



TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE LA MEMORIA DE TRABAJO DESDE LA INFANCIA A LA
ADULTEZ EMERGENTE Y DE SU RELACIÓN CON LA INTELIGENCIA EN
SUJETOS EN NORMODESARROLLO Y SUJETOS DIAGNOSTICADOS CON
TDA

Presentada por Dña. Raquel Muñoz Pradas



Departamento de Psicología Experimental. Facultad de Psicología. Universidad de Sevilla.

Directores:

Dr. Carlos María Gómez González.

Dra. Elena Isabel Rodríguez Martínez.

Índice

Capítulo I. Introducción

1. Introducción y marco teórico

1.1. Memoria de Trabajo.

1.1.1. Definición y componentes.

1.1.2. Modelos de Memoria de Trabajo.

1.1.3. Modelo de Baddeley y Hitch.

1.1.4. Desarrollo de estructuras anatómicas y señales fisiológicas relacionadas con la Memoria de Trabajo.

1.1.5. Neuroimagen: Resonancia Magnética Funcional, Espectroscopia Funcional de Infrarrojo Cercano y potenciales relacionados con eventos.

1.1.6. Funcionamiento de la Memoria de Trabajo: Desarrollo del proceso de codificación, fase de retención, fase de reconocimiento y proceso de actualización.

1.2. Desarrollo de la Memoria de Trabajo.

1.3. Orden de maduración de los componentes de la Memoria de Trabajo.

1.4. Interdependencia en el desarrollo de los componentes de la MT.

1.5. Diferencias de variabilidad interindividual.

1.6. Inteligencia.

1.6.1. Definición y Test Breve de Inteligencia de K-BIT.

1.6.2. Relación de la Inteligencia con la Memoria de Trabajo.

1.7. TDA, Memoria de Trabajo e Inteligencia.

1.7.1. Trastorno de Déficit de Atención: Definición y criterios de diagnóstico.

1.7.2. TDA, Memoria de Trabajo e Inteligencia.

2. Objetivos e hipótesis.

Capítulo II. Método

3. Métodos

3.1. Muestra

3.2. Instrumentos

4. Análisis estadísticos

Capítulo III. Resultados

5. Resultados

Capítulo IV. Discusión de los resultados

6. Discusión

Capítulo V. Conclusiones

7. Conclusiones

Referencias bibliográficas

Anexos

Anexo I. Preguntas de Investigación.

Anexo II. Respuestas de Investigación.

Anexo III. Esquema de desarrollo de la Investigación.

Anexo IV – Criterios de diagnóstico del TDA recogidos en el DSM-V (2014)

Anexo V. Artículo I: Order of maturation of the components of the Working Memory from childhood to emerging adulthood. - Current Research in Behavioral Science. Elsevier (2021).

Anexo VI. Artículo II: Inter-group and Inter-individual variability in working memory from childhood to emerging adulthood. - Current Research in Behavioral

Science. Elsevier (2021).

Anexo VII. Artículo III: Relationship of Working Memory with K-BIT Matrices and Vocabulary in normodevelopment and ADHD children and adolescents. – Pendiente de publicación.

Índice de figuras

Figura 1. *Explicación del funcionamiento y estructura del modelo de Pasqual-Leone (1994).*

Figura 2. *Explicación del funcionamiento y estructura del modelo de Cowan (1995).*

Figura 3. *Explicación del funcionamiento del modelo Baddeley y Hitch (1974).*

Figura 4. *Regresiones lineales de las puntuaciones Z de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central frente al grupo de edad medido en años hasta los 15 años.*

Figura 5. *Puntuaciones directas del Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central respecto a los grupos de edad.*

Figura 6. *Regresión inversa de las puntuaciones directas de los componentes de la Memoria de Trabajo (Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central) versus Edad medida en días.*

Figura 7. *Regresiones lineales de las desviaciones estándar de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central vs. grupo de edad medida en años. Sin excluir (arriba) y excluyendo (abajo) los valores atípicos de la desviación estándar.*

Figura 8. *Regresión lineal de las puntuaciones residuales de edad de los componentes de la Memoria de Trabajo.*

Figura 9. *Muestra del grupo de ND: Regresiones lineales de las puntuaciones directas de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial, Ejecutivo Central (componentes MT), Vocabulario y Matrices (subtest del K-BIT) frente al grupo de edad medido en días.*

Figura 10. *Grupo con diagnóstico de TDA: Regresiones lineales de las puntuaciones directas de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial, Ejecutivo Central (componentes MT), Vocabulario y Matrices (subtest del K-BIT) frente a la de edad medida en días.*

Figura 11. *Valores de probabilidad obtenidos en las correlaciones de Spearman para los componentes de MT y K-BIT, para 17 sujetos seleccionados de 10000 permutaciones sin reemplazo. N: número de sujetos de la muestra original, N': número de sujetos seleccionados para correlaciones a partir de permutaciones. La flecha roja indica el valor $p=0,05$.*

Índice de tablas

Tabla 1. *Edad y género de los diferentes grupos Estudio I.*

Tabla 2. *Edad y género de los diferentes grupos Estudio II*

Tabla 3. *Estadísticos descriptivos de puntuaciones directas de Bucle Fonológico (BF), Agenda Visoespacial (AV) y Ejecutivo Central EC), para hombres y mujeres.*

Tabla 4. *Significación estadística de las comparaciones entre grupos de edad utilizando las correcciones de Bonferroni para comparaciones múltiples.*

Tabla 5. *Resumen de las estimaciones del modelo y los parámetros en las puntuaciones directas de las regresiones de la MT frente a la edad. Las variables dependientes fueron las puntuaciones directas del Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central. La variable independiente fue Edad medida en días.*

Tabla 6 *Componentes de carga y varianza explicada de los componentes extraídos después de aplicar ACP a los residuos de edad del WMTB-C (258 sujetos).*

Tabla 7. *Correlaciones de Spearman entre las puntuaciones directas de cada una de las subpruebas de K-BIT y WMTB-C en sujetos con normodesarrollo (ND) y TDA. Las puntuaciones directas de las subpruebas de Vocabulario y Matrices del K-BIT también se indican en la tabla. Los valores de p se corrigieron usando la TDF. Con asterisco los valores p significativos.*

Tabla 8. *Correlaciones parciales (controlando por edad) entre las puntuaciones de cada una de las subpruebas de K-BIT y WMTB-C en sujetos en normodesarrollo (ND) y TDA. Las puntuaciones directas de las subpruebas de Vocabulario y Matrices del K-BIT también se indican en la tabla. Los valores de p se corrigieron usando la TDF. Con asterisco los valores p significativos.*

Agradecimientos

A Don Rafael Pradas, ginecólogo. Porque en el fondo siempre supo que su nieta también sería *Doctora*.

A Doña Ángeles Rangel, mi abuela. Por enseñarme que “el saber no ocupa sitio”.

A papá, mamá y Javi. Porque solo ellos saben quitarme los agobios.

A mi querida Fusión. Por escucharme de manera incansable sin entender ni una palabra.

Al Dr. Carlos María Gómez González, por acceder a enseñarme, por su infinita paciencia, por ser mi apoyo y por permitirme trabajar a su lado, habiéndose convertido así en mi referente como investigador.

A la Dra. Elena Rodríguez Martínez, por dirigir y tutorizar cada uno de mis borradores desde la profesionalidad y el cariño.

A mis compañeros del Laboratorio de Psicobiología de la Universidad de Sevilla. Por allanarme el camino.

A todo aquel que sea capaz de leérsela entera.

Gracias.

Resumen

La Memoria de Trabajo (MT) es el sistema cerebral involucrado en el almacenamiento temporal de información (corto periodo de tiempo) y la manipulación de la misma. Este mecanismo posibilita la realización de tareas cognitivas complejas, tales como el razonamiento, el aprendizaje, la comprensión o el desarrollo del lenguaje (Baddeley, 1992). Además está estrechamente relacionada con diferentes procesos cognitivos de gran importancia, como la inteligencia. Es por ello por lo que el presente trabajo se centra en investigar la Memoria de Trabajo, el orden de maduración de sus componentes según el modelo de Baddeley y Hitch (1992), la variabilidad intergrupala e interindividual en la MT durante el desarrollo y su relación con la inteligencia en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con Trastorno de Déficit de Atención (TDA).

Palabras clave: Memoria de Trabajo, orden de maduración, inteligencia, variabilidad, TDA.

Abstract

Working Memory (WM) is the brain system involved in the temporary storage of information (short period of time) and its manipulation. This mechanism makes it possible to carry out complex cognitive tasks, such as reasoning, learning, comprehension or language development (Baddeley, 1992). It is also closely related to different cognitive processes of great importance, such as intelligence. That is why this paper focuses on investigating Working Memory, the order of maturation of its components according to the Baddeley and Hitch (1992) model, the intergroup and interindividual variability in WM during development and their relation with intelligence in subjects in normal development and subjects diagnosed with Attention Deficit Disorder (ADD).

Keywords: Working Memory, maturation order, intelligence, variability, ADD.

Consideraciones para la lectura

Durante la redacción de este trabajo se ha utilizado el género masculino como género no marcado. Además, algunas de las figuras incluidas están en inglés debido a que han sido extraídas de los artículos originales ya publicados o pendientes de publicación.

Abreviaturas y traducciones

ADD – Attention Deficit Disorder

AV – Agenda Visoespacial

BF – Bucle Fonológico

CE – Central Executive (Ejecutivo Central)

EC – Ejecutivo Central

K-BIT – Kauffman Brief Intelligence Test

Matrix – Matrices

MLP – Memoria Largo Plazo

MT – Memoria de Trabajo

ND – Normodesarrollo

PD – Puntuación Directa

PL – Phonological Loop (Bucle Fonológico)

TDA – Trastorno de Déficit de Atención

TDF – Tasa de Descubrimiento Falso

VSS -Visospatial Agenda (Agenda Visoespacial)

Vocabulary – Vocabulario

WMTB-C – Working Memory Test Battery for Children

Capítulo I. Introducción

1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

1.1 Memoria de Trabajo

El presente trabajo consiste en un estudio sobre la Memoria de Trabajo (MT), el orden de maduración de sus componentes, la variabilidad interindividual de los sujetos (tanto absoluta como relativa) y la relación de la misma con la inteligencia tanto en sujetos en normodesarrollo (ND) como en sujetos diagnosticados con trastorno por Déficit de Atención (TDA) (Trastorno de déficit de Atención) con edades comprendidas entre los 6 y los 29 años, ya que se la considera un proceso cognitivo fundamental que se va desarrollando y que madura con la edad.

Este sistema de memoria es especialmente importante en el ámbito de las actividades curriculares y en el desarrollo cognitivo del niño, cumpliendo funciones tan importantes como asimilar diferentes tipos de información, y a su vez, interactuar con la memoria a largo plazo para rescatar información relevante. No obstante, también es capaz de facilitar la consolidación de los contenidos de la memoria de trabajo en memoria a largo plazo y permitir un comportamiento dirigido a objetivos (Baddeley, 2012). Es por ello por lo que surge la necesidad de llevar a cabo este estudio, debido a la importancia de la MT en diversas habilidades cognitivas complejas relacionadas con la escuela (comprensión lectora) (Carretti, Borella, Cornoldi y De Beni, 2009; Peng y col., 2018), resolución de problemas matemáticos (Bull y Lee, 2016; Costa y Passolunghi, 2019; Barnes, Hecht y Raghobar, 2010), logro académico (Alloway y Swanson, 2012) e inteligencia (Demetriou, Spanoudis y Tourva 2016; Swanson, 2008).

1.1.1. Definición y componentes: ¿Qué es la memoria de trabajo y que mecanismos neurales están implicados?

La Memoria de Trabajo (MT) es el sistema cerebral involucrado en el almacenamiento temporal de información (corto periodo de tiempo) y la manipulación de la misma. De entre todas las definiciones existentes de la Memoria de Trabajo (MT), es la de Postle (2006) la más aceptada, ya que la define como la capacidad de retención de información en la percepción consciente, su manipulación y su uso en guiar el comportamiento, cuando esa información no está presente en el entorno. Entendemos por tanto que la

Memoria de Trabajo es un proceso psicológico de origen psicobiológico y neurofisiológico que está involucrado en el almacenamiento y manipulación temporal de información para ejecutar funciones cognitivas complejas, entre ellas, el lenguaje, la comprensión, el aprendizaje y el razonamiento (Baddeley, 1992); también permite mantener activa la información y las operaciones necesarias para resolver una tarea, y se puede asemejar a una especie de pizarra mental donde resolvemos problemas concretos. (Baddeley, 2012). Se caracteriza además por el amplio rango de tipos de información que puede almacenar, ya sea información externa o interna, ya que estas pueden ir de elementos de la memoria a largo plazo, a información nuevamente adquirida, información sensorial, o incluso los resultados de las operaciones de procesamiento que tienen lugar en la misma MT.

Por otro lado, este tipo de memoria es un sistema que posee la capacidad de almacenar la información en un breve periodo de tiempo (durante segundos) y procesar la información (Baddeley, 1992), existiendo por tanto limitaciones en el procesamiento de información por la MT: el almacenamiento es temporal y se deteriora en segundos, ya que esta tiene una capacidad reducida y un almacenamiento temporal restringido (Cowan, 2010).

Finalmente se destaca que, en concreto, el constructo de MT está relacionado con otra serie de capacidades, como es la inteligencia fluida (Engle y cols., 1999), a lo que se dedicará un apartado específico.

