensa, entre otras funciones, presenta un sistema alélico conocido como Val158Met, que parece influir en la memoria de trabajo y en los logros

educativos⁶. La nomenclatura que se utiliza en estos dos alelos del gen COMT hace referencia a la posición del aminoácido de la proteína correspondiente, que es diferente en los varios alelos; es decir, el aminoácido que se encuentra en la posición 158 de la enzima COMT puede ser una valina (Val) o bien una metionina (Met), según la secuencia de cada uno de estos dos alelos. En este contexto, la forma Val haría que el lóbulo prefrontal del cerebro, lugar donde se encuentran los circuitos neuronales implicados en la memoria de trabajo, presentara una actividad menor que la forma Met, lo que conllevaría que esta función cognitiva fuera menos eficiente en las personas que llevan este alelo. En otros trabajos, como, por ejemplo, en el de Walter y sus colaboradores⁷, se ha encontrado que este mismo sistema alélico también influye en la facilitación social, que es una característica cognitiva que se define como una mejora del rendimiento producida por la mera presencia de otras personas, y que también es importante en los procesos de aprendizaje.

A pesar de la existencia de influencias genéticas, si no en todas, en la mayoría de las funciones cognitivas asociadas al aprendizaje, no hay duda de que hay varios factores que provocan que la identificación de genes específicos y de alelos concretos con aspectos determinados relacionados con la vida mental sea muy difícil. Estos factores incluyen: (1) el elevado número de genes implicados; (2) las interacciones generalmente complejas entre los diversos genes implicados; (3) el hecho de que cualquier gen e incluso cualquier sistema alélico pueden influir en diferentes dominios psicológicos simultáneamente, por ejemplo, en la memoria de trabajo y la facilitación social, como se ha explicado en el caso concreto del sistema alélico Val158Met del gen COMT, y (4) la influencia de muchos aspectos ambientales en las funciones mentales, incluidos los entornos sociales, familiares y educativos. Así, se han identificado docenas de genes diferentes que influyen en la inteligencia, medida a través del cociente de inteligencia (IQ); sin embargo, ninguno de estos genes contribuye a más del 1% de la medida total de esta característica⁸. En consecuencia, desde la perspectiva educativa, los datos más informativos provienen de la llamada heredabilidad, un valor estadístico que refleja qué proporción de la variación de una característica determinada es debida a diferencias genéticas. Sin embargo, hay que tener presente que no

indica cuántos genes están implicados ni cuáles son estos genes o sus alelos; tampoco expresa qué cantidad de esta característica depende exclusivamente del genoma.

Esta revisión se centra en la heredabilidad de las funciones cognitivas que se consideran relevantes para los procesos de aprendizaje. Los niños no son una simple *tabula rasa*, como se había pensado, ya que están condicionados en gran medida por su genoma. Sin embargo, el entorno donde viven y se desarrollan, incluido el entorno educativo, es también un factor significativo que les puede permitir aprovechar al máximo sus capacidades, tanto en aspectos intelectuales como emocionales. Dicho de otro modo, aunque el cerebro es maleable y se puede cambiar mediante la educación y las experiencias diarias –y en consecuencia también lo pueden hacer las funciones cognitivas que genera y gestiona–, su formación y su funcionamiento se basan en un sustrato genético que le influye de manera moderada e incluso, a veces, elevada. Por tanto, el hecho de conocer la existencia de estas influencias genéticas y epigenéticas en el desarrollo de las funciones cognitivas y el alcance de su influencia puede ayudar a los profesionales de la educación a utilizar estrategias pedagógicas que sean más respetuosas y flexibles. Estas estrategias deberían tener en cuenta las influencias genéticas para destacar la importancia de las prácticas educativas como factor ambiental que contribuye a maximizar el potencial de las competencias de los estudiantes. Lo que aún no se puede decir con un nivel suficiente de certeza es qué características se pueden mejorar con más facilidad o cuáles son más difíciles de cambiar. No todas son igualmente susceptibles de experimentar cambios significativos mediante la intervención educativa, ya que están influenciadas por una gran variedad de factores, desde el abanico de genes diferentes que pueden actuar sobre una misma característica hasta la concurrencia de un gran número de factores ambientales, incluida la educación, pero también experiencias individuales casi imposible de cuantificar.

¿Qué implica el concepto de heredabilidad?

Hay una gran cantidad de evidencias que apoyan la conclusión de que las diferencias individuales en la mayoría de las características psicológicas que se

pueden medir de manera fiable están influenciadas sustancialmente por factores genéticos. Es decir, las características psicológicas, incluidas las funciones cognitivas imprescindibles para el aprendizaje, son parcialmente heredables. Para cuantificar qué proporción de la variación de una característica determinada que se encuentra en las personas de una población se debe a diferencias genéticas, se utiliza el concepto estadístico de heredabilidad. Aunque se usa muy a menudo, se puede interpretar erróneamente con mucha facilidad, lo que puede provocar concepciones equivocadas contraproducentes a la hora de plantear cuestiones educativas y psicológicas. Primero, la heredabilidad no es una propiedad que tengan los genes de una persona individual, sino un parámetro que se aplica a toda una población concreta. Por lo tanto, como cualquier otro parámetro poblacional, como, por ejemplo, la media aritmética, solo se puede utilizar para describir el fenómeno y sus relaciones o efectos con respecto a esa población, no en individuos concretos.

Técnicamente, la heredabilidad se define como la proporción de la variabilidad en cualquier característica observable que esté asociada a la variación genética de la población. Esta variación genética implica la existencia de alelos que contribuyan de manera diferente a la característica analizada. Si este razonamiento se aplica a la variación de las funciones cognitivas entre los individuos de una población, se puede decir que la heredabilidad hace referencia a la proporción de la varianza de una característica particular que se asocia a la variación genética dentro de esta población. Hay que enfatizar que se asocia a la varianza de una característica, pero no aporta ninguna información sobre la causa de aquella característica. No dice nada sobre el número de genes implicados, ni sobre las relaciones entre estos genes, ni qué genes o alelos específicos están implicados, ni tampoco sobre qué parte de la característica en cuestión depende exclusivamente del genoma.

Para entender mejor el concepto de la heredabilidad de las funciones cognitivas, primero hay que comprender de dónde vienen las diferencias individuales. Cualquier característica observable de un individuo se llama "fenotipo"; es un término amplio que se aplica a cualquier característica que se pueda observar, medir y analizar. Tener los ojos de color azul, por ejemplo, es el fenotipo ojos azules, y tenerlos verdes es el fenotipo ojos verdes. En este sentido, las

funciones cognitivas se pueden considerar también como fenotipos, ya que se pueden observar, analizar y medir mediante pruebas adecuadas. La expresión de los fenotipos depende del fondo genético del individuo, que se denomina "genotipo", así como de las diversas influencias ambientales que modulan la función génica. En este contexto, la asunción básica que hay que establecer es que la varianza fenotípica que se observa en una población respecto a un carácter determinado es debida a las varianzas genéticas y las ambientales. La varianza es una medida estadística que cuantifica cómo se dispersa un conjunto de valores a partir de su media. Esta asunción se puede representar linealmente de la siguiente manera: $V_p = V_G + V_E + V_I$, donde V_p , V_G y V_E representan las varianzas fenotípicas, genéticas y ambientales, respectivamente, y V_I , la varianza de la interacción entre los genes y el ambiente. Es interesante señalar que la manifestación de un rasgo particular, el fenotipo, no solo depende del fondo genético y del ambiente, sino también de la interacción que se establece entre cada fondo genético y el ambiente concreto donde se encuentra aquel individuo. Algunos fenotipos, por ejemplo, el grupo sanguíneo dentro del sistema ABO, solo muestran varianza genética, sin ninguna influencia ambiental. Otros, en cambio, como la altura, están influenciados por varianzas genéticas y ambientales, y por las interacciones que se establecen entre ellas.

Los efectos genéticos de los diversos genes implicados en una misma característica se pueden combinar de forma aditiva o no aditiva. Un efecto genético aditivo es aquel en que los diversos efectos genéticos se combinan linealmente. Los efectos genéticos no aditivos, en cambio, son los que incluyen diferentes combinaciones no lineales, como, por ejemplo, que uno de los alelos domine sobre los demás o cuando existen interacciones epistáticas, que son aquellas en las que el efecto de un gen depende de la presencia de uno o más genes modificadores. La diferencia entre los efectos genéticos aditivos y los no aditivos distingue dos conceptos diferentes de heredabilidad. La heredabilidad en sentido amplio, que se representa como H^2 , considera todos los efectos genéticos, tanto los aditivos como los no aditivos; mientras que la heredabilidad en sentido estricto, o h^2 , solo incluye los efectos genéticos aditivos. Desde un punto de vista práctico, los efectos genéticos aditivos son más previsibles que los no aditivos.

La heredabilidad se puede estimar mediante diversos métodos; por ejemplo, los estudios de gemelos, familiares y de adopción, que se pueden combinar con análisis genómicos moleculares de genes candidatos o mediante estudios amplios de asociación de genoma (GWAS según las iniciales en inglés, *genome wide association studies*), que permiten asociar el fenotipo de interés con la secuencia genómica de los individuos. Los GWAS son estudios observacionales de un conjunto de alelos de todo el genoma en diferentes individuos para comprobar si hay alguna variante asociada con la característica analizada. Se centran normalmente en asociaciones entre diferentes polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, o *single nucleotide polymorphisms*), que son el tipo más habitual de variación genética en las personas. Cada SNP representa una diferencia en un solo nucleótido dentro de la molécula de ADN. Hay aproximadamente entre 4 y 5 millones de SNP en el genoma de una persona, que pueden ser únicos o encontrarse también en muchas otras personas. En el contexto de los cálculos de heredabilidad para funciones cognitivas, los SNP pueden ser utilizados como marcadores biológicos o tener un papel directo en la característica analizada. La heredabilidad indica qué proporción de la varianza de una característica entre individuos dentro de una población es debida a diferencias genéticas y, como se ha mencionado, solo se debe utilizar como parámetro de la población.

Los estudios clásicos de gemelos comparan la similitud entre gemelos idénticos (monocigóticos) y fraternos o mellizos (dicigóticos) que han sido criados juntos o, alternativamente, por separado. Los gemelos idénticos son genéticamente idénticos, mientras que los fraternos comparten, de promedio, el 50% de sus genes. En los gemelos fraternos criados juntos, las diferencias observadas en el fenotipo analizado se pueden atribuir tanto a diferencias genéticas como a diferencias ambientales no compartidas (véase a continuación la explicación de qué son las diferencias ambientales compartidas y las no compartidas). En cambio, en los gemelos idénticos que se han criado por separado, las diferencias fenotípicas que se observen solo pueden atribuirse a diferencias ambientales no compartidas. Del mismo modo, los estudios en familias y de adopciones, que investigan la similitud entre diferentes miembros de una familia en función de su grado de consanguinidad, permiten combinar diferentes grados de relaciones

genéticas y ambientales. Por ejemplo, Plomin y Spinath⁹ examinaron la correlación de la heredabilidad intelectual en gemelos monocigóticos y dicigóticos, así como en niños adoptados. Como era de esperar, la correlación es más alta en los gemelos monocigóticos ($> 0,8$) que en los dicigóticos ($\approx 0,6$). Curiosamente, sin embargo, las diferencias entre estas correlaciones del cociente de inteligencia aumentan con la edad, lo que sugiere que las influencias ambientales son menos relevantes a medida que se van haciendo mayores, lo que provoca que la heredabilidad aumente. La correlación en niños adoptados es de 0,0. Para ser estadísticamente significativos, estos estudios deben basarse en un número suficiente de individuos, pero el número preciso depende de la magnitud del efecto que se detecte, y puede ir desde solo algunas docenas de parejas hasta 10 000 individuos cuando los efectos de algunas variaciones son muy pequeños¹⁰.

La heredabilidad se expresa en una escala que va de 0 a 1, o, alternativamente, como un porcentaje, es decir, de 0% a 100%. Un valor de 0,0 (o de 0%) se debe interpretar como una característica en la que las diferencias observadas no están asociadas con ninguna variación genética, sino solo con diferencias ambientales. Por el contrario, un valor de 1,0 (o de 100%) se debe interpretar como una característica en la que las diferencias observadas se asocian exclusivamente a la variación genética, y no a diferencias ambientales. Este último caso, sin embargo, no significa que el entorno no sea importante, sino que no influye en la varianza de aquella característica (recordemos que la varianza mide el grado de dispersión de los valores de aquella característica a partir de su media). Debemos tener en cuenta que la heredabilidad no mide el grado de sensibilidad de una característica a los cambios del entorno, sino que es un valor estadístico que depende de las condiciones ambientales. Por ejemplo, una característica puede tener una heredabilidad completa (1,0) en unas condiciones ambientales específicas, pero se puede ver alterada drásticamente en otras condiciones ambientales. Esto se puede ver, por ejemplo, en ciertos trastornos genéticos que afectan al metabolismo, como es el caso de la fenilcetonuria (PKU), que se debe a una mutación en un solo gen (el gen de la fenilalanina hidroxilasa). La PKU produce discapacidad intelectual por la acumulación del aminoácido fenilalanina, entre otros efectos fenotípicos

(revisado por¹¹). En condiciones de ingesta normal de alimentos, la PKU tiene una heredabilidad de 1,0, pero las intervenciones dietéticas que reducen la ingesta de fenilalanina desde el nacimiento hacen que las consecuencias fenotípicas sean despreciables. Es decir, si cambian las condiciones ambientales, también puede cambiar la heredabilidad. Si aumenta la variación ambiental, se reduce la proporción de la varianza fenotípica debido a la diversidad genética.