1.1.2. Modelos de MT

Desde el descubrimiento de este constructo, la MT ha sido objeto de diversas teorías en relación a su estructura y funcionamiento. En los últimos años se han desarrollado numerosos modelos y teorías para explicar la MT, de entre los que se destacan los más relevantes:

- Modelo de Pasqual-Leone (1994): Uno de los modelos más aceptados para la explicación del proceso cognitivo es el de Pascual-Leone (Pascual-Leone y Baillargeon, 1994). Este modelo entiende la MT como un elemento del sistema cognitivo que permite identificar niveles en el desarrollo cognitivo de los individuos mediante esquemas. Dichos esquemas se consideran una representación de acciones que se llevan a cabo, y son

dependientes de las condiciones que se necesitan para que se genere su activación. Estos esquemas pueden ser “figurativos”, relacionados con el contenido y “operativos”, relacionados con el procesamiento de la información (Kemps y cols., 2000). Este modelo, hace referencia además al concepto de *hardware*, el cual operaría dando soporte físico a los esquemas anteriormente citados. Por otra parte, se refiere también a los operadores de la MT, que se dividen en dos tipos. En primer lugar, el operador M, que mide la capacidad atencional necesaria para activar de manera interna los esquemas durante la realización de tareas cognitivas, y en segunda lugar el operador I, relacionado con la inhibición de esquemas competidores. Este modelo explica que cuando se reciben entradas, se activan algunos esquemas internos que constituyen la Memoria de Trabajo, por lo que el rendimiento de la MT estará determinado según este modelo por la cantidad de esquemas que puedan activarse de manera simultánea (ver fig.1).

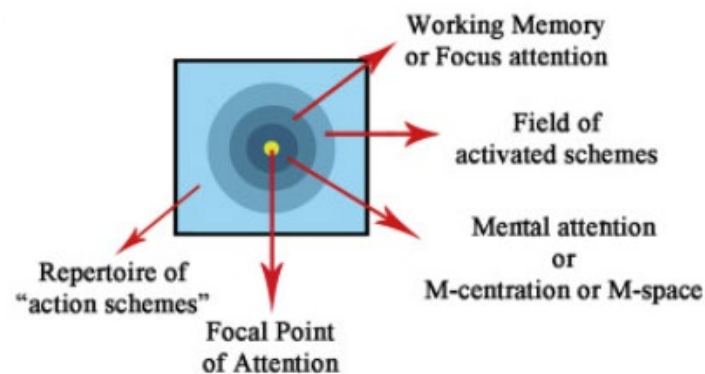


Figura 1. *Explicación del funcionamiento y estructura del modelo de Pasqual-Leone (1994).* Fuente: Gómez, C. M., y cols., (2021)

- Modelo de Cowan (1995): Otra alternativa de modelo de MT son los modelos basados en el estado. Estos modelos consideran a la MT como la activación de representaciones semánticas, perceptuales o motoras de la Memoria a Largo Plazo (MLP), de manera que la información almacenada se mantiene activa en diferentes niveles de intensidad gracias al papel fundamental de la atención, ya que ésta determina qué elementos de la MT se activan y a qué intensidad, además, mantendría activas las representaciones necesarias para la realización de tareas. (Gómez y cols., 2007; Gómez y Flores, 2011; Morales y cols., 2018).

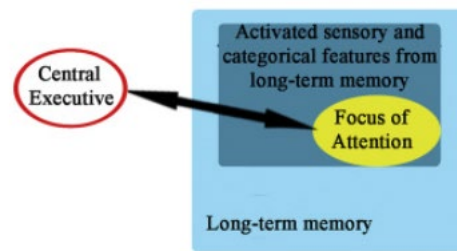


Figura 2. *Explicación del funcionamiento y estructura del modelo de Cowan (1995).*

Fuente: Gómez, C. M., y cols., (2021)

Este modelo está compuesto por 3 almacenes de memoria distintos: el primero, consta de un almacén de memoria sensorial; el segundo, de un almacén a corto plazo y el tercero, de un almacén a largo plazo, junto con otro componente destacable del modelo: un procesador o Ejecutivo Central (ver fig. 2). En el almacén de memoria sensorial se producen dos fases, una inicial y breve que produce una sensación continua durante milisegundos y una segunda, que es capaz de retener la información sensorial elaborada durante algunos segundos. Esta segunda fase es considerada como el momento de activación de algunas características de la memoria a largo plazo, es decir, como parte del almacenamiento a corto plazo (memoria activada) (Castella-Mate, 2010). Cowan entiende entonces que existen dos almacenes de información, la segunda fase del almacén sensorial y el almacén a corto plazo, ya que la atención selectiva subyace a ambos. Lo esencial del modelo es que la MT se concibe como la activación atencional transitoria de ciertos contenidos de la memoria a largo plazo.

Dedicamos un apartado especial al modelo de Baddeley y Hitch (1974), puesto que este modelo, es el principal en el que se basa el presente trabajo. Al igual que Cowan (2015), Baddeley (2012) señaló que la diferencia entre el modelo multicomponente y los modelos basados en el estado radican más en la terminología que en los procesos fundamentales, ya que el control del buffer episódico se diferenciaría poco del control atencional sobre la MLP.

1.1.3. Modelo Multicomponente de Baddeley y Hitch

Aunque en la literatura se encuentran diferentes modelos explicativos sobre la MT, uno de los modelos más representativos sobre este tipo de memoria es el Modelo Multicomponente de Baddeley y Hitch (1974). En 1974, Baddeley y Hitch describen un

modelo de memoria de trabajo (MT) basándose en experimentos (Baddeley y Hitch, 1974) que muestran tres componentes diferentes (Gómez y cols., 2019): Dos sistemas relacionados con el almacenamiento de la información (Bucle Fonológico y Agenda Visoespacial) y un sistema Ejecutivo Central (Díaz y cols., 2012). Será este modelo el que sustente nuestro estudio. Otra ventaja del uso de este modelo proviene de aspectos estrictamente prácticos. El modelo de Baddeley y Hitch ha sido operacionalizado para su aplicación en formato de papel y lápiz para niños y adolescentes, a través del denominado Working Memory Test Battery for Children, que facilita la evaluación de esta importante función cognitiva Gathercole, S., & Pickering, S. (2001).

Este modelo explica que la MT está formada por tres componentes (ver fig. 3): En primer lugar, por un sistema nuclear o principal, llamado Ejecutivo Central, este, se encarga de combinar los componentes esclavos: la Agenda Visoespacial y el Bucle Fonológico, permitiendo la interacción con la memoria a largo plazo. Es imprescindible en situaciones novedosas como la resolución de problemas, la planificación, la selección de estrategias complejas como las de multitarea que solicitan procesamiento simultáneo, es decir, este componente se define como un sistema de control de la atención de alto nivel (Baddeley, 2012).

Adentrándonos aún más en las funciones de cada componente, se destaca que el Bucle Fonológico se encarga del mantenimiento temporal de la información verbal y auditiva en el cerebro para llevar a cabo las funciones cognitivas que requieran de esa información. La Agenda Visoespacial es otro subsistema de la MT, junto con el Bucle Fonológico. A diferencia de este, está implicada en la retención y procesamiento cognitivo por un tiempo limitado de la información visual y espacial. También está relacionado con la información verbal que ha sido codificada en imágenes. En ambos casos, estas tareas se llevan a cabo con la dificultad de interferencias Visoespaciales o auditivas (Burin y cols., 2004). El Ejecutivo Central es el sistema a los que están subordinados la Agenda Visoespacial y el Bucle Fonológico, ya que sus funciones implican distribuir la información recibida entre los distintos subsistemas y coordinar los procesos cognitivos llevados a cabo por ellos. También se encarga de los aspectos atencionales y estratégicos de los procesos cognitivos (Baddeley, 2010; Díaz y cols., 2012) y es el nexo entre los subsistemas y la memoria a largo plazo (McCabe y cols., 2010). Según Baddeley (2000), existiría un cuarto componente en el modelo de MT, llamado el “episodic buffer”, o buffer episódico. Se trata de un sistema de capacidad de almacenamiento limitado y temporal

que puede relacionar e integrar información proveniente de los otros subsistemas y de distintas modalidades sensoriales, sería el encargado de la integración de esas modalidades sensoriales, con distintas codificaciones, y de la memoria a largo plazo en una única representación episódica.

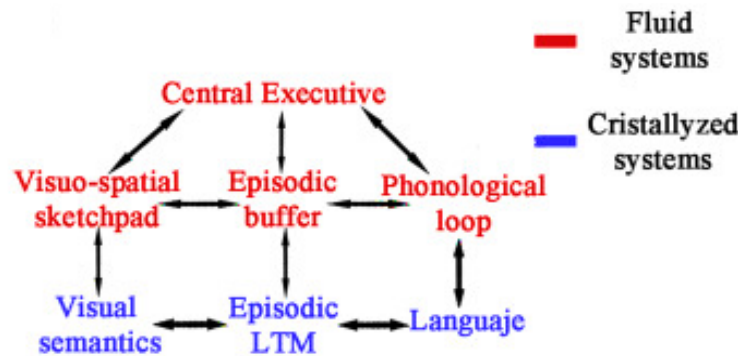


Figura 3. Explicación del funcionamiento del modelo Baddeley y Hitch (1974).

Fuente: Gómez, C. M., y cols., (2021)

1.1.4. Desarrollo de estructuras anatómicas y señales fisiológicas relacionadas con la Memoria de Trabajo

En relación al desarrollo anatómico y fisiológico relacionado con la MT, estudios revelan la participación del cerebelo, los núcleos basales y varias áreas corticales tales como áreas cingulada, sensoriales, frontales y parietales en las operaciones de MT en adultos. De manera más específica, se ha determinado que la corteza prefrontal dorsolateral y las cortezas parietales inferior y superior son particularmente importantes para favorecer la retención de información asociada a la MT. (Fuster, 2007).

Se ha demostrado además la posibilidad de que los cambios madurativos ligados a la edad estén relacionados con el rendimiento de la MT. Más específicamente, el aumento de la conectividad estructural que se genera con la edad dentro de la corteza prefrontal y las redes frontoparietales son parámetros principales para explicar esta mejora en la MT. (Ostby, Tamnes, Fjell y Walhovd, 2011; Vestergaard y cols., 2011; Zhou y cols., 2014). Otros factores que explicarían la mejora de la MT serían la actuación del fascículo longitudinal superior, que aumenta su mielinización con la edad (Ostby y cols., 2011), y el adelgazamiento cortical frontoparietal a través del desarrollo, que también está relacionado con dicha mejora. (Ostby y cols., 2011).

1.1.5. Neuroimagen: Resonancia Magnética Funcional, Espectroscopia Funcional de Infrarrojo Cercano y potenciales relacionados con eventos

La Resonancia Magnética Funcional (RMF) se utiliza para determinar qué áreas cerebrales se activan durante las tareas de MT en niños y adolescentes. Tsujimoto, Yamamoto, Kawaguchi, Koizumi, u Sawaguchi, (2004) demostraron un aumento de la actividad en la corteza prefrontal lateral durante una tarea visoespacial en niños de 5 años, lo que demuestra que las áreas cerebrales que serán importantes en las tareas de MT en adultos ya comienzan a desarrollarse desde la infancia. Es por ello por lo que se confirma la similitud entre las áreas cerebrales que se activan en niños y las que se activan en adultos durante las tareas de MT (áreas frontoparietales), encontrándose en los adultos un mayor nivel de activación que en los niños.

Más tarde, Kwon y cols., (2002) demostraron un aumento de la actividad en el área de Broca, relacionada con el aumento de rendimiento en una tarea visoespacial. Esta mejora se debería al desarrollo de una estrategia verbal de codificación de la información. Por otro lado, el aumento del rendimiento del componente visoespacial de la MT se relacionó no solo con el aumento de la actividad en las áreas frontoparietales, sino también con el aumento de mielinización que conecta las áreas frontal y parietal.

Si bien es cierto que la Resonancia Magnética Funcional (fMRI) es un método de neuroimagen comúnmente utilizado, se recomienda la Espectroscopia Funcional de Infrarrojo Cercano (fNIRS) para analizar las operaciones de MT de los niños más pequeños. (Baird y cols., 2002) Utilizando esta técnica se ha observado la activación de la corteza prefrontal dorsolateral en niños de 3 a 7 años (Perlman, Huppert y Luna, 2016).

Finalmente, cabe destacar los potenciales relacionados con eventos (ERPs) que permiten analizar el tiempo de actuación de los diferentes procesos involucrados en la MT (codificación, retención, reconocimiento y actualización), por lo que presentarían dicha ventaja con respecto a la Resonancia Magnética Funcional.

1.1.6. Funcionamiento de la Memoria de Trabajo: Desarrollo del proceso de codificación, fase de retención, fase de reconocimiento y proceso de actualización

El funcionamiento de la Memoria de Trabajo puede secuenciarse en diferentes fases. Durante la fase de codificación se pueden observar una sucesión de potenciales relacionados con eventos visuales que sufren una continua disminución de amplitud con la edad (Barriga-Paulino, Rodriguez-Martinez, Rojas-Benjumea, & Gomez, 2014; Barriga-Paulino y cols., 2017). La presencia de estos potenciales visuales durante la codificación sugiere que ésta ocurre de manera similar al análisis visual propio de otros procesos cognitivos.

Durante la fase de retención, se detecta la presencia de ondas lentas negativas en adultos, que podrían representar la visión macroscópica de la actividad sostenida de las neuronas durante esta fase, tal como se ha descrito en registros unicelulares en monos durante la fase de retención (Fuster, 2007). Estas mismas ondas ya están presentes en niños a partir de los 6 años, aunque con la particularidad de mostrar un lado positivo en la localización frontocentral y una negatividad occipital que evoluciona con la edad para diseminar la negatividad en localizaciones anteriores y posteriores (Barriga-Paulino y cols., 2014, 2017). Esta polaridad positiva en los niños diferente a la polaridad negativa en los adultos demuestra una inmadurez de los circuitos frontales involucrados en la MT.

A continuación, durante la fase de reconocimiento, los sujetos han de ser capaces de reconocer información ya almacenada en la MT. Igual que en la fase de codificación, aparecen potenciales evocados visuales típicos del análisis visual. Cuando la presentación del estímulo a reconocer es lateralizada, tanto en niños como en adultos se detectan tendencias a la negatividad contralateral que disminuirían con la edad y que en niños/as tendrán una latencia más larga indicando una mayor dificultad en el reconocimiento.

Finalmente, tiene lugar la fase de actualización. La actualización es un proceso mediante el cual se modifican los contenidos de la MT. Para la modalidad visual, el resultado más común obtenido en estudios ha sido una disminución de la amplitud y la latencia de los ERPs con el aumento de la edad. Mientras que en la modalidad auditiva, el resultado más frecuente es una disminución de la latencia y un aumento de la amplitud de los ERPs (Gómez y cols., 2018, Pelegrina y cols 2020; Riggins & Scott, 2019). Por lo

tanto, se necesitan más estudios para definir claramente la neurofisiología del desarrollo del proceso de actualización de MT.