Del mismo modo, y por citar otro ejemplo en este caso en un contexto educativo, Colodro-Conde y sus colaboradores¹² describieron un cambio en la heredabilidad del logro educativo en una cohorte española tras la introducción de una política educativa específica en 1970 destinada a promover la educación. La variación ambiental compartida disminuyó, lo que provocó un incremento de la heredabilidad desde 0,44 a 0,67 para los hombres. Este dato apoya el papel de la política educativa en la afectación del peso relativo de los factores genéticos y ambientales en el logro educativo. De este modo, afirmar que una habilidad cognitiva específica, como, por ejemplo, la resiliencia, tiene una heredabilidad del 0,52 en los hombres¹³, no implica que la educación recibida solo pueda afectar al 0,48 (o al 48%) de las diferencias totales. Así, una heredabilidad de 0,52 significa que el 52% de la variabilidad de las respuestas de resiliencia está asociada a la varianza genética de la población real, pero no indica hasta qué punto esta habilidad cognitiva se puede modificar de forma efectiva en cada individuo, teniendo en cuenta su fondo genético, por cambios producidos en el entorno.

Como se ha mencionado anteriormente, se pueden distinguir dos tipos diferentes de diferencias ambientales: los factores ambientales compartidos y los no compartidos. Los factores ambientales compartidos son aquellos aspectos del entorno de una persona que necesariamente se comparten con otras personas de la misma familia, como pueden ser, por ejemplo, el estilo de crianza y las creencias generales de los padres, el estatus socioeconómico y cultural de los padres y el tipo de barrio donde vive la familia. Es decir, son las características del entorno que experimentarían todos los niños de aquella familia en particular. Por otra parte, los factores ambientales no compartidos son cualquier aspecto del entorno y cualquier experiencia que puede ser diferente para los diversos niños de una misma familia, como, por ejemplo, el orden de nacimiento o

cualquier experiencia azarosa que tenga lugar en su vida (haber sufrido acoso sexual, haber tenido un accidente o una enfermedad infecciosa, etcétera).

También es importante tener en cuenta que, dependiendo del método o métodos empleados para calcular la heredabilidad de cualquier característica, el valor puede variar. Esto es evidente cuando se comparan diferentes trabajos que analizan una misma característica. Desde la perspectiva educativa, el mensaje importante respecto a los datos de heredabilidad no es el valor preciso de cualquier característica particular, sino entender que las funciones cognitivas relevantes para el aprendizaje están influidas tanto por la genética de los individuos como por su entorno, incluidos los factores ambientales compartidos y los no compartidos.

Como ya se ha dicho, la heredabilidad no es un valor constante y puede variar con la edad. Por ejemplo, la heredabilidad del IQ varía desde 0,22 en la primera infancia hasta más de 0,8 en la edad adulta, con un efecto sustancial del ambiente compartido durante la infancia que no se mantiene posteriormente, en etapas más tardías de la vida¹⁴ (Figura 1). Los cambios de la heredabilidad en el transcurso de la vida de las personas deben interpretarse teniendo en cuenta que son porcentajes. Los efectos genéticos y los ambientales (incluidos tanto los efectos ambientales compartidos como los no compartidos) deben sumar siempre el 100% (o 1,0), por lo que un aumento de la contribución ambiental a la varianza de la característica que se analiza implica necesariamente una disminución correspondiente de la contribución genética, y viceversa. En este ejemplo, el he-

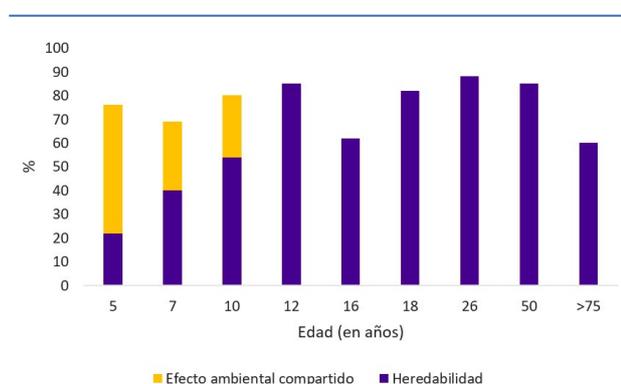


Figura 1. Heredabilidad del IQ en función de la edad en un estudio transversal realizado en gemelos holandeses. Datos de Bouchar¹⁴. La heredabilidad y los efectos ambientales compartidos se muestran por edades; el resto hasta llegar al 100% corresponde a los efectos ambientales no compartidos.

cho de que la heredabilidad del IQ sea significativamente menor durante la infancia indica que las prácticas educativas son mucho más influyentes y eficaces en esta etapa de la vida que posteriormente en la edad adulta. Finalmente, en algunas características también hay diferencias en el valor de la heredabilidad en función del sexo, probablemente debido a la interacción de las hormonas sexuales con otras redes genéticas. Por ejemplo, Boardman y sus colaboradores¹³ calcularon que la heredabilidad de la resiliencia es de 0,52 en hombres y de 0,35 en mujeres, y argumentaron que esta divergencia puede ser debida a diferencias en cuanto a la autoaceptación, que es uno de los aspectos más importantes del funcionamiento psicológico en esta característica. Sin embargo, siempre se debe tener en cuenta que la heredabilidad no mide la sensibilidad de las características a los cambios en el entorno; incluso una característica con heredabilidad completa (1,0) se puede ver alterada por cambios ambientales. Este hecho es crucial para la educación.

La heredabilidad del temperamento y de las funciones cognitivas

Se han publicado numerosos trabajos donde se ha calculado la heredabilidad de diversas características psicológicas y funciones cognitivas mediante diferentes pruebas y métodos en varias poblaciones, tanto de heredabilidad en sentido amplio como en sentido estricto. Aunque no todos los trabajos coinciden en los valores que dan, principalmente debido a los diferentes métodos empleados, pueden servir de base para comprender hasta qué punto la contribución genética afecta a los procesos de aprendizaje, que es el objetivo principal de esta revisión.

El temperamento y la personalidad son elementos clave de las características psicológicas que pueden influir en las capacidades de aprendizaje. El temperamento se define clásicamente como el conjunto de aspectos de la personalidad que expresan emociones básicas como miedo, ira y asco, las cuales se mantienen estables durante el desarrollo y son heredables, más que aprendidas¹⁵. Hay un cierto debate en cuanto a si esta definición debe incluir solo el aprendizaje procedimental, que está presente en todos los animales, o también los procesos cognitivos intencionales y el aprendizaje autobiográfico, que aparentemente solo se encuentran en las per-

sonas¹⁶. Sin embargo, incluye la personalidad, que se puede definir como el conjunto de características y mecanismos psicológicos que forman parte del individuo, los cuales están organizados, son relativamente duraderos e influyen en cómo interaccionan y se adaptan las personas en los entornos intrapsíquicos, físicos y sociales¹⁷. La mayoría de los estudios se han realizado teniendo en cuenta las llamadas cinco grandes características de la personalidad o *big five*: la extraversión, la facilidad de llegar a acuerdos, la conciencia, el neuroticismo y la apertura; o, alternativamente, las tres grandes características de la personalidad o *big three*: la emocionalidad positiva, la emocionalidad negativa y la restricción. Bouchard¹⁴ estimó la heredabilidad en sentido amplio (H^2) para la extraversión (0,54), la facilidad de llegar a acuerdos (0,42), la conciencia (0,49), el neuroticismo (0,48) y la apertura (0,57) (los *big five*), y para la emocionalidad positiva (0,5), la emocionalidad negativa (0,44) y la restricción (0,52) (los *big three*); características que según este análisis no presentan efectos ambientales compartidos, sino únicamente efectos ambientales no compartidos, como pueden ser las experiencias azarosas. Kandler y sus colaboradores¹⁸, en cambio, estimaron la heredabilidad en sentido estricto (h^2) de la apertura entre 0,37 y 0,66 dependiendo de la prueba utilizada, y de la extraversión, entre 0,35 y 0,66, también según la prueba utilizada. Como se ha dicho anteriormente, aunque los datos no siempre coinciden debido al método utilizado y en las poblaciones analizadas, pueden servir de base para entender la existencia de contribuciones genéticas complejas a las diferentes características de la personalidad.

Otros rasgos psicológicos de interés para los procesos de aprendizaje y para los que se ha calculado la heredabilidad son los llamados “seis tipos de personalidad de Holland”, que incluyen la personalidad realista, la investigadora, la artística, la social, la emprendedora y la convencional. Aunque este esquema se ha debatido y criticado por su simplicidad¹⁹, la **Tabla 1** resume algunos de los datos de heredabilidad en sentido amplio y del efecto del entorno compartido, según el trabajo realizado por Bouchard¹⁴. Otras características del temperamento relevantes para los procesos de aprendizaje y que fluctúan con el paso del tiempo son el afecto positivo, como, por ejemplo, la cortesía y la capacidad de interesarse por el bienestar de las otras personas, y el afecto nega-

tivo, como, por ejemplo, disgustarse. Según Zheng y sus colaboradores²⁰, no se detecta ninguna heredabilidad para el afecto positivo, pero sí presenta una influencia ambiental compartida significativa (0,42) a pesar de que hay una gran cantidad de literatura sobre su heredabilidad²¹. Por el contrario, el afecto negativo es moderadamente heredable, y su heredabilidad se estima en el 0,53. Curiosamente, tanto el afecto positivo como el negativo fluctúan siguiendo unas oscilaciones mensuales, y estas fluctuaciones muestran una heredabilidad importante, del 0,34 y el 0,54 para el efecto positivo y el negativo, respectivamente. Del mismo modo, se ha estimado que la fortaleza de carácter, la perseverancia y la pasión para alcanzar objetivos a largo plazo, que son características predictoras del éxito académico, presentan una heredabilidad de 0,37²².

También hay mucha literatura disponible con respecto a la heredabilidad de las funciones cognitivas y de otros rasgos psicológicos directamente relacionados con los procesos de aprendizaje y el éxito académico, como, por ejemplo, la memoria de trabajo, el pensamiento racional y experimental, la capacidad lingüística y de cálculo, la resiliencia, el estilo de afrontamiento, la capacidad de fijar la atención, el control cognitivo, la creatividad, la musicalidad, la habilidad artística, la capacidad de planificación, la cooperación, la confianza y el procesamiento relacional (véase²³ para una revisión de la heredabilidad de los diferentes dominios cognitivos). Sin embargo, la heterogeneidad de los datos, que se relaciona con la variedad de métodos utilizados y de las poblaciones analizadas, incluida la edad de los individuos y de si se calcula la heredabilidad en sentido amplio o en

Tabla 1. Estimaciones de la heredabilidad en sentido amplio y de los efectos ambientales compartidos de los “seis tipos de personalidad de Holland”¹⁴.

Seis tipos de personalidad de Holland	Heredabilidad (H^2)	Efectos ambientales compartidos
Realista	0,36	0,12
Investigadora	0,36	0,10
Artística	0,39	0,12
Social	0,37	0,08
Emprendedora	0,31	0,11
Convencional	0,38	0,11

sentido estricto, hace que sea muy difícil sistematizarlo. La **Tabla 2** resume algunos de los trabajos más relevantes al respecto. Por simplicidad, teniendo en cuenta que esta revisión está pensada para ser útil a los profesionales de la educación y servir de base para entender las contribuciones genéticas a los procesos de aprendizaje, se omiten los detalles de los métodos utilizados, la población analizada y el tipo de heredabilidad calculada.

También se ha demostrado que las diferencias individuales en el logro educativo son muy heredables. Según Pokrope y Sikora²⁴, en niños de 9 años

los resultados académicos valorados a través de los exámenes muestran una heredabilidad de 0,57 en matemáticas y de 0,66 en humanidades, mientras que el efecto del ambiente compartido es de 0,34 en matemáticas y de 0,30 en humanidades. Del mismo modo, la heredabilidad de los resultados académicos se incrementa en el periodo comprendido entre los 6 y los 9 años hasta 0,66. En este caso, sin embargo, el efecto del ambiente compartido es negligible (0,0); por tanto, el efecto ambiental más importante es el no compartido, de 0,34. Esto sugiere que las experiencias azarosas, muy probablemente relacionadas

Tabla 2. Heredabilidad de algunas características cognitivas vinculadas a los procesos de aprendizaje.