1.2. Maduración de la Memoria de Trabajo

Para este estudio se seleccionan sujetos con edades comprendidas entre los 6 y 29 años (de infancia a la adultez emergente), ya que las habilidades propias de la MT evolucionan y se desarrollan sobre todo en la infancia y la adolescencia temprana (Andre y cols, 2015; Barriga-Paulino y cols., 2016). Diversos estudios demuestran que tras los siete años de edad, la MT del niño es similar a la de un adulto en organización y estrategias (Gathercole y cols., 2004). Sin embargo, las zonas neuroanatómicas utilizadas entre niños y adultos no están aun plenamente maduras, tal y como se indicó anteriormente. El desarrollo de la MT depende de varios aspectos tales como: el procesamiento de información específica de cada modalidad, la codificación y retención en la memoria, el aumento de capacidad y los cambios relacionados con la maduración de funciones cognitivas que involucran principalmente a la corteza prefrontal (Cowan y cols., 1995, Logie y Pearson, 1997, Nelson, 1995, 2000), la cual, es precisamente la que presenta una maduración más tardía. Además, se han observado diferencias en las áreas cerebrales implicadas en el procesamiento de MT con respecto a la edad (Barriga-Paulino y cols, 2016) al igual que cambios en la estructura cerebral relacionada con la MT a través del rendimiento y las redes neuronales vinculadas con la MT (Gómez y cols., 2019).

También es de notar que los componentes de la Memoria de Trabajo son observables en edades tan tempranas (4 años), y se han registrado incrementos funcionales en todos ellos en un rango de los 4 a los 15 años (Gathercole y cols., 2004). Otro estudio de Barriga-Paulino y cols. (2016) sugiere que estos cambios podrían estar relacionados con la edad y con el proceso madurativo de la cognición, pero también con las diferencias individuales que surgen durante el desarrollo de la persona.

En suma, todos estos estudios muestran que la maduración de la MT es un proceso de larga duración en el desarrollo, con cambios tanto estructurales como en eficiencia y eficacia, lo que determina que para el estudio ligado al desarrollo sea necesario una muestra que cubra las diferentes edades.

La maduración de la MT depende de varios aspectos, como el tipo de información que se almacena, la codificación, la retención de la información, y los cambios relacionados con la maduración de las funciones ejecutivas que involucran principalmente a un área específica del cerebro, particularmente la corteza prefrontal (Klingberg y cols., 2006), un área cerebral que sufre profundos cambios durante la adolescencia (MacPherson y cols., 2019; Yakovlev y Lecours, 1967). Estos cambios incluyen una evolución de la velocidad de procesamiento ligada a la edad, al igual que una mejora en tareas de recuerdo (Barrouillet y cols., 2009).

Según el modelo de Baddely & Hitch, la MT se desarrolla de una forma particular, en concreto, desde el punto de vista del desarrollo, esta teoría, pone énfasis en varios aspectos, en concreto, todo lo relacionado con la estructura de la MT y con el aumento del rendimiento conforme la edad va avanzando. Siguiendo el desarrollo de la prueba Working Memory Test Battery for Children (WMTB-C) desarrollado por las profesoras Gathercole y Pickering (2001) que operacionaliza el Modelo de tres componentes de Baddeley y Hitch (1974) en una población comprendida entre los 6 y 14 años, se demuestra que la estructura que forman los tres componentes o sistemas del modelo ya se encuentran en el grupo más joven que conforma la población (Gathercole y cols., 2004).

Por otro lado, parece que el cambio de estrategia en la codificación de información basada únicamente en características visuales de los objetos a una estrategia en la que la información de tipo visual puede estar respaldada por estrategias verbales que ocurren alrededor de los 7-8 años (Gathercole y cols., 2004). Estas estrategias verbales consisten en el repaso de información. Esto permitiría estabilizar los contenidos de la MT. Además, estas autoras describen que de los tres sistemas que forman el modelo multicomponente: Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central, es el Ejecutivo Central el que necesitará un periodo más extenso para madurar.

1.3. Orden de maduración de los componentes de la Memoria de Trabajo

En cuanto al desarrollo estructural de MT, el Bucle Fonológico (BF) y Agenda Visoespacial (AV) se desarrollan de forma independiente en el período de 5 a 8 años (Pickering y cols., 1998). Además, la independencia de AV y BF se confirmó en preadolescentes (11-14 años) (Jarvis & Gathercole, 2003) y el BF y el Ejecutivo Central (EC) mostraron una asociación moderada en niños de 6 y 7 años (Gathercole & Pickering, 2001). En un análisis confirmatorio utilizando el WMTB-C, una batería de memoria de trabajo basada en el modelo de Baddeley & Hitch (1974), se demostró la independencia de los tres componentes de la MT en niños y adolescentes (de 6 a 15 años) (Gathercole y cols., 2004).

A pesar de la independencia estadística entre los tres componentes, se ha observado una asociación más estrecha entre EC y BF que entre EC y AV. La MT alcanza una meseta a los 15 años, alcanzando el EC el rendimiento más alto más tarde que los sistemas esclavos: BF y AV (Gathercoles y cols , 2004). La mayor eficiencia de las operaciones de MT con la edad permitiría la liberación de espacio y permitiría el aumento de la capacidad que se observa en MT durante el desarrollo (Case y cols., 1982). Aunque el modelo de tres componentes de Baddeley y Hitch es muy característico, la función de actualización también es una operación de MT bastante importante que afecta el desarrollo de MT (Artuso & Palladino, 2016; Pelegrina y cols., 2020).

Gathercole y cols (2004) demostraron que existe un crecimiento lineal de las puntuaciones Z de los subtests de MT incluidas en el WMTB-C en sujetos entre 4 y 14 años, estabilizándose entre los 14 y 15 años de edad, a excepción de la subprueba de patrón visual en la que encontraron una estabilidad del rendimiento a los 11 años. En este estudio no se exploraron edades superiores a los 15 años.

Por otra parte, Alloway y cols., (2006), demuestran que el rendimiento en tareas de memoria verbal a corto plazo se estabiliza a los 10-11 años, mientras que la memoria visoespacial a corto plazo presenta un incremento lineal hasta los 11 años. Sin embargo, en este último estudio el grupo de mayor edad evaluado fue de 11 años.

No obstante el aspecto del orden de maduración de los componentes de la MT ha sido estudiado escasamente, por lo que es necesaria la precisa determinación de ese orden, dada la gran influencia de la MT, y específicamente de sus diferentes subcomponentes en la cognición y desempeño curricular infantil.

1.4. Interdependencia en el desarrollo de los componentes de la Memoria de Trabajo

El desarrollo de la MT se ha estudiado a través de tareas experimentales, pero también por medio de baterías psicométricas, como el WMTB-C que operacionaliza el modelo de MT de Hitch y Baddeley (Gathercole y Pickering, 2000). La madurez en los tres componentes se alcanza claramente a los 7 años en términos de organización y estrategias (Gathercole y Hitch, 1993), pero el formato de codificación de la información varía con la edad, ya que los niños pequeños usan información visual y agregan la recodificación verbal de la información después de los 8 años usando para ello el Bucle Fonológico (Hitch y cols., 1988). Un factor adicional para aumentar la eficacia sería la liberación de espacio de la MT, que facilitaría el aumento de la capacidad de información verbal (Hulme y cols., 1984).

En cuanto al desarrollo estructural de la MT, los componentes de Bucle Fonológico y Agenda Visoespacial se desarrollan de forma independiente en el período de 5 a 8 años (Pickering y cols., 1998). La independencia de Agenda Visoespacial y Bucle Fonológico fue confirmada en preadolescentes de 11-14 años (Jarvis y Gathercole (2003). Por otra parte, el Bucle Fonológico y el Ejecutivo Central mostraron una asociación moderada en niños de 6 y 7 años (Gathercole y Pickering, 2000). En un análisis confirmatorio y utilizando el WMTB-C en niños y adolescentes (6 a 15 años) se demostró la independencia de los tres componentes de la MT (Gathercole y Pickering, 2004; Barriga-Paulino y cols., 2016).

A pesar de la independencia estadística entre ellos, en los tres componentes se encontró una asociación más cercana entre Ejecutivo Central y el Bucle Fonológico que entre Ejecutivo Central y Agenda Visoespacial. La MT alcanza una meseta estable a los 15 años, siendo el Ejecutivo Central el que alcanza el rendimiento más alto más tarde que los sistemas esclavos (BF y AV). Sobre esta base, hay una asociación más fuerte entre el ejecutivo central y el bucle fonológico que entre el ejecutivo central y el componente visoespacial, que en parte puede ser debido a que la medida del ejecutivo central se basa en tareas que son similares a la tareas del bucle fonológico. La mayor eficiencia de las operaciones de MT con la edad permitiría la liberación de espacio que facilita el aumento de la capacidad que se observa en MT (Case y cols., 1982). Curiosamente, la variabilidad individual de la MT se aborda en la literatura científica en relación con la variabilidad individual de otras funciones cognitivas como velocidad de procesamiento (Mella y cols.,

2015) e inteligencia fluida (Fry y cols., 2000), a lo que se le dedicará un apartado más adelante.

1. 5. Diferencias de variabilidad interindividual

Una vez comprobado que los componentes de la MT alcanzan su grado de madurez a diferentes edades, se hace necesario investigar si existen además, diferencias entre los propios individuos en el rendimiento de la MT. Este aspecto se considera fundamental debido a que la organización del sistema educativo agrupa al alumnado por edad y selecciona el currículo en relación a la misma, por lo que se hace necesario determinar si existen o no diferencias en el desarrollo de la MT de cada uno de estos individuos.

La variabilidad hace referencia a la dispersión de los valores de una variable que han sido medidos en diferentes puntos. En este estudio, se estudian las diferencias entre los distintos grupos de edad a los que se les ha aplicado la batería de MT, por lo que nos referimos a variabilidad interindividual (entre los distintos individuos).

A menudo, la variabilidad es considerada como “ruido”, por lo que tradicionalmente, ha sido descartada en los estudios. Sin embargo, hay estudios que muestran que es una importante fuente de información que puede aportar mucho al campo de la Psicología (Sauce y cols., 2013). La variabilidad interindividual en MT es de particular importancia en su proyección madurativa. Según Cowan (2010), existen diferencias entre individuos que pueden afectar el rendimiento en tareas de MT, y la tendencia sugerida por las investigaciones relacionadas con estas diferencias es que ciertas diferencias son mucho más importantes que otras en el desarrollo de funciones cognitivas superiores (tales como el razonamiento o la resolución de problemas) o el desarrollo de la inteligencia fluida. Ciertas investigaciones sugieren que esto se observa mediante la capacidad de “filtro” de la MT, es decir, la capacidad de diferenciar (y luego mantener) la información relevante en la MT (Robison y cols., 2018).

Aunque la variabilidad entre grupos de edad se describe en las pruebas psicométricas de MT (Gathercole y Pickering, 2001; Rosselli-Cock y cols., 2004), no se hace ningún esfuerzo para comprender si la variabilidad absoluta entre grupos (medida como desviación estándar de las puntuaciones directas), y la variabilidad relativa (medida como coeficiente de variación de las puntuaciones directas) cambian en los diferentes

grupos de edad. Hasta donde sabemos, este aspecto no ha sido estudiado en la literatura de MT. En particular, y con respecto a medidas más complejas de MT como las incluidas en el modelo de Baddeley y Hitch, no se ha estudiado la magnitud de las diferencias individuales entre diferentes grupos de edad. Este aspecto es de importancia social dado que los sujetos de un determinado grupo de edad tienen que compartir los mismos nichos ecológicos y estar bajo la misma presión social, como por ejemplo exige el mismo aula y currículo. Por lo tanto, el conocimiento de la variabilidad esperada en las diferencias individuales para cada grupo de edad debe ser una preocupación primordial para los educadores.

1.6. Inteligencia

1.6.1. Definición y Test Breve de Inteligencia de K-BIT Kaufman

De los estudios de Gardner (1999) surge la definición de inteligencia como la capacidad para lograr la resolución de problemas y componer productos estimados, al menos en un entorno cultural o en un grupo específico. Además, Sternberg (1997) elaboró la teoría de la inteligencia triárquica como alternativa a la concepción tradicional de este constructo, definiendo la inteligencia como la capacidad para lograr objetivos dentro de un contexto cultural y social, requiriendo para ello de la combinación de las diferentes habilidades de creatividad, inteligencia analítica y práctica (Sternberg, 1997).

El Test Breve de Inteligencia de K-BIT Kaufman (Kaufman y Kaufman, 1990) es una prueba empleada regularmente que mide la inteligencia general a través de dos subpruebas. La primera subprueba mide las habilidades verbales a través del reconocimiento de palabras (Test de Vocabulario) y las habilidades no verbales a través de pruebas para completar analogías (Test de Matrices). Se considera que el Vocabulario se relaciona con la inteligencia cristalizada, mientras que las Matrices se relacionan más con la inteligencia fluida (Wang y Kaufman, 1993). Las puntuaciones directas en las pruebas de inteligencia aumentan con la edad hasta la adolescencia tardía y la edad adulta temprana, siguiendo en este sentido un patrón similar al de MT (Koenig y cols., 2018).

1.6.2. Relación de la Inteligencia con la Memoria de Trabajo

Numerosos estudios han demostrado que existe una fuerte relación entre la Memoria de Trabajo y la Inteligencia (Colom y cols., 2003; Colom y cols., 2008), ya que existe correlación entre los resultados de diversas tareas de MT y las pruebas de inteligencia (Tourva y cols., 2016). De hecho, el índice de memoria que se obtiene de la administración de algunas subpruebas de la Escala de Inteligencia para Adultos de Wechsler (WAIS) y la Escala de Inteligencia para Niños de Wechsler (WISC) permite evaluar la capacidad para atender la información presentada verbalmente, manipularla a corto plazo memoria inmediata, y luego responder. (Cornoldi y cols., 2013; Egeland, 2015). Por lo tanto, la MT es una parte constitutiva de estas pruebas de inteligencia ampliamente aceptadas.