Característica	Heredabilidad	Fuente bibliográfica
Inteligencia	de 0,2 a 0,8, según la edad (véase la Figura 1)	14
	de 0,22 a 0,93 según la prueba	18
Inteligencia muy alta	0,33	51
Creatividad	de 0,08 a 0,62, según la prueba	18
Memoria de trabajo	0,39	52
	de 0,40 a 0,65	53
	0,72	54
Pensamiento experimental	0,44	52
Pensamiento racional	0,34	52
Resiliencia (adaptación positiva ante las adversidades)	0,52 (hombres)	55
	0,38 (mujeres)	
Afrontar las emociones (como estrategia para gestionar las adversidades)	0,14	
Afrontar las tareas (como estrategia para gestionar las adversidades)	0,11	
Atención focalizada	0,28	56
Control cognitivo	0,49	56
Perseverancia	0,37	25
Capacidad de planificación	0,53	57
Cooperatividad	0,13	58
Procesamiento relacional	0,67	54
Habilidad lingüística y de cálculo	0,68	59
Musicalidad	de 0,21 a 0,51, según la prueba	60
Habilidad artística	0,29	61

con los procesos educativos, como las relaciones particulares que se establecen con los compañeros y los profesores, tienen una influencia mucho mayor en los logros educativos que las situaciones generales de aprendizaje. Del mismo modo, Rimfeld y sus colaboradores²⁵ calcularon que la heredabilidad del logro académico en los estudiantes británicos de nivel A era de entre 0,35 y 0,75.

También es importante tener en cuenta que hay parámetros de la función y de la estructura del cerebro relacionados con los procesos de aprendizaje y con el logro académico que también muestran una heredabilidad elevada. Por ejemplo, la conectividad efectiva en el estado de reposo de la llamada "red neuronal por defecto" muestra una heredabilidad de 0,54²⁶. La red neuronal por defecto es una gran red neuronal que permite la interacción de múltiples regiones cerebrales. Es la base neurológica del yo y se sabe que participa en muchas funciones diferentes cruciales para el aprendizaje autodirigido y para cuestiones relacionadas con la identidad propia, como es la información autobiográfica, la autorreferenciación, el sentido del propio yo, la teoría de la mente, las evaluaciones sociales, el razonamiento moral, los recuerdos del pasado y los pensamientos de futuro.

Del mismo modo, las funciones ejecutivas –que se ha definido en un párrafo anterior como un conjunto de procesos cognitivos necesarios para el control cognitivo del comportamiento, es decir, para seleccionar y controlar con éxito las conductas que facilitan la consecución de los objetivos escogidos, y que incluyen el control de la atención, la inhibición cognitiva, el control inhibitorio, la memoria de trabajo y la flexibilidad cognitiva– también muestran una heredabilidad entre moderada y alta de 0,29 a 0,72, dependiendo del proceso analizado²⁷. Al igual que con el logro educativo, el efecto del entorno compartido es despreciable, pero el efecto del entorno no compartido oscila entre 0,24 y 0,71, también en función del proceso analizado.

En resumen, a pesar de que, si no todas, la mayoría de las características asociadas a la capacidad de aprendizaje, incluyendo el temperamento y la personalidad, así como la capacidad de controlar el comportamiento hacia objetivos autodirigidos, muestran una heredabilidad elevada, los factores ambientales también son significativos. Siempre hay que tener en cuenta que la heredabilidad refleja la parte de las diferencias en una característica concreta de una

población que es atribuible a diferencias genéticas, pero no mide la sensibilidad de esta característica a los cambios del entorno. Los cambios ambientales pueden alterar el fenotipo de cualquiera de estas características. Además, en algunas funciones cognitivas, los factores ambientales compartidos parecen ser muy influyentes, mientras que en otras, como el caso de las funciones ejecutivas, los factores ambientales no compartidos son los más influyentes.

Las dificultades para establecer con precisión cuáles son los factores más influyentes, junto con algunos malentendidos y errores comunes sobre el significado y la significación biológica de los conceptos de función génica y de heredabilidad han provocado que se hayan hecho algunas propuestas educativas con la apariencia de contar con una base científica cuando, de hecho, no tenían ninguna, como es el caso, por ejemplo, los llamados estilos de aprendizaje²⁸⁻³⁰. Según una encuesta publicada por Howard-Jones³¹, más del 90% de los profesionales de la educación del Reino Unido, de Holanda, de Turquía, de Grecia y de China creen que el proceso de aprendizaje mejora cuando se utiliza el estilo de aprendizaje más adecuado para cada persona. Sin embargo, a pesar de que hay mucha literatura sobre este tema, muy pocos trabajos se basan en el método científico, y los que sí lo han hecho no permiten deducir que las prácticas educativas basadas en estilos de aprendizaje sean beneficiosas³². Por ejemplo, un artículo publicado por Doll y sus colaboradores³³ sobre la influencia de varios alelos del gen COMT que, como se ha dicho, afecta la dopamina en la corteza prefrontal, en el que se concluye que los alumnos aprenden más rápidamente de sus experiencias cuando no se les da ningún consejo, pero que al mismo tiempo esto hace que sean mucho más impresionables cuando se les dan instrucciones, ha sido interpretado de manera errónea por algunas personas como una manera de predecir los estilos de aprendizaje.

En conjunto, estos datos enfatizan la importancia tanto de los procesos de aprendizaje compartido como de las experiencias azarosas, como, por ejemplo, las relaciones particulares que se establecen entre un individuo y sus compañeros y profesores y cualquier experiencia imprevisible que se produzca durante su vida, lo que pone de manifiesto el papel crucial de los profesionales de la educación a la hora de maximizar las habilidades de los estudiantes para

permitirles aprovechar al máximo sus capacidades mediante prácticas educativas respetuosas y flexibles, teniendo en cuenta las influencias genéticas inevitables.

Vinculación del entorno con los genes

A partir de los datos anteriores, es evidente que los factores ambientales configuran las funciones cognitivas a través del cerebro. Por un lado, se sabe que afectan a la plasticidad neuronal y contribuyen a dar forma a las redes neuronales. Por ejemplo, se ha visto que hay una plasticidad neuronal subyacente sustancial asociada al desarrollo que sustenta los cambios de conducta típicos de la adolescencia (para una revisión, véase³⁴), así como durante la infancia³⁵. Aunque esta plasticidad neuronal está fuera del alcance de esta revisión, es importante resaltar su implicación a la hora de modificar y adaptar la conducta mediante el aprendizaje. También hay que tener en cuenta que el conectoma, el mapa de las conexiones neuronales del cerebro que se forma mediante mecanismos de plasticidad neuronal, también tiene influencias genéticas. La heredabilidad del conectoma para todo el cerebro es de 0,2, pero depende de cada región cerebral³⁶.

Por otra parte, también se sabe que varios factores ambientales contribuyen a la regulación de la función génica mediante modificaciones epigenéticas. Esta área, la "neuroepigenética", ha surgido como un subcampo importante de la neurociencia, y permite vincular los factores ambientales con las funciones génicas que afectan a las funciones cognitivas³⁷. La epigenética se refiere a la regulación reversible de varias funciones génicas que se produce independientemente de la secuencia de ADN, y que viene mediada principalmente por cambios en la metilación del DNA y en la estructura de la cromatina mediante modificaciones postraduccionales de las histonas³⁸. Las histonas son las proteínas básicas en torno a las cuales se estructura el DNA. Se han descrito varias modificaciones epigenéticas en las histonas, como la acetilación, la metilación, la fosforilación, la SUMOilación y la ubiquitinilación, que establecen un código complejo en las histonas que modula la expresión génica. A pesar de la complejidad bioquímica de estos procesos, lo importante en cuanto al objetivo de esta revisión es que las modificaciones epigenéticas son esenciales para la regulación adaptativa

a largo plazo de la expresión génica. Dicho de otro modo, la epigenética permite vincular las particularidades ambientales con la función génica adaptando la fisiología y el comportamiento de los organismos.

Se ha descrito que la metilación del DNA contribuye, por ejemplo, a la formación y el almacenamiento de la memoria y, en consecuencia, a los procesos de aprendizaje³⁹ (revisado por⁴⁰⁻⁴¹). También se ha demostrado que las diferencias en la metilación del DNA influyen en la evaluación de las funciones ejecutivas⁴² y que la desnutrición infantil se encuentra asociada a metilación del ADN que puede deteriorar la atención y la cognición⁴³. Del mismo modo, se ha visto que la variación epigenética del gen que codifica el receptor D2 de la dopamina influye en la maleabilidad de la inteligencia⁴⁴⁻⁴⁵. Aunque la neuroepigenética es un campo de investigación relativamente nuevo, la evidencia de su importancia en la regulación de las funciones cognitivas está creciendo rápidamente.

Destacan muy especialmente los traumas y los entornos educativos de la primera infancia sobre el desarrollo cognitivo. Por ejemplo, se ha descrito que el acoso infantil se correlaciona con la regulación epigenética del receptor de glucocorticoides en el cerebro, lo que favorece la manifestación de comportamientos depresivos más tarde en la adolescencia y la edad adulta⁴⁶. Esto afecta específicamente al eje hipotalámico-hipofisario-suprarrenal⁴⁷; también al gen de la monoamina oxidasa de tipo A, el cual tiene varios alelos implicados en comportamientos impulsivos y en otros muchos efectos cognitivos⁴⁸. Del mismo modo, se ha demostrado que el abandono infantil se correlaciona con firmas epigenéticas específicas que tienen implicaciones en la vulnerabilidad psiquiátrica⁴⁹. Por citar otro caso, recientemente se ha demostrado que la crianza y parentalidad negativa –que es la que se basa en poco calor emocional, indiferencia, negligencia, rechazo u hostilidad– se correlaciona con modificaciones epigenéticas específicas en un conjunto de genes que pueden favorecer depresión posteriormente en la vida⁵⁰.

A pesar de que la mayor parte de los trabajos se han centrado en experiencias negativas y sus efectos epigenéticos sobre la vulnerabilidad psiquiátrica, los cambios en las firmas epigenéticas debido a las experiencias infantiles han de verse como un sistema adaptativo que permite a las personas superar los traumas y continuar creciendo, pero que tienen consecuencias posteriores en la vida. Este sistema

adaptativo de firmas epigenéticas está influenciado por muchos tipos de experiencias y condiciones ambientales; sin ellas la supervivencia sería mucho más difícil. Por tanto, se convierte en un sistema paralelo al de la plasticidad neuronal para modificar el comportamiento mediante el aprendizaje.

En resumen, cada vez se reconoce más la importancia de los diversos factores ambientales para la regulación de la función génica que afecta a la personalidad y las funciones cognitivas. Los trabajos mencionados solo representan la punta del iceberg. El objetivo de esta sección no ha sido revisar todos los trabajos que relacionan la epigenética con el comportamiento, sino poner de relieve la importancia de los entornos de aprendizaje no solo para la plasticidad neuronal, sino también para la manifestación fenotípica del genoma, más allá de la heredabilidad general de los diferentes procesos de aprendizaje y de las funciones cognitivas.

Conclusiones

Los datos genéticos y epigenéticos más recientes de que disponemos enfatizan el papel crucial que pueden tener los profesionales de la educación, las familias y la sociedad, en general, para contribuir a la educación de personas que puedan y quieran aprovechar al máximo sus capacidades. Estas influencias pueden contribuir a maximizar las habilidades que los estudiantes tienen a su disposición para afrontar un mundo cambiante e incierto. Aunque la formación y el funcionamiento del cerebro se basan en un sus-

trato genético que le influye en un grado moderado o alto, el cerebro también es maleable y se ve afectado por la educación y las experiencias diarias; por tanto, también se ven afectadas las funciones cognitivas. Como se ha dicho en este artículo, los niños no son, ciertamente, ninguna *tabula rasa*, pero incluso una característica que presente una heredabilidad elevada se puede ver muy alterada por el ambiente, el cual actúa directamente sobre la maleabilidad cerebral o mediante modificaciones epigenéticas. Sin embargo, también hay que señalar que, con los datos actuales, todavía no se puede decir con un nivel suficiente de fiabilidad qué características cognitivas se pueden mejorar con más facilidad o cuáles son más difíciles de cambiar. No todas pueden variar significativamente mediante intervenciones educativas, y esto depende de varios factores. Finalmente, los datos actuales también apuntan a otro factor importante en educación: el aprendizaje debe ser percibido como adaptativo por el cerebro, dado que tanto la plasticidad neuronal como las modificaciones epigenéticas tienen esta función adaptativa. El estilo de enseñanza es crucial para que se produzca esta percepción.

Agradecimientos

El autor agradece la labor del editor y de las personas implicadas en la maquetación de este trabajo. También agradece sugerencias que presentaron los evaluadores durante el proceso de revisión del trabajo original, que han resultado muy útiles para mejorar la calidad del trabajo.