El constructo MT está relacionado directamente con el de inteligencia fluida (Engle y cols., 1999), y tiene especial importancia en el desarrollo de las actividades curriculares. Según Cowan (2014), la MT es una parte crucial del procesamiento cognitivo y permite llevar a cabo funciones más complejas y necesarias de la vida diaria, como la comprensión lingüística, la lectura, el razonamiento u otras funciones ejecutivas. También es clave en la interacción entre la información recibida y la memoria a largo plazo, para facilitar la recuperación de información almacenada que pueda ser relevante, reforzando su papel en el desarrollo de las actividades curriculares (Cowan, 2014).

Tourva y cols., (2016) desarrollaron un estudio para analizar la posible relación entre la inteligencia y tres funciones cognitivas: atención, memoria de trabajo y velocidad de procesamiento. Lograron demostrar que existe una relación estadísticamente significativa entre la MT y la inteligencia general, pero no entre las otras dos funciones cognitivas. Asimismo, una amplia variedad de investigaciones muestran la importancia de la MT en otros procesos escolares, como el rendimiento matemático (Lee y Bull, 2016; Passolunghi y Costa, 2019; Raghobar, Barnes y Hecht 2010) y la comprensión lectora (Carretti, Borella, Cornoldi y De Beni, 2009; Peng y cols., 2018).

En esta investigación para operacionalizar el constructo de inteligencia se utiliza el Test Breve de Inteligencia de Kaufman (K-BIT; Kaufman y Kaufman, 1990). Esta prueba mide la inteligencia general a través de dos subpruebas. La primera subprueba mide las habilidades verbales a través del reconocimiento de palabras (Test de Vocabulario) y las habilidades no verbales a través de pruebas para completar analogías

(Test de Matrices). Se considera que el Vocabulario se relaciona con la inteligencia cristalizada, mientras que las Matrices se relacionan más con la inteligencia fluida (Wang & Kaufman, 1993). De hecho, en una prueba similar (matrices de Raven; Raven, 2007) se ha demostrado que la inteligencia fluida media a través de la corteza prefrontal dorsolateral y las áreas parietales en el control de la interferencia en una tarea de MT, lo que sugiere una estrecha relación entre estos dos aspectos cognitivos. (Gray y cols, 2003).

Finalmente, la subescala de vocabulario K-BIT está relacionada con la amplitud y profundidad del vocabulario, ya que se basa en el reconocimiento de imágenes simples y en encontrar las palabras relacionadas con una definición. Una de las ventajas de usar K-BIT es que se necesita mucho menos tiempo para la aplicación que para por ejemplo, la escala de inteligencia para niños Wechsler que es más completa (WISC-V; Wechsler, 2015). Esto hace que K-BIT sea particularmente útil para niños y grupos con problemas de atención. Las puntuaciones directas en las pruebas de Inteligencia aumentan con la edad hasta la adolescencia tardía y la edad adulta temprana, siguiendo un patrón similar al de MT (Koenis y cols., 2018).

1. 7. TDA, Memoria de Trabajo e Inteligencia

1.7.1. Trastorno de Déficit de Atención.

El Trastorno por Déficit de Atención (TDA) es un trastorno del neurodesarrollo que incluye déficit de atención y/o impulsividad, y puede llegar a interferir de manera significativa en diferentes áreas del desarrollo normal de un niño, persistiendo los síntomas durante la adolescencia y la edad adulta (Sabaté., 1998). Actualmente, se desconocen las causas del TDA, aunque existen diferentes hipótesis relacionadas con la morfología cerebral, la genética, factores psicosociales y factores ambientales. Además, este trastorno presenta gran comorbilidad con otros trastornos psíquicos diagnosticables, como son el trastorno del lenguaje, trastornos de aprendizaje y conducta, trastorno de ansiedad, síndrome de la Tourette o problemas en las relaciones interpersonales.

El TDA es uno de los múltiples trastornos en el desarrollo cerebral que presenta mayor incidencia en la actualidad, presentándose en la niñez y llegando a provocar alteraciones conductuales, afectivas y cognitivas (Lenroot y col., 2007; Shaw y col., 2008) que se traducen en dificultades en el aprendizaje, dificultades de sociabilización en

la escuela, conductas disruptivas e incluso fracaso escolar. Según las fluctuaciones numéricas de los criterios diagnósticos de este trastorno, los sujetos se dividen en tres presentaciones diferentes: Sujetos predominantemente impulsivos, sujetos predominantemente inatentos y sujetos de presentación combinada (Barkley, 1998).

Una de las teorías explicativas del TDA más aceptadas en la actualidad es la teoría de Barkley (1998), conocida como teoría del Déficit de Inhibición Comportamental o Autocontrol, y expone que debido a las alteraciones de funciones ejecutivas básicas fundamentales, el niño diagnosticado con TDA es incapaz de regular su conducta. Otra de las teorías que nos resulta interesante es la que relaciona el TDA con problemas en la Memoria de Trabajo (codificación, retención y actualización de la información), llegando a propagarse dichos problemas a otros dominios cognitivos (Rapport et al., 2001).

En relación a la neurofisiología del TDA, cabe destacar la importancia de los avances tecnológicos que han permitido explorar de manera más precisa las zonas cerebrales afectadas. Gracias a estas investigaciones se localiza el déficit en la vía lóbulo frontal-ganglios basales, circuitos cortico-pontinos-cerebelo-talámico-corticales y en zonas de sustancia blanca (Castellanos, 1994). Los cambios cerebrales también pueden estudiarse mediante otros métodos, como es el electroencefalograma (EEG). Gracias a este método se encuentra que los niños diagnosticados con TDA presentan mayor actividad de las ondas lentas y disminución de las ondas rápidas, lo que sugiere problemas en la orientación a los estímulos, el control inhibitorio y el procesamiento de los errores y del feedback.

Recientemente, las últimas investigaciones han mostrado un aumento de positividad en la denominada negatividad lenta relacionada con el periodo de retención en tareas de MT (Arjona et al., 2018). Esta mayor positividad estaría relacionada con una maduración prolongada de la MT en las redes frontocentrales relacionadas con la operación de retención de la MT y justificaría el menor rendimiento en las tareas de MT de niños y adolescentes con TDAH (Rodríguez-Martínez et al., 2018).

1.7.2. TDA, Memoria de Trabajo e Inteligencia.

El bajo éxito del alumno que presenta TDA en las actividades curriculares y el rendimiento están relacionados con un ajuste reducido en la escuela, la familia y varios contextos sociales (Magnin & Maurs, 2017). El alumno que presenta TDA suele presentar también un déficit en MT y se considera uno de los principales déficits en el procesamiento de la información en el TDA, proyectando deterioro en procesos conductuales y cognitivos más complejos (Castellanos & Tannock, 2002; Rapport, y cols., 2001; Schachar y cols., 2000). Con respecto a la inteligencia general, se ha demostrado que en general, los niños diagnosticados con TDA presentan un Cociente Intelectual (CI) relativamente más bajo que los niños en ND (Frazier y cols., 2007; Loe y Feldman, 2007), siendo esta disminución de la inteligencia general parte del fenotipo normal de niños que presentan TDA (Mackenzie y Wonders, 2016). Los criterios diagnósticos del TDA recogidos en el DSM V (2014) se recogen en el anexo IV.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Estudio I: Orden de maduración de los componentes del modelo Multicomponente de Baddeley y Hitch (1992) durante el desarrollo.

El objetivo que se propuso para realizar un estudio sobre el orden de maduración de los componentes de la memoria de trabajo fue demostrar el orden de maduración de los componentes de la MT (BF, AV, EC) que componen el modelo multicomponente de Baddeley y Hitch (1992).

En cuanto a la hipótesis de esta investigación, se plantea que podría existir un orden de maduración diferente para los sistemas que componen el modelo multicomponente de la MT. Posiblemente, el EC sería el último componente en madurar debido a la dependencia de éste con la maduración de la corteza prefrontal.

Estudio II: Variabilidad intergrupale e interindividual en la MT durante el desarrollo.

En segundo lugar, para estudiar la posible interdependencia en el desarrollo de los componentes de la Memoria de Trabajo y las diferencias de variabilidad interindividual se establecieron los siguientes objetivos: (i) determinar si existen o no diferencias individuales intergrupales de las puntuaciones directas de los componentes de la MT obtenidas a través del WMTB-C en diferentes grupos de edad, (ii) determinar si existe una relación entre el desarrollo de los diferentes componentes de la MT (BF, AV, EC) siguiendo el Modelo de Baddeley y Hitch.

Con respecto a la variabilidad de las diferencias intergrupales entre grupos de edad se espera que la variabilidad absoluta de las puntuaciones directas de MT aumenten con la edad de los grupos, pero no la variabilidad relativa. En relación a la interdependencia de la variabilidad individual entre las puntuaciones directas de WMTB-C a lo largo del desarrollo, se espera una mayor relación entre las puntuaciones directas de EC con BF, que con AV siguiendo los resultados de estudios realizados anteriormente (Gathercole y Pickering, 2004).

Estudio III: Relación de la MT con la inteligencia. Análisis de esta relación en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA.

Finalmente, para estudiar la posible relación de la MT con la inteligencia en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA, se establece como objetivo principal mostrar si existe una relación entre el desarrollo de la MT medida a través del WMTB-C (Gathercole & Pickering, 2001) y la inteligencia medida con K-BIT durante el desarrollo.

Se espera que los componentes de la MT estén relacionados con la inteligencia tanto en sujetos con normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA, aunque es posible que existan diferencias en los patrones de estas relaciones.

Capítulo II. Método

3. MÉTODOS

3.1. Muestra

El presente estudio ha sido realizado en tres fases, las cuales están desarrolladas bajo unos objetivos específicos y con la selección de diferentes muestras, debido a la disponibilidad de sujetos experimentales.

Estudio I: Orden de maduración de los componentes del modelo Multicomponente de Baddeley y Hitch (1992) durante el desarrollo.

La muestra del primer estudio ha sido seleccionada por conveniencia, ya que queremos estudiar el orden de desarrollo y maduración de la MT durante el periodo de edad seleccionado (6-29 años) teniendo en cuenta además la paridad de género.

La muestra de sujetos para este estudio estuvo conformada por un total de 258 participantes con edades comprendidas entre 6 y 29 años, 134 de género masculino (52%, $M = 14.49$, $DT = 6.249$) y 124 de género femenino (48 %, $M = 14,35$, $DT = 5,885$). Se dividieron en grupos utilizando el criterio de edad en años, formando grupos de dos años de 6 a 17 años. Los sujetos en el rango de edad 18-21 y 22-29 formaron grupos de edad independientes. La organización de los grupos en diferentes rangos de edad se hizo con el fin de equiparar aproximadamente el número de sujetos en cada grupo de edad (ver tabla 1).

Tabla 1. *Edad y género de los diferentes grupos Estudio I. Fuente: Elaboración propia.*

Edad	(n)	Género
6-7	32	Masculino: 18 Femenino: 14
8-9	35	Masculino: 16 Femenino: 19
10-11	32	Masculino: 18 Femenino: 14
12-13	32	Masculino: 17 Femenino: 15

14-15	26	Masculino: 13 Femenino: 13
16-17	24	Masculino: 12 Femenino: 12
18-21	33	Masculino: 16 Femenino: 15
22-29	44	Masculino: 24 Femenino: 20

Durante el proceso de selección, ningún sujeto informó de la existencia de enfermedad neurológica, psiquiátrica o psicológica diagnosticada, ninguno estaba en tratamiento farmacológico. El nivel socioeconómico de los sujetos era clase media y todos los participantes se encontraban en el grado escolar correspondiente a su edad biológica. Los experimentos se realizaron con el consentimiento informado y por escrito de cada participante (padres/tutores en el caso de los niños y adolescentes) siguiendo el protocolo de Helsinki. El estudio fue aprobado por el Comité de Bioética de la Junta de Andalucía (<https://www.juntadeandalucia.es/salud/portaldeetica/>).

Estudio II: Variabilidad intergrupala e interindividual en la MT durante el desarrollo.

La segunda muestra está compuesta también por 258 sujetos, distribuidos aproximadamente según el género para que haya paridad: 134 de género masculino (M=14,49, St=6,25; rango=6-29) y 124 de género femenino (M=14,35, St=5,88; rango=6-29). Los sujetos entre 6 y 18 años se organizaron en grupos de un año para analizar la variabilidad intergrupala respecto a la MT. Debido a un número reducido de participantes de 18 años a 29 años, los sujetos (participantes) se organizaron en grupos con un rango de 2 años en lugar de 1 año, con el fin de igualar el tamaño de los grupos con el número de participantes por grupo menores de 18 años (ver tabla 2). Al igual que en la primera muestra, ninguno de los sujetos seleccionados nos informó haber sido diagnosticados con ningún deterioro neurológico, psicológico o psiquiátrico y no estaban tomando ningún compuesto farmacéutico. Además, todos los participantes en edad escolar y secundaria estaban matriculados en el grado correspondiente a su edad biológica. Los participantes

procedían de un entorno socioeconómico de clase media. Los experimentos se realizaron con el consentimiento informado y por escrito de cada participante (padres/tutores en el caso de los niños y adolescentes) siguiendo el protocolo de Helsinki. El estudio fue aprobado por el Comité de Bioética de la Junta de Andalucía (<https://www.juntadeandalucia.es/salud/portaldeetica/>).

Tabla 2. *Edad y género de los diferentes grupos Estudio II. Fuente: Elaboración propia*

Edad	N. Sujetos	Género
		Ratio
6	18	Masculino: 9 Femenino: 9
7	14	Masculino: 9 Femenino: 5
8	19	Masculino: 8 Femenino: 11
9	16	Masculino: 8 Femenino: 8
10	18	Masculino: 11 Femenino: 7
11	14	Masculino: 7 Femenino: 7
12	16	Masculino: 9 Femenino: 7
13	16	Masculino: 8 Femenino: 8
14	15	Masculino: 7 Femenino: 8
15	11	Masculino: 6 Femenino: 5
16	12	Masculino: 7 Femenino: 5
17	12	Masculino: 5 Femenino: 7
18-19	17	Masculino: 8 Femenino: 9
20-21	16	Masculino: 8 Femenino: 8
22-23	16	Masculino: 8 Femenino: 8
24-25	16	Masculino: 8 Femenino: 8
26+	12	Masculino: 8 Femenino: 4
258		

Estudio III: Relación de la MT con la inteligencia. Análisis de esta relación en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA.