Referencias

1. Brown M, Keynes R, Lumsden A. The Developing Brain. Oxford: Oxford University Press; 2001.
2. Salzberg, SL. Open questions: How many genes do we have? BMC Biology. 2018; 16(94). doi: 10.1186/s12915-018-0564-x.
3. Davies G, Lam M, y col. Study of 300,486 individuals identifies 148 independent genetic loci influencing general cognitive function. Nat. Commun. 2018; 9(1), 2098.
4. Zwiir I, Arnedo J, Del-Val C, Pulkki-Råback L, Konte B, Yang SS, y col. Uncovering the complex genetics of human temperament. Mol. Psychiatry. 2018. doi: 10.1038/s41380-018-0264-5.
5. Karlsgodt KH, Bachman P, Winkler AM, Bearden CE, Glahn DC. Genetic influence on the working memory circuitry: behavior, structure, function and extensions to illness. Behav. Brain Res. 2011; 225(2), 610-622.
6. Enoch MA, Waheed JF, Harris CR, Albaugh B, Goldman D. COMT Val158Met and cognition: main effects and interaction with educational attainment. Genes Brain Behav. 2009; 8, 36-42.
7. Walter NT, Markett SA, Montag C, Reuter M. A genetic contribution to cooperation: dopamine-relevant genes are associated with social facilitation. Soc. Neurosci. 2011; 6(3), 289-301.
8. Plomin R, von Stumm S. The new genetics of intelligence. Nat. Rev. Genet. 2018; 19, 148-159.
9. Plomin R, Spinath FM. Intelligence: genetics, genes, and genomics. J. Pers. Soc. Psychol. 2004; 86(1), 112-29.
10. Posthuma D, Boomsma DI. A note on the statistical power in extended twin designs. Behav. Genet. 2000; 30(2), 147-58.
11. Al Hafid N, Christodoulou J. Phenylketonuria: a review of current and future treatments. Transl. Pediatr. 2015; 4(4), 304-317.

12. Colodro-Conde L, Rijdsdijk F, Tornero-Gómez MJ, Sánchez-Romera JF, Ordoñana JR. Equality in Educational Policy and the Heritability of Educational Attainment. *PLoS One*. 2015; 10(11), e0143796.
13. Boardman JD, Blalock CL, Button TM. Sex differences in the heritability of resilience. *Twin Res. Hum. Genet.* 2008; 11(1), 12-27.
14. Bouchard Jr TJ. Genetic Influence on Human Psychological Traits: A Survey. *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 2004; 13(4), 148-151.
15. Shiner RL, Buss KA, McCloskey SG, Putnam SP, Saudino KJ, Zentner M. What Is Temperament Now? Assessing Progress in Temperament Research on the Twenty-Fifth Anniversary of Goldsmith et al. *Child Development Perspectives*. 2012. doi: 10.1111/j.1750-8606.2012.00254.x.
16. Zwir I, Arnedo J, Del-Val C, Pulkki-Råback L, Konte B, Yang SS, y col. Uncovering the complex genetics of human character. *Mol. Psychiatry*. 2018. doi: 10.1038/s41380-018-0263-6.
17. Larsen RJ, Buss D. *Personality Psychology: Domains of Knowledge About Human Nature (6th Ed.)*. Boston: McGraw Hill; 2017.
18. Kandler C, Riemann R, Angleitner A, Spinath FM, Borkenau P, Penke L. The nature of creativity: The roles of genetic factors, personality traits, cognitive abilities, and environmental sources. *J. Pers. Soc. Psychol.* 2016; 111(2), 230-249.
19. Nauta MM. The Development, Evolution, and Status of Holland's Theory of Vocational Personalities: Reflections and Future Directions for Counseling Psychology. *J. Couns. Psychol.* 2010; 57(1), 11-22.
20. Zheng Y, Plomin R, von Stumm S. Heritability of intraindividual mean and variability of positive and negative affect. *Psychol. Sci.* 2016; 27(12), 1611-1619.
21. Wingo AP, Almlil LM, Stevens JS, Jovanovic T, Wingo TS, Tharp G, y col. Genome-wide association study of positive emotion identifies a genetic variant and a role for microRNAs. *Mol. Psychiatry*. 2017; 22, 774-783.
22. Rimfeld K, Ayorech Z, Dale PS, Kovas Y, Plomin R. Genetics affects choice of academic subjects as well as achievement. *Sci. Rep.* 2016; 6, 26373. doi: 10.1038/srep26373.
23. Goldberg X, Lemos S, Fañanás L. A systematic review of the complex organization of human cognitive domains and their heritability. *Psicothema*. 2014; 26(1), 1-9.
24. Pokrope A, Sikora J. Heritability, family, school and academic achievement in adolescence. *Soc. Sci. Res.* 2015; 53, 73-88.
25. Rimfeld K, Kovas Y, Dal, PS, Plomin R. True grit and genetics: Predicting academic achievement from personality. *J. Pers. Soc. Psychol.* 2016; 111(5), 780-789.
26. Xu J, Yin X, Ge H, Han Y, Pang Z, Liu B, Liu S, Friston K. Heritability of the Effective Connectivity in the Resting-State Default Mode Network. *Cereb. Cortex*. 2017; 27(12), 5626-5634.
27. Friedman NP, Miyake A, Young SE, Defries JC, Corley RP, Hewitt JK. Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *J. Exp. Psychol.* 2008; 137(2), 201-225.
28. Newton PM. The Learning Styles Myth is Thriving in Higher Education. *Front. Psychol.* 2015; 6, 1908.
29. Macdonald K, Germine L, Anderson A, Christodoulou J, McGrath LM. Dispelling the Myth: Training in Education or Neuroscience Decreases but Does Not Eliminate Beliefs in Neuromyths. *Front. Psychol.* 2017; 8, 1314.
30. Newton PM, Miah M. Evidence-Based Higher Education - Is the Learning Styles 'Myth' Important? *Front. Psychol.* 2017; 8, 444.
31. Howard-Jones PA. Neuroscience and education: myths and messages. *Nat. Rev. Neurosci.* 2014; 15, 817-824.
32. Rohrer D, Pashler H. Learning styles: where's the evidence? *Med. Educ.* 2012; 46, 634-635.
33. Doll BB, Bath KG, Daw ND, Frank MJ. Variability in Dopamine Genes Dissociates Model-Based and Model-Free Reinforcement Learning. *J. Neurosci.* 2016; 36,1211-1222.
34. Sachser N, Hennessy MB, Kaiser S. The adaptive shaping of social behavioural phenotypes during adolescence. *Biol. Lett.* 2018; 14(11). doi: 10.1098/rsbl.2018.0536.
35. Miskolczi C, Halász J, Mikics É. Changes in neuroplasticity following early-life social adversities: the possible role of brain-derived neurotrophic factor. *Pediatr. Res.* 2018. doi: 10.1038/s41390-018-0205-7.
36. Miranda-Dominguez O, Feczko E, Grayson DS, Walum H, Nigg JT, Fair DA. Heritability of the human connectome: A connectivity study. *Netw. Neurosci.* 2018; 2(2), 175-199.
37. Sweatt JD. The emerging field of neuroepigenetics. *Neuron*. 2013; 80(3), 624-632.
38. Allis D. (Ed) *Epigenetics (2nd Ed.)*. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press; 2015.
39. Day JJ, Sweatt JD. DNA methylation and memory formation. *Nat. Neurosci.* 2010; 13, 1319-1323.
40. Schmauss C. The roles of class I histone deacetylases (HDACs) in memory, learning, and executive cognitive functions: A review. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017; 83, 63-71.
41. Collins BE, Greer CB, Coleman BC, Sweatt JD. Histone H3 lysine K4 methylation and its role in learning and memory. *Epigenetics Chromatin*. 2019; 12(1), 7. doi: 10.1186/s13072-018-0251-8.
42. Ibrahim O, Sutherland HG, Haupt LM, Griffiths LR. An emerging role for epigenetic factors in relation to executive function. *Brief Funct. Genomics*. 2018; 17(3), 170-180.
43. Peter CJ, Fischer LK, Kundakovic M, Garg P, Jakovcjevski M, Dincer A, y col. DNA Methylation Signatures of Early Childhood Malnutrition Associated With Impairments in Attention and Cognition. *Biol. Psychiatry*. 2016; 80(10), 765-774.
44. Delvecchio G, Bellani M, Altamura AC, Brambilla P. The association between the serotonin and dopamine neurotransmitters and personality traits. *Epidemiol. Psychiatr. Sci.* 2016; 25(2), 109-112.
45. Kaminski J, Schlagenhauf F, Rapp M, Awasthi S, Ruggeri B, Deserno L, y col. Epigenetic variance in dopamine D2 receptor: a marker of IQ malleability? *Transl. Psychiatry*. 2018; 8(1), 169. doi: 10.1038/s41398-018-0222-7.
46. McGowan PO, Sasaki A, D'Alessio AC, Dymov S, Labonté B, Szyf M, Turecki G, Meaney, MJ Epigenetic regulation of the glucocorticoid receptor in human brain associates with childhood abuse. *Nat. Neurosci.* 2009; 12(3), 342-348.
47. Farrell C, Doolin K, O'Leary N, Jairaj C, Roddy D, Tozzi L, y col. DNA methylation differences at the glucocorticoid receptor gene in depression are related to functional alterations in