Finalmente, para llevar a cabo el tercer estudio, se seleccionan dos muestras diferentes: Sujetos en normodesarrollo (ND) y sujetos con Trastorno de Déficit de Atención e Hiperactividad (TDA).

La muestra de ND está compuesta por un total de 84 sujetos con edades comprendidas entre 6 y 18 años (media=10,8, DS=3,3, rango: 6/18 años), siendo 45 de género masculino (53,5%) y 39 de género femenino (46,5%). Por otra parte, la muestra de sujetos con TDA está formada por 36 sujetos con edades comprendidas entre 6 y 17 años (media=11.29, DS=3.19, rango: 6/18), siendo 28 de género masculino (77,8%) y 8 de género femenino (22,2%).

Inicialmente la muestra de sujetos que presentaban TDA estaba compuesta por 41 niños y adolescentes que fueron evaluados a través de dos métodos diferentes: Una entrevista estructurada y “Aula Nesplora” (Climent & Bantela, 2011; Díaz-Orueta y cols., 2014). A todos los participantes se les habían recetado diferentes cantidades de metilfenidato, pero no tomaron el medicamento 48 horas antes de participar en el estudio. Los progenitores contestaron el cuestionario DuPaul (DuPaul, 1998), y tras la evaluación se detectaron cinco casos sin concordancia diagnóstica entre el cuestionario y la entrevista clínica, por lo que estos sujetos fueron eliminados del estudio, quedando finalmente la muestra de sujetos que presentaban TDA con 36 participantes.

Al igual que las muestras anteriores, los participantes tenían un nivel socioeconómico medio y se encontraban en el año académico correspondiente a su edad, y no se ha registrado ninguna enfermedad psicológica, psiquiátrica o neurológica (excepto diagnóstico de TDA – medicación suprimida 48 horas previas al estudio). Para la participación en este estudio, se requirió también el consentimiento por escrito (padres/tutores en el caso de los niños y adolescentes) siguiendo el protocolo de Helsinki. El estudio fue aprobado por el Comité de Bioética de la Junta de Andalucía (<https://www.juntadeandalucia.es/salud/portaldeetica/>).

3.2. Instrumentos

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se han utilizado los siguientes instrumentos:

Working Memory Test Battery For Children (WMTB-C)

El Working Memory Test Battery for Children (WMTB-C) de Gathercole y Pickering (2001) es una batería compuesta por un total de 9 subtests combinados en un orden específico para poder medir a través de puntuaciones directas los tres componentes que forman la MT: Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central. El orden de administración es el siguiente: (1) Recuerdo de dígitos, (2) Lista de palabras coincidentes, (3) Recuerdo de lista de palabras, (4) Recuerdo de bloques, (5) Recuerdo de lista de no palabras, (6) Recuerdo de lo escuchado, (7) Recuerdo de lo contado o enumerado, (8) Recuerdo de laberintos y (9) Recuerdo de dígitos hacia atrás.

Cada uno de los subtests en combinaciones concretas miden algún componente de la MT. Es decir, los subtests que cuantifican el primer componente, Bucle Fonológico son producto de la combinación de los subtests 1, 2, 3 y 4, los subtests 5 y 6 miden el componente Agenda Visoespacial y la combinación de los subtests 7, 8 y 9 miden el último componente del modelo, el Ejecutivo Central.

La batería utilizada tuvo que adaptarse del inglés al español, siguiendo una serie de criterios específicos como los siguientes: Para las subpruebas de Lista de palabras coincidentes (2) y Recuerdo de lista de palabras (3), se utilizaron palabras bisílabas recogidas de una lista de frecuencia de palabras utilizada por niños, con ciertos criterios similares como la longitud entre las palabras originales y alta frecuencia de uso, con el fin de facilitar la cumplimentación de la prueba a los grupos de edad menores (Justicia, 1995). Para la subprueba de recuerdo de lista de no palabras (5) se emplearon las mismas palabras que en las pruebas anteriores, pero para transformar las palabras en no palabras (pseudopalabras), se cambió el orden de las vocales dentro de las palabras y el orden de las sílabas que las componían. Por último, en la subprueba de recuerdo de lo escuchado (6), se tradujeron las oraciones originales de inglés a español para no perder el sentido de la prueba.

La batería fue traducida y adaptada por la Dra. Elena Isabel Rodríguez-Martínez (Rodríguez-Martínez y cols., 2013). Los sujetos que se prestaron al estudio completaron

el documento mediante lápiz y papel. La batería que forman los 9 subtests se completaron en el laboratorio de Psicobiología Humana del Departamento de Psicología Experimental de la Facultad de Psicología de la Universidad de Sevilla).

Test breve de inteligencia de Kaufman (Kaufman's Brief Intelligence Test) /K-BIT

El test breve de inteligencia de Kaufman (K-BIT) mide la inteligencia verbal y no verbal en niños, adolescentes y adultos (Kaufman y Kaufman, 1990). La prueba consta de dos subtest, uno de Vocabulario (inteligencia verbal) y uno de Matrices (inteligencia no verbal). Finalmente, de la suma de ambas subpruebas se obtiene una puntuación global de cociente intelectual (CI). En este proyecto se analizan ambas subpruebas individualmente, no se realiza el análisis del CI compuesto.

Debido a las dificultades de disponibilidad de los sujetos participantes, el K-BIT (Kaufman y Kaufman, 1990) solo se administró a 21 sujetos que presentaban TDA y a toda la muestra de sujetos en ND (84). Se obtuvieron las puntuaciones directas del K-BIT para el subtest de Vocabulario (inteligencia verbal) y el subtest de Matrices (inteligencia no verbal) en ambos grupos.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Para realizar los análisis estadísticos del presente estudio se utiliza el programa IBM SPSS Statistics 26. Dichos análisis se realizan en tres fases:

Estudio I: Orden de maduración de los componente del modelo Multicomponente de Baddeley y Hitch (1992) durante el desarrollo.

Para estudiar el orden de maduración de los componentes de la Memoria de Trabajo se realiza:

-Regresión lineal de las puntuaciones Z de los componentes de MT con respecto a la edad medida en años.

Se llevó a cabo una réplica del análisis de Gathercole y col., (2004), con el objetivo de estudiar cómo se desarrolla cada uno de los tres componentes de la MT de las puntuaciones Z con respecto a la edad. Para replicar este análisis, solo se seleccionaron sujetos con edades de 15 años o menos, siguiendo el mismo protocolo que en Gathercole y cols (2004). Los puntuaciones Z de los puntuaciones directas de los componentes de MT obtenidos del WMTB-C se sometieron a una regresión lineal con el grupo de edad medido en años.

- ANOVAS lineales univariados de las Puntuaciones Directas de los componentes de la MT.

Para realizar el estudio sobre el orden de maduración de los componentes de la MT con respecto a la edad, se computaron ANOVAS lineales univariados con los factores grupos de edad y género con las puntuaciones directas del Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central como variables dependientes. Cuando fue necesario, se aplicó la corrección de Greenhouse-Geisser para la esfericidad. Se calcularon además post-hoc de Bonferroni para los resultados significativos del grupo de edad. El post-hoc permitiría establecer posibles diferencias en el orden de maduración de los tres componentes de la MT.

Estudio II: Variabilidad intergrupala e interindividual en la MT durante el desarrollo.

Para estudiar la variabilidad interindividual dentro de cada uno de los grupos establecidos se realizaron los siguientes análisis, aunque se consideraron aspectos previos relacionados con la adecuación del modelo de regresión a utilizar, la edad como factor determinante y la distribución de la muestra:

-Regresiones de las puntuaciones directas con respecto a la edad con diversos tipos de modelos.

Con el objetivo de determinar qué tipo de modelo de regresión se ajustaba mejor al estudio del incremento de las puntuaciones directas de MT con la edad, se realizó una regresión de cada una de las puntuaciones directas obtenidas de WMTB-C a través de diferentes modelos (lineal, logarítmico, inverso, cuadrático, cúbico, potencial, de crecimiento y exponencial), análisis que sirvió para verificar que el modelo inverso era el más apropiado.

-Cálculo de puntuaciones residuales y puntuaciones pronosticadas para descartar el factor edad.

Para descartar el factor de crecimiento se calcularon las puntuaciones residuales respecto a las puntuaciones directas sobre sus puntuaciones pronosticadas según la edad. Se emplean las siguientes fórmulas que implementan el modelo inverso con respecto a la edad:

$$\text{Puntuación Pronosticada (PP)} \rightarrow \text{PP} = b_0 + (b_1 * 1/\text{edad en días}).$$

$$\text{Puntuación Residual (PR)} \rightarrow \text{PR} = \text{PDE} - \text{PP}.$$

*Puntuaciones Directas Empíricas (PDE)

-Test de Kolmogorv-Smirnov para asegurar la distribución normal de la muestra.

Con el objetivo de comprobar que las puntuaciones residuales se distribuyen según una distribución normal, se utilizó el test de Kolmogorv-Smirnov.

Una vez estudiados los aspectos determinados inicialmente, se procedió al estudio de la variabilidad de las puntuaciones directas (PD) de la MT entre los grupos utilizando las siguientes estrategias:

-Desviación estándar de las PD de MT y regresión lineal de este valor frente a la edad media para el estudio del cambio de la variabilidad interindividual absoluta durante el desarrollo.

Para analizar la variabilidad interindividual absoluta de los sujetos dentro de cada grupo, se calculó la desviación estándar (DS) de las puntuaciones directas de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central en cada grupo de edad, calculando posteriormente una regresión lineal de este último valor frente a la edad media de cada uno. Tras realizar los análisis, se observó en cada regresión de la DS un grupo de edad que podría clasificarse como atípico/outlier ($-2.8 < z < 2.8$), lo que corresponde a $p=0.005$ bilateral bajo la curva de probabilidad normal. Es por ello por lo que se repitieron las regresiones de las DS de las PD en cada grupo de edad eliminando el valor outlier en cada componente.

-Coeficiente de variación, cálculo de puntuaciones residuales y regresión lineal del CV y de las DS de las puntuaciones residuales para el estudio de la variabilidad interindividual relativa.

Inicialmente se realizó un estudio de las DS de las PD de MT, resultado que se vio afectado por la magnitud de los números. Es por ello por lo que, con el fin de reducir el efecto del valor absoluto del estudio de las puntuaciones directas de MT a través de la desviación estándar, se aplicaron dos procedimientos diferentes: el cálculo del coeficiente de variación ($CV=DS/media$) y el cálculo de las puntuaciones residuales en cada grupo de edad.

Con el cálculo de las puntuaciones residuales se pretendió obtener una medida de la variabilidad individual descartando el efecto de la maduración obteniendo la puntuación directa prevista de la edad, y sustrayendo los valores previstos de las puntuaciones directas empíricas. Los residuales de edad se obtuvieron de la regresión entre las puntuaciones directas de WMTB-C vs. edad, utilizando el modelo inverso.

Para determinar la posible relación de la variabilidad relativa entre grupos de edad con la edad en función de las puntuaciones directas residuales, se calculó la regresión lineal de la desviación estándar de las puntuaciones residuales de edad y del CV en cada grupo de edad, vs. la edad del grupo.

-Regresiones lineales de los residuos de edad y Análisis de Componentes Principales (ACP) para estudiar la Interdependencia de la variabilidad individual de las puntuaciones directas de WMTB-C a lo largo del desarrollo:

Se utilizaron dos estrategias diferentes para observar si un determinado sujeto que se encuentra adelantado o atrasado en una determinada puntuación directa de MT con respecto al valor esperado para su edad también se adelanta o atrasa en la medida de otro de los componentes. Los métodos empleados para ellos son las regresiones lineales de los residuos de edad, el Análisis de Componentes Principales ACP con rotación Varimax.

El uso de residuos de edad, obtenidos mediante un modelo inverso de la edad, permitió centrar el análisis en la variabilidad individual por encima o por debajo de los valores predichos para la edad del sujeto, reduciendo el impacto del factor edad que absorbería la mayor parte de la variabilidad de los datos.

Por otra parte, el ACP permitió además obtener un conjunto reducido de variables latentes que explican la varianza de las variables empíricas (Gorsuch, 1983). Se aplicó la rotación ortogonal Varimax a las variables introducidas en el ACP. La rotación Varimax, manteniendo la ortogonalidad entre componentes, facilita la interpretación de los resultados ya que rota los ejes para explicar la mayor proporción de variabilidad en un número reducido de componentes. El criterio seguido para decidir qué componentes se extraen fue el criterio de Kayser (valores propios > 1). Para interpretar el significado de los componentes extraídos, se tuvieron en cuenta los valores de los componentes de carga. El componente de carga representa la correlación entre las puntuaciones obtenidas por cada sujeto en cada componente del ACP frente a las puntuaciones empíricas de una determinada variable. Antes de realizar la ACP y las regresiones, se eliminaron los residuos que tenían un valor Z superior a 2,8 o inferior a -2,8 (1 caso para AV, 1 caso para EC). Para visualizar con mayor claridad la posible relación de variabilidad individual entre las distintas puntuaciones directas de la MT, tras sustraer el efecto de la edad, se realizó una regresión lineal entre los residuos de edad de las puntuaciones directas frente a la edad. Con este método sería posible observar si un sujeto que se encuentra avanzado o retrasado en el desarrollo de uno de los componentes de la MT, también lo estaría con respecto a otro.

Estudio III: Relación de la MT con la inteligencia. Análisis de esta relación en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA.

Para estudiar la relación existente entre la Memoria de Trabajo con la inteligencia tanto en sujetos en normodesarrollo (ND) como en sujetos que presentan Trastorno de Déficit de Atención (TDA), se llevan a cabo los siguientes análisis:

-ANOVAS univariados de MT y subtest de K-BIT para estudiar las diferencias de medias entre los grupos controles y TDA.

Para estudiar la diferencia de medias entre los grupos establecidos, se calcularon ANOVAS univariados para los componentes de la WMTB-C: Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central (BF, AV y EC) y para el subtest de Vocabulario y el subtest de Matrices del K-BIT. Los valores de p obtenidos se corrigieron para comparaciones múltiples usando la Tasa de Descubrimiento Falso TDF (Benjamini & Hochberg, 1995).

Se realizó una ANOVA adicional de las diferencias entre grupos de las PD de la MT, con las puntuaciones de K-bit como covariables. Lo que permitiría observar si las diferencias de MT pueden ser justificadas por los componentes de Vocabulario y Matrices.

- Regresiones lineales de las Puntuaciones Directas (PD) de los componentes de la MT, de las PD de K-BIT para estudiar la dependencia de la edad de los componentes de WMTB-C y K-BIT y en ambas muestras.

Se realizaron regresiones lineales de las puntuaciones directas de los componentes de la MT (Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central) y de las puntuaciones directas del K-BIT (Vocabulario y Matrices) con respecto a la edad medida en días. Dado que hubo 5 regresiones en cada grupo se corrigió para comparaciones múltiples usando la Tasa de Descubrimiento Falso (TDF).

-Correlaciones bivariadas de Spearman y correlaciones parciales controlando por edad entre las puntuaciones directas del WMTB-C y K-BIT.

Para estudiar una posible relación entre los componentes de la MT y los componentes de la inteligencia: verbal y matrices, se realizaron correlaciones bivariadas de Spearman entre las puntuaciones de cada una de las subpruebas. Además, se calcularon las mismas correlaciones teniendo en cuenta la edad como factor interviniente (correlaciones

parciales controlando por edad). Los valores de p obtenidos se corrigieron para comparaciones múltiples utilizando el TDF (Benjamini & Hochberg, 1995).

-Correlaciones por permutación sin reemplazo para comprobar la solidez de las correlaciones significativas obtenidas para las dos muestras: ND y TDA.

Dado el número dispar de sujetos en el ND (84 sujetos para WMTB-C y K-BIT) y TDA (36 sujetos para WMTB-C y 21 sujetos para K-BIT) se calcularon 10000 correlaciones seleccionando 17 sujetos por permutación sin reemplazo.

Este procedimiento permitiría eliminar los sesgos que aparecerían de la disparidad en números de sujetos en ambas muestras, sin descartar la información de ningún sujeto. Los valores de los sujetos seleccionados durante las permutaciones se seleccionaron a partir de los valores residuales de las regresiones de los componentes de MT y K-BIT en relación a la edad, para minimizar posibles diferencias de edad de los sujetos en ambas muestras. Este método de selección de sujetos permitió validar que las correlaciones no se vieran afectadas por el tamaño de la muestra y deben considerarse como altamente sólidas.

Capítulo III. Resultados

5. RESULTADOS

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los estudios llevados a cabo.

Estudio I: Orden de maduración de los componentes del modelo Multicomponente de Baddeley y Hitch (1992) durante el desarrollo.

Con el objetivo de estudiar la evolución de los componentes de la MT: Bucle Fonológico (BF), Agenda Visoespacial (AV) y Ejecutivo Central (EC), se calcularon regresiones lineales de las puntuaciones Z de los tres componentes con respecto a la variable edad (hasta los 15 años). Todas las regresiones fueron significativas ($p < 0,001$) (ver fig. 4), mostrándose claramente un aumento lineal de las puntuaciones Z con la edad para cada uno de los componentes en estos grupos de edad.

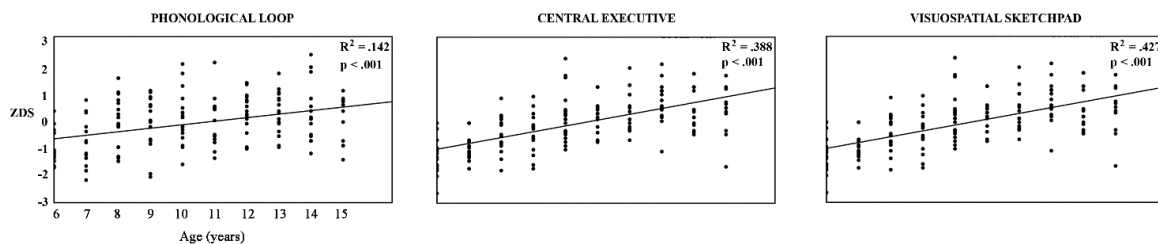


Figura 4. Regresiones lineales de las puntuaciones Z de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central frente al grupo de edad medido en años hasta los 15 años.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se procede a determinar el orden de maduración de los componentes de la MT estudiando previamente si las variables Edad y Género son factores determinantes. Se realiza para ello un ANOVA de dos factores, mostrando los resultados que la variable edad (medida en años) es significativa para los tres componentes de MT: BF ($F [7,241] = 12,87$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,272$ y potencia observada=1,000.; AV ($F [7,241] = 27,583$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,445$ y potencia observada=1,000 y EC ($F [7,241] = 34,267$, $p < 0,001$), $\eta^2 = 0,499$ y potencia observada=1,000. La figura 5 muestra el aumento del rendimiento de la MT con la edad para los componentes BF, AV y EC durante la infancia y la adolescencia, y la

estabilización de las puntuaciones directas durante la adultez emergente con el factor género significativo en AV ($F [1, 241] = 3,894, p < 0,05; \eta^2 = 0,016$ y potencia observada=0,5), y en EC ($F [1, 241] = 8,086, p < 0,005, \eta^2 = 0,032$ y potencia observada=0,8).

Los estadísticos descriptivos de las puntuaciones directas de los tres componentes de la MT considerando el grupo de edad y el género se muestran en la tabla 2. Las diferencias de género se debieron a puntuaciones directas ligeramente más altas en el género masculino en el EC y AV. No obstante, dado el pequeño o mediano tamaño de efecto de las diferencias de género, y para simplificar los análisis las comparaciones post-hoc de Bonferroni se realizaron sin tener en cuenta el factor género.

Tabla 3. *Estadísticos descriptivos de puntuaciones directas de Bucle Fonológico (BF), Agenda Visoespacial (AV) y Ejecutivo Central EC), para hombres y mujeres. Fuente: Elaboración propia.*

	1=MASCULINO				2=FEMENINO			
	Min	Max	Media	Dst	Min	Max	Media	Dst
BF	81	174	122,4	19.3	79	172	119,7	19.6
AV	27	72	53,64	9,7	29	75	51.89	9.7
EV	37	108	73.2	16	28	106	69,25	16,1

Finalmente, calculando Post-hoc de Bonferroni para las comparaciones de los grupos de edad, sin considerar el género, se obtuvieron las diferencias significativas entre los grupos de edad (ver tabla 2), lo que nos proporciona información sobre el orden de maduración de los tres componentes de la MT de manera más específica. El componente EC presenta el período más largo para madurar, mostrando diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de mayor edad hasta los 14-15 años, lo que implica que la maduración completa de este componente no finaliza hasta el período adolescente (ver figura 5 y tabla 3). Las puntuaciones directas de la AV muestran diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de mayor edad y el grupo de 10-11 años, pero no con los grupos mayores de 10-11 años. Las puntuaciones directas del BF alcanzaron su pico de madurez a la edad de 8-9 años debido a que este grupo de edad fue el de mayor edad mostrando diferencias estadísticamente significativas con los grupos de mayor edad.

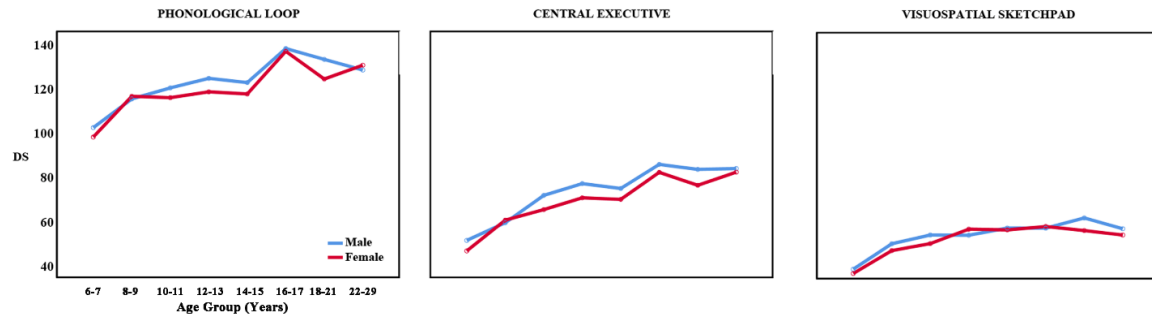


Figura 5. Puntuaciones directas del Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central respecto a los grupos de edad.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Significación estadística de las comparaciones entre grupos de edad utilizando las correcciones de Bonferroni para comparaciones múltiples. Fuente: Elaboración propia.

Bucle Fonológico

8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-21	22-29
.001	.001	.001	.001	.001	.001	.001
				.001	.001	.020
				.001		
				.022		
				.012		

Agenda Visoespacial

8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-21	22-29
.001	.001	.001	.001	.001	.001	.001
		.006	.001	.001	.001	.001
					.014	

Ejecutivo Central

8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-21	22-29
.001	.001	.001	.001	.001	.001	.001
		.001	.002	.001	.001	.001
				.001	.006	.001
				.016		.007

En los resultados obtenidos por los Post-hoc de Bonferroni se observa además un resultado peculiar en el grupo de 16-17 años, que presenta una diferencia significativa con todos los grupos de menor edad (ver figura 5 y tabla 3) en BF. Estos resultados representan que la capacidad de la memoria verbal aumenta en la edad de 16-17 años, con puntuaciones extremadamente altas en este grupo. En EC, el grupo de 16 a 17 años también mostró un aumento significativo en la puntuación directa, de manera similar a BF.

Una vez determinado el orden de maduración de los componentes de la MT, surge una nueva cuestión a resolver: ¿Cuál es la variabilidad intrínseca de las puntuaciones obtenidas por cada uno de los grupos establecidos?

Estudio II: Variabilidad intergrupala e interindividual en la MT durante el desarrollo.

En este momento nos planteamos por tanto un segundo estudio con el objetivo de investigar tanto la variabilidad interindividual absoluta como la relativa de los grupos de edad con respecto a la edad.

Inicialmente, para evaluar el incremento de las puntuaciones directas con la edad y validar el modelo de regresión más apropiado para explicar las puntuaciones directas de MT de los componentes de WMTB-C, se realizó una regresión de las puntuaciones de MT frente a la edad con diferentes modelos: lineal, logarítmico, inverso, cuadrático, cúbico, potencial, crecimiento y exponencial. La obtención del modelo de regresión más adecuado, no es sólo útil en sí mismo para conocer la trayectoria de desarrollo de los tres componentes de la MT, sino que será útil para el cálculo de residuales que serán utilizados para la determinación de la variabilidad relativa intergrupo de los componentes de la MT (ver abajo).

La mayoría de los modelos fueron significativos para las puntuaciones directas del WMTB-C (Tabla 4). Para elegir el mismo modelo de ajuste de todas las variables por motivos de simplicidad, se seleccionó el modelo inverso, ya que cumplía ambos criterios para las variables regresivas (Tabla 4).

Tabla 5. *Resumen de las estimaciones del modelo y los parámetros en las puntuaciones directas de las regresiones de la MT frente a la edad. Las variables dependientes fueron las puntuaciones directas del Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central. La variable independiente fue Edad medida en días. Fuente: Elaboración propia.*

Resumen del modelo y estimaciones de parámetros									
Bucle Fonológico									
Ecuación	Resumen Modelo					Estimaciones de parámetros			
	R ²	F	DF1	DF2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,16	50,16	1	255	p<0.001	101,57	,004		
Logarítmico	,20	63,74	1	255	p<0.001	-56,32	20,8		
Inverso	,22	72,39	1	255	p<0.001	142,67	-98585,3		
Cuadrático	,22	36,77	2	254	p<0.001	70,82	,016	-1,018E-6	
Cúbico	,22	24,77	3	253	p<0.001	54,96	,025	-2,762E-6	9,589E-11
Potencial	,21	68,34	1	255	p<0.001	26,59	,177		
Crecimiento	,17	52,97	1	255	p<0.001	4,61	3,031E-5		
Exponencial	,17	52,97	1	255	p<0.001	101,4	3,031E-5		

Resumen del modelo y estimaciones de parámetros									
Agenda Visoespacial									
Ecuación	Resumen Modelo					Estimaciones de parámetros			
	R ²	F	DF1	DF2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,21	71,02	1	255	p<0.001	41,53	,002		
Logarítmico	,30	110,00	1	255	p<0.001	-56,00	12,77		
Inverso	,37	151,00	1	255	p<0.001	66,72	-63847,17		
Cuadrático	,41	88,88	2	254	p<0.001	13,96	,013	-9,130E-7	
Cúbico	,42	63,07	3	253	p<0.001	-5,87	,025	-3,094E-6	1,200E-10
Potencial	,31	116,61	1	255	p<0.001	5,385	,266		
Crecimiento	,22	72,71	1	255	p<0.001	3,716	4,255E-5		
Exponencial	,22	72,71	1	255	p<0.001	41,098	4,255E-5		

Resumen del modelo y estimaciones de parámetros

Ejecutivo Central

Ecuación	Resumen Modelo					Estimaciones de parámetros			
	R ²	F	DF1	DF2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,37	151,96	1	255	p<0.001	46,86	,004		
Logarítmico	,43	199,25	1	255	p<0.001	-146,13	25,52		
Inverso	,47	226,90	1	255	p<0.001	97,25	-	119000,72	
Cuadrático	,47	112,68	2	254	p<0.001	14,61	,017	-1,068E-6	
Cúbico	,47	76,08	3	253	p<0.001	-2,03	,027	-2,898E-6	1,006E-10
Potencial	,45	214,82	1	255	p<0.001	2,57	,386		
Crecimiento	,38	156,10	1	255	p<0.001	3,87	6,704E-5		
Exponencial	,38	156,10	1	255	p<0.001	48,14	6,704E-5		

La figura 6 muestra las puntuaciones directas de WMTB-C frente a la edad utilizando un ajuste de modelo inverso.

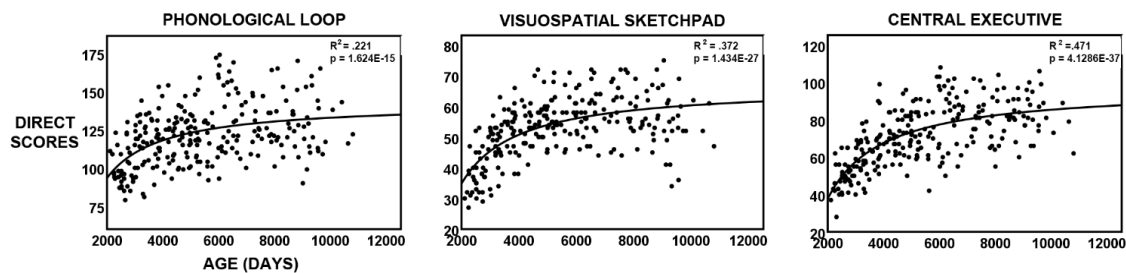


Figura 6. Regresión inversa de las puntuaciones directas de los componentes de la Memoria de Trabajo (Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central) versus Edad medida en días.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se realizaron regresiones lineales de las desviaciones estándar (DS) de las puntuaciones directas de los componentes de la MT con respecto a los grupos de edad para estudiar así la variabilidad absoluta de cada grupo de edad frente a la variable edad. Estas regresiones muestran únicamente diferencias estadísticamente significativas para el Bucle Fonológico en relación a la edad. Sin embargo, se muestra un valor atípico en las desviaciones estándar ($-2,8 < z < 2,8$, $p=0,005$ bilateral) utilizadas para las regresiones (fig. 7A-C), por lo que vuelven a realizarse las regresiones de las DS de las puntuaciones directas en relación a la edad una vez eliminados estos valores atípicos;

mostrándose entonces un aumento estadísticamente significativo de la desviación estándar de MT con la edad para los tres componentes (fig. 7D-E).

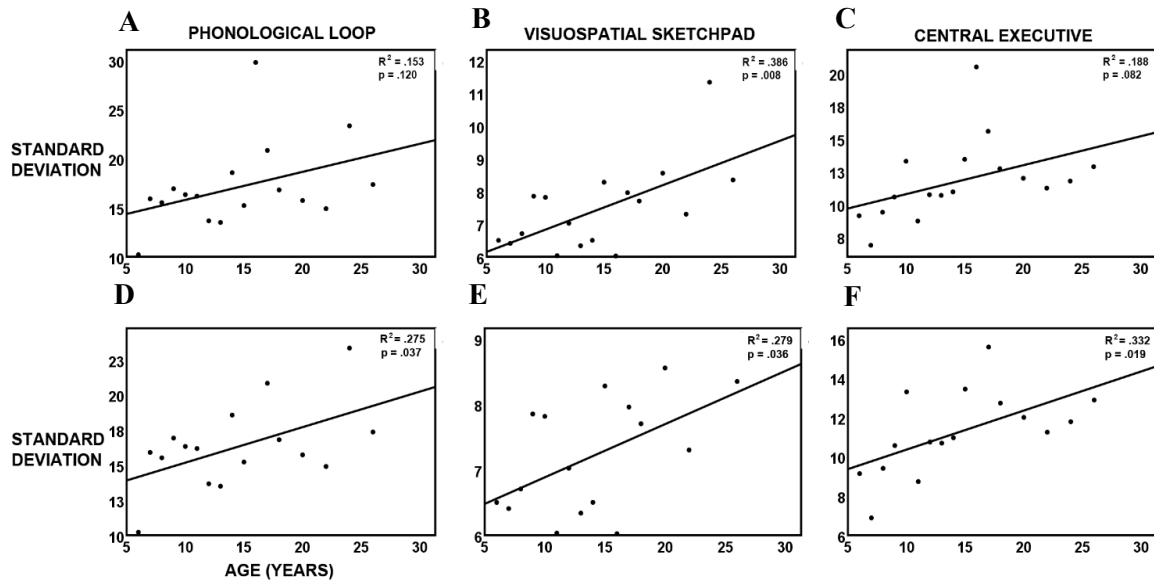


Figura 7. Regresiones lineales de las desviaciones estándar de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central vs. grupo de edad medida en años. Sin excluir (arriba) y excluyendo (abajo) los valores atípicos de la desviación estándar.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se procede a estudiar la variabilidad relativa de cada grupo de edad de MT descartando para ello el factor de edad como factor determinante. Se realizan para ello, regresiones lineales del Coeficiente de Variación de BF, AV y EC frente al grupo de edad, pero no se obtienen puntuaciones estadísticamente significativas. Es por tanto, por lo que se procede a realizar regresiones lineales de las DS de las puntuaciones residuales del WMTB-C para cada uno de los grupos de edad, obtenidos desde las trayectorias de desarrollo, pero los resultados obtenidos tampoco fueron significativos.

Finalmente, se busca estudiar si existe interdependencia de la variabilidad individual de las puntuaciones directas del WMTB-C a lo largo del desarrollo, por lo que se realiza un Análisis de Componentes Principales (ACP) con Rotación Varimax. De la aplicación del ACP se extrae un único componente de las PD de los residuales de edad obtenidas del WMTB-C. Los factores de carga y la varianza explicada aparecen en la

Tabla 5 indicando una mayor relación del componente extraído con el Ejecutivo Central y con el Bucle Fonológico, que con la Agenda Visoespacial.

Se realiza además una regresión lineal de los residuales de edad de los componentes de MT (Fig. 8A, 8B y 8C) para observar esta interdependencia, y se hace evidente que la relación más fuerte es la de Bucle Fonológico con los residuales de Ejecutivo Central (Fig. 8B), en comparación con las regresiones entre los residuales de edad de Bucle Fonológico y Agenda Visoespacial (Fig. 8A) y los residuales de edad de Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central. (Fig. 8C).

Tabla 6. *Componentes de carga y varianza explicada de los componentes extraídos después de aplicar ACP a los residuos de edad del WMTB-C (258 sujetos). Fuente: Elaboración propia.*

Componente de Matriz ^a	
	Componente
	1
Puntuaciones directas residuales del bucle fonológico	,842
Puntuaciones directas residuales de Agenda Visoespacial	,497
Puntuaciones directas residuales de Ejecutivo Central	,882

Varianza explicada: 57.84%

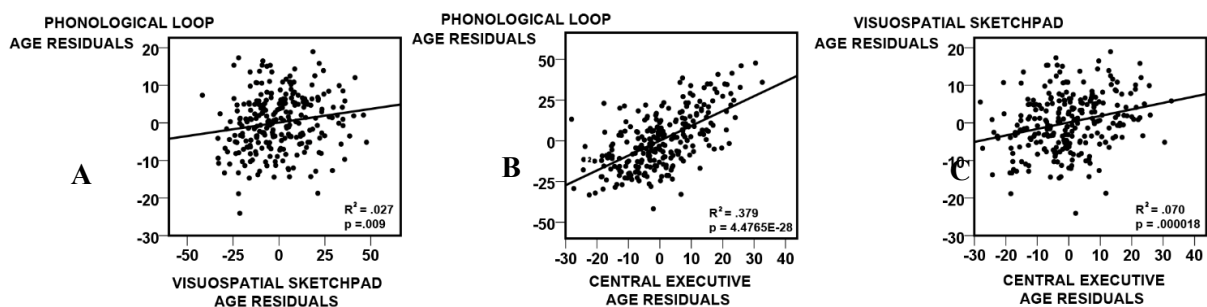


Figura 8.tabla 4 *Regresión lineal de las puntuaciones residuales de edad de los componentes de la Memoria de Trabajo.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Estudio III: Relación de la MT con la inteligencia. Análisis de esta relación en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA.

Una vez estudiados de manera detallada tanto el orden de maduración de los componentes de la MT como el propio desarrollo intrínseco de cada componente en cada grupo de edad, surge una nueva incógnita: ¿Existe relación entre la Memoria de Trabajo y la Inteligencia en sujetos en normodesarrollo? y ¿existe diferencia entre la relación de la MT con la Inteligencia en sujetos en normodesarrollo (ND) con respecto a sujetos diagnosticados con TDA?.

Para ello se procede a estudiar la existencia de relación entre la MT y la Inteligencia en dos muestras diferentes: una de sujetos en normodesarrollo (ND) y otra con sujetos diagnosticados con TDA (Trastorno de Déficit de Atención e Hiperactividad).

Inicialmente, se pretende estudiar la diferencia de medias entre los grupos participantes realizando ANOVAS univariados, con género y edad como covariables, y corregidas posteriormente con la Tasa de Descubrimiento Falso (TDF) entre las puntuaciones directas de los componentes de la MT y las puntuaciones directas de los subtest de K-BIT (Matrices y Vocabulario). Estos análisis mostraron diferencias significativas entre los componentes de MT: BF ($F(1,116)=15.64$; $p<0.001$, $\eta^2=.119$), AV ($F(1,116)=6.49$; $p=.012$, $\eta^2=.053$), EC ($F(1,116)=28.08$; $p<.007$, $\eta^2=.195$), Los subtest de K-BIT: Matrices ($F(1,101)=43.21$; $<.001$, $\eta^2=.300$), y Vocabulario ($F(1,101)=25.62$ $p<.001$, $\eta^2=.202$). En estas cinco variables de puntuaciones directas, los sujetos en ND obtuvieron puntuaciones más altas que los sujetos de la muestra diagnosticada con TDA.

Se realizó además un ANOVA adicional para comparar las puntuaciones directas de MT de ambas muestras con las puntuaciones directas de Matrices, utilizando Vocabulario y Matrices de K-BIT como covariables, y mostró que solo el EC fue estadísticamente significativo después de la corrección TDF ($F(1,99)=7.55$, $p=.021$, $\eta^2=.071$). Indicando que los efectos de grupo previamente descritos pueden estar en parte mediados por las PD de K-BIT.

Por otro lado, las puntuaciones directas de K-BIT y MT se correlacionaron a través de correlaciones de Spearman con las puntuaciones obtenidas en el cuestionario DuPaul para impulsividad e inatención, pero no se obtuvieron correlaciones significativas.

A continuación, para estudiar si existe dependencia de la MT y de la Inteligencia con la edad en ambas muestras, se calcularon regresiones lineales de las puntuaciones directas de los tres componentes de la MT y los dos subtest del K-BIT con respecto a la

edad (medida en días). Todas las regresiones lineales fueron significativas (Ver Fig. 9 y Fig. 10) para los sujetos en normodesarrollo, mientras que para TDA todas las regresiones fueron significativas excepto para el Bucle Fonológico. En todos los casos significativos hubo un incremento de las puntuaciones directas con la edad. Los valores de p obtenidos se corrigieron para comparaciones múltiples usando TDF.

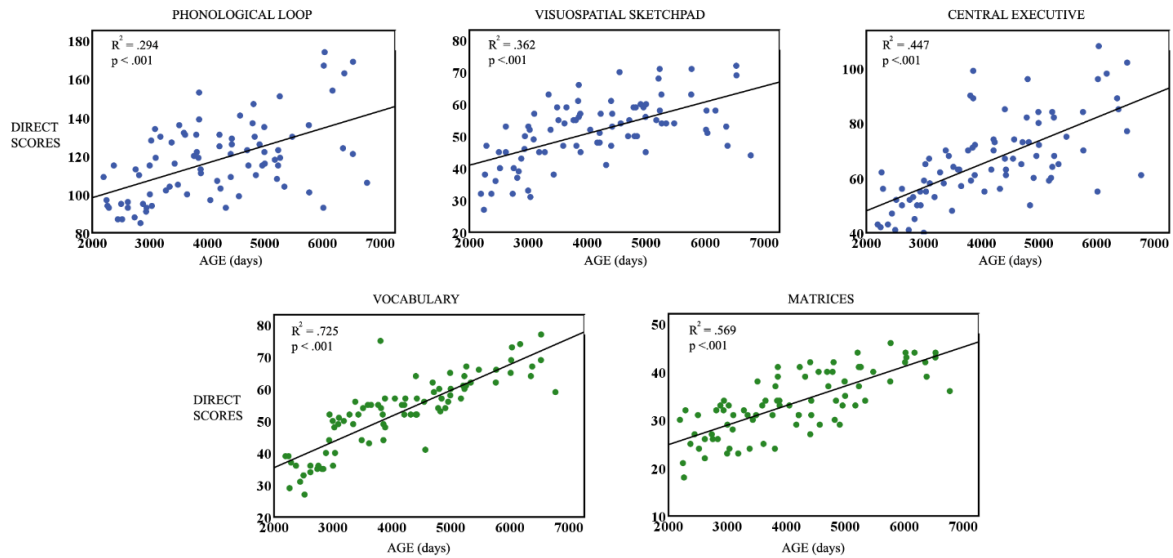


Figura 9. Muestra del grupo de ND: Regresiones lineales de las puntuaciones directas de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial, Ejecutivo Central (componentes MT), Vocabulario y Matrices (subtest del K-BIT) frente al grupo de edad medido en días.

Fuente: Elaboración propia.

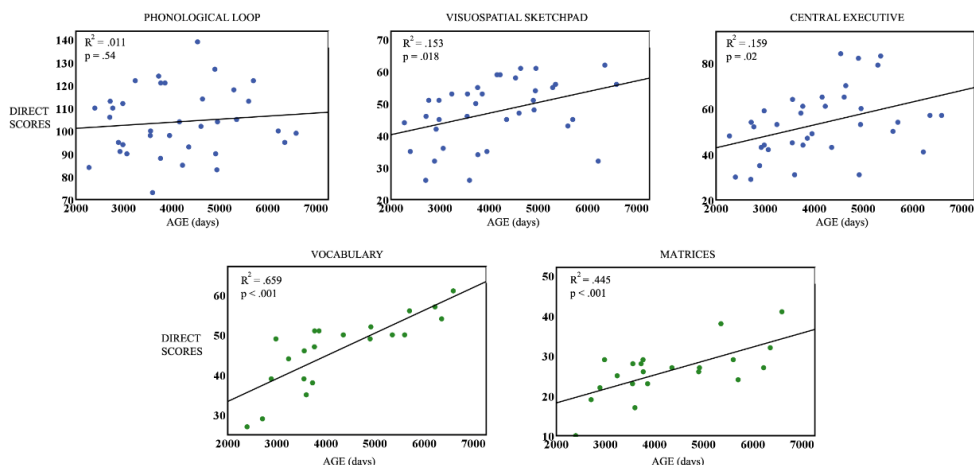


Figura 10. Grupo con diagnóstico de TDA: *Regresiones lineales de las puntuaciones directas de Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial, Ejecutivo Central (componentes MT), Vocabulario y Matrices (subtest del K-BIT) frente a la de edad medida en días.*

Fuente: Elaboración propia.

Una vez detectado que sí existe dependencia entre la MT y la Inteligencia, con respecto a la edad, procedemos a estudiar cómo es la relación entre los componentes de MT y K-BIT por medio de correlaciones Spearman, sin controlar y controlando por la edad. Para ello realizamos correlaciones bivariadas de Spearman entre las puntuaciones directas de cada una de las subpruebas de WMTB-C y K-BIT en ambas muestras (ver tabla 6). Para la muestra de sujetos en ND, todas las correlaciones fueron significativas una vez corregidas con TDF (ver tabla 6). Los resultados obtenidos para la muestra de sujetos que presentan TDA mostraron una correlación estadísticamente significativa entre EC-BF; EC-AV; Matrices-EC; AV-Matrices y Matrices-Vocabulario.

Tabla 7. *Correlaciones de Spearman entre las puntuaciones directas de cada una de las subpruebas de K-BIT y WMTB-C en sujetos con normodesarrollo (ND) y TDA. Las puntuaciones directas de las subpruebas de Vocabulario y Matrices del K-BIT también se indican en la tabla. Los valores de p se corrigieron usando la TDF. Con asterisco los valores p significativos. Fuente: Elaboración propia.*

Variables correlacionadas	ND			TDA		
	R	p	N	R	p	N
MT EC/BF	.753	<.001*	84	.389	.038*	36
MT EC/AV	.581	<.001*	84	.797	<.001*	36
MT EC/KBIT Matrices	.612	<.001*	84	.644	.005*	21
MT EC/KBIT Vocabulario	.669	<.001*	84	.261	.361	21
MT BF/MT AV	.430	<.001*	84	.162	.432	36

MT BF/KBIT Matrices	.384	<.001*	84	-.147	.583	21
MT BF/KBIT Vocabulario	.503	<.001*	84	-.001	.997	21
MT AV/KBIT Matrices	.587	<.001*	84	.651	.005*	21
MT AV/KBIT Vocabulario	.545	<.001*	84	.349	.201	21
KBIT Matrices/KBIT Vocabulario	.706	<.001*	84	.542	.028*	21

Una vez realizados los análisis, se pretende descartar la edad como factor determinante en la posible correlación entre los componentes de la MT y los componentes de la Inteligencia tal como se miden con el K-BIT, por lo que se computan correlaciones parciales entre las puntuaciones directas de las subpruebas controlando por la variable edad (medida en días) (ver tabla 7). Para los sujetos en ND, se obtuvieron correlaciones significativas entre EC-BF, EC-AV, BF-Vocabulario, AV-Matrices y Vocabulario-Matrices. Para los sujetos que muestran TDA se obtuvieron correlaciones significativas entre EC-AV y AV-Matrices.

Tabla 8. *Correlaciones parciales (controlando por edad) entre las puntuaciones de cada una de las subpruebas de K-BIT y WMTB-C en sujetos en normodesarrollo (ND) y TDA. Las puntuaciones directas de las subpruebas de Vocabulario y Matrices del K-BIT también se indican en la tabla. Los valores de p se corrigieron usando la TDF. Con asterisco los valores p significativos. Fuente: Elaboración propia.*

Variables correlacionadas	ND			ADHD		
	R	p	N	R	p	N
MT EC/BF	.613	<.001*	84	.368	.066	36
MT EC/AV	.248	.048*	84	.735	.033*	36
MT EC/KBIT Vocabulario	.220	.063	84	.317	.231	21
MT EC/KBIT Matrices	.221	.063	84	.509	.061	21
MT BF/MT AV	.101	.403	84	.177	.376	36
MT BF/KBIT Vocabulario	.277	.035*	84	-.044	.849	21
MT BF/KBIT Matrices	.055	.620	84	-.178	.489	21
MT AV/KBIT Vocabulario	.175	.138	84	.353	.194	21
MT AV/KBIT Matrices	.335	.009*	84	.551	.048*	21

Finalmente, para comprobar la solidez de las correlaciones significativas obtenidas y tratar de calcular las correlaciones con el mismo número de sujetos en ND y TDA, se seleccionaron 17 sujetos de cada muestra sin reemplazo y se correlacionaron 10.000 veces. La fig.11 muestra el histograma de valores p para cada correlación.

Para la muestra de sujetos en ND se observó que solo la correlación entre EC-BF era la correlación más significativa entre los sujetos, mientras que para la muestra de sujetos que presentan TDA, EC-AV y AV-Matrices fueron muy altamente significativos.

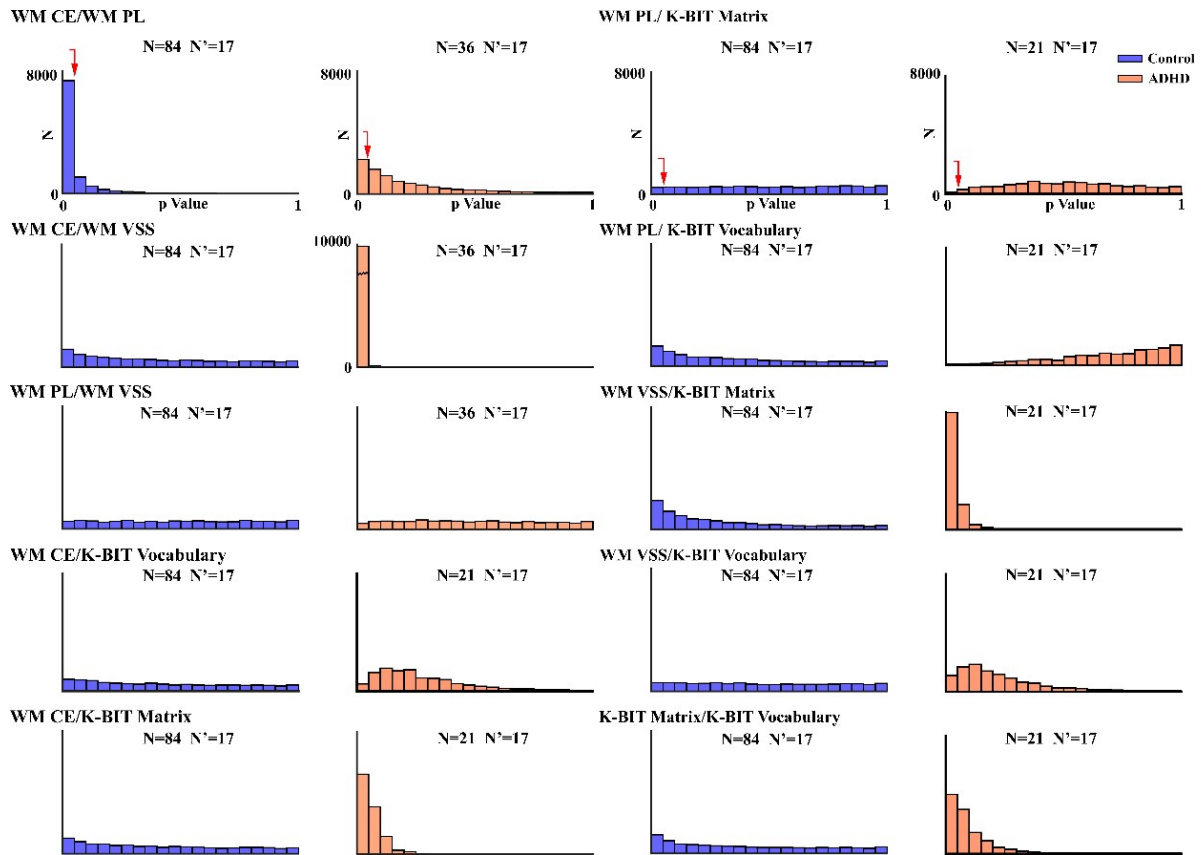


Figura 11. Valores de probabilidad de error tipo 1 (alfa) obtenidos en las correlaciones de Spearman para los componentes de MT y K-BIT, para 17 sujetos seleccionados de 10000 permutaciones sin reemplazo. N: número de sujetos de la muestra original, N': número de sujetos seleccionados para correlaciones a partir de permutaciones. La flecha roja indica el valor $p=0,05$.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV. Discusión de los resultados

6. DISCUSIÓN

Estudio I: Orden de maduración de los componente del modelo Multicomponente de Baddeley y Hitch (1992) durante el desarrollo.

El estudio inicial realizado para estudiar el orden de maduración de los componentes de la MT tuvo un objetivo, analizar el orden de maduración de los tres componentes de la MT que componen el modelo multicomponente de la MT (BF, AV, EC), mediante comparaciones de Bonferroni entre las puntuaciones directas de los distintos grupos de edad.

Las comparaciones tipo Bonferroni permitirían definir a qué edad se nivelarían las puntuaciones directas de la MT. Las puntuaciones directas del BF (memoria verbal) se estabilizan en el grupo de edad de 8-9 (a excepción del grupo de 16-17 que corresponde a una situación atípica comentada a continuación). Este último resultado coincide con la estabilización en el grupo de edad de 10-11 años obtenida por Alloway y cols. (2006). Por otra parte, la AV alcanza la estabilidad alrededor de los 11 años y finalmente el componente ejecutivo es el último en madurar alcanzando la estabilidad alrededor de los 14-15 años. Estos resultados obtenidos con respecto al orden de maduración de los componentes de la MT contradicen lo expresado en el estudio de Gathercole y cols. (2004) donde expone que el orden de maduración de los tres componentes de la MT es similar, probablemente debido a que el rango de edad seleccionado por estas autoras terminaba en 15 años, y porque utilizaron puntuaciones Z.

La maduración tardía del componente EC obtenida en el presente estudio podría deberse a la maduración más lenta de la corteza prefrontal, ya que la maduración de las regiones anteriores como la corteza prefrontal comienza en la niñez, pero continúa hasta la adolescencia y la edad adulta (Luna y cols., 2010), y que las actividades relacionadas con las funciones ejecutivas están relacionadas con una variedad de áreas dentro de los lóbulos frontales (Manoach y cols., 1997, Collette y Van der Linden, 2002).

La corteza prefrontal se divide en tres partes: corteza prefrontal dorsolateral, corteza prefrontal media y corteza orbitofrontal (Fuster, 2002), y es en gran parte responsable de las funciones ejecutivas porque envía y recibe información a través de los

sistemas cognitivos, sensoriales y motores. En cuanto a la relación de la corteza prefrontal con la memoria de trabajo, la corteza prefrontal dorsolateral es la encargada de influir en las actividades relacionadas con la planificación, resolución de problemas, memoria de trabajo, etc. (Casey y cols., 1997; Diamond, 2002; Fuster, 2002; Hoshi & Tanij, 2004; Konishi y cols., 2002). Durante la niñez hay un desarrollo acelerado de las funciones ejecutivas que no se considera lineal, sino que tiene etapas debido a los cambios funcionales y estructurales del sistema nervioso central (Diamond, 2001), continuando su desarrollo hasta la tercera década de la vida (Tsujiyamoto, 2008), siendo así la corteza prefrontal junto con la región supralímbica las últimas en completar su desarrollo (Lenroot & Giedd, 2006). Por tanto, la maduración prolongada de la corteza prefrontal determinaría la maduración tardía del Ejecutivo Central.

Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron una anomalía en los resultados para el grupo de edad de 16 y 17 años, grupo que muestra un aumento notable en las puntuaciones del BF. La razón de este resultado en particular no está clara y podría deberse al reclutamiento de un grupo de sujetos brillantes realizado de manera no completamente aleatoria para este grupo de edad, o quizás debido a un efecto genuino. Sería necesario un tamaño de muestra mayor para resolver esta anomalía. En cualquier caso, la hipótesis más plausible es la de una maduración muy temprana del BF, dado que las puntuaciones directas del BF de los grupos de más edad ya no son estadísticamente significativamente a partir del grupo de edad de 10-11 años (salvo en el mencionado grupo 16-17 años), resultado también obtenido para la memoria verbal a corto plazo por Alloway y cols., (2006). Además, desde el punto de vista de los modelos de MT, se ha propuesto que el desarrollo del BF supone un soporte para la recodificación que mejoraría el rendimiento de cualquier otro tipo de MT por lo que su maduración debe preceder a la de cualquier otro componente (Gathercole y cols., 2004).

Finalmente, se observan diferencias de género poco significativas para la AV y el EC, en las que los sujetos de género masculino mostraron un mayor rendimiento en comparación con los sujetos de género femenino.

Dada la pequeña amplitud de estos efectos de género y que esta influencia de género no ha sido replicada por otros estudios similares con muestras más grandes (Alloway y cols., 2006), o solo en algunas subpruebas (Gathercole y cols., 2004), las diferencias de género obtenidas en esta investigación deben considerarse cautelosamente.

Limitaciones: El resultado peculiar del grupo de edad de 16 a 17 años podría deberse a un muestreo sesgado o a una verdadera explosión de rendimiento de MT en esta edad. Por lo tanto, sería necesario un estudio de replicación para confirmar o rechazar dicho resultado.

Estudio II: Variabilidad intergrupala e interindividual en la MT durante el desarrollo.

A continuación, se marcaron otros dos nuevos objetivos para estudiar la interdependencia de las diferencias individuales del desarrollo de los componentes de la MT. El primer objetivo pretendía estudiar si la variabilidad de las puntuaciones directas de la MT difiere en los distintos grupos de edad y el segundo, estudiar una posible relación de interdependencia en el desarrollo de los componentes de la MT. Para el primer objetivo: determinar si existen o no diferencias individuales intergrupales de las puntuaciones directas de los componentes de la MT obtenidas a través del WMTB-C en diferentes grupos de edad, los