- hypothalamic-pituitary-adrenal axis activity and to early life emotional abuse. *Psychiatry Res.* 2018; 265, 341-348.
48. Checknita D, Ekström TJ, Comasco E, Nilsson KW, Tiihonen J, Hodgins S. Associations of monoamine oxidase A gene first exon methylation with sexual abuse and current depression in women. *J. Neural. Transm.* 2018; 125(7), 1053-1064.
49. Cecil CA, Smith RG, Walton E, Mill J, McCrory EJ, Viding E. Epigenetic signatures of childhood abuse and neglect: Implications for psychiatric vulnerability. *J. Psychiatr. Res.* 2016; 83, 184-194.
50. Hein S, Thomas T, Yu Naumova O, Luthar SS, Grigorenko EL. Negative parenting modulates the association between mother's DNA methylation profiles and adult offspring depression. *Dev. Psychobiol.* 2018. doi: 10.1002/dev.21789.
51. Zabaneh D, Krapohl E, Gaspar HA, Curtis C, Lee SH, Patel H, Newhouse S, Wu HM, Simpson MA, Putallaz M, Lubinski D, Plomin R, Breen G. A genome-wide association study for extremely high intelligence. *Mol. Psychiatry.* 2018; 23(5), 1226-1232.
52. Fletcher JM, Marks AD, Hine DW, Coventry WL. Heritability of preferred thinking styles and a genetic link to working memory capacity. *Twin Res. Hum. Genet.* 2014; 17(6), 526-534.
53. Blokland GA, McMahon KL, Thompson PM, Martin NG, de Zubicaray GI, Wright MJ. Heritability of working memory brain activation. *J. Neurosci.* 2011; 31(30), 10882-10890.
54. Hansell NK, Halford GS, Andrews G, Shum DH, Harris, SE, Davies G, y col. Genetic basis of a cognitive complexity metric. *PLoS One.* 2015; 10(4), e0123886. doi: 10.1371/journal.pone.0123886.
55. Navrady LB, Zeng Y, Clarke TK, Adams MJ, Howard DM, Deary IJ, McIntosh AM. Genetic and environmental contributions to psychological resilience and coping. *Wellcome Open Res.* 2018; 3, 12. doi: 10.12688/wellcomeopenres.13854.1.
56. Ocklenburg S, Ströckens F, Bless JJ, Hugdahl K, Westerhausen R, Manns M. Investigating heritability of laterality and cognitive control in speech perception. *Brain Cogn.* 2016; 109, 34-39.
57. Tuvblad C, May M, Jackson N, Raine A, Baker LA. Heritability and Longitudinal Stability of Planning and Behavioral Inhibition Based on the Porteus Maze Test. *Behav. Genet.* 2017; 47(2), 164-174.
58. Hiraishi K, Shikishima C, Yamagata S, Ando J. Heritability of decisions and outcomes of public goods games. *Front. Psychol.* 2015; 6, 373. doi: 10.3389/fpsyg.2015.00373.
59. Kovas Y, Voronin I, Kaydalov A, Malykh SB, Dale PS, Plomin R. Literacy and numeracy are more heritable than intelligence in primary school. *Psychol. Sci.* 2013; 24(10), 2048-2056.
60. Gingras B, Honing H, Peretz I, Trainor LJ, Fisher SE. Defining the biological bases of individual differences in musicality. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2015; 370(1664):20140092. doi: 10.1098/rstb.2014.0092.
61. Arden R, Trzaskowski M, Garfield V, Plomin R. Genes influence young children's human figure drawings and their association with intelligence a decade later. *Psychol. Sci.* 2014; 25(10), 1843-1850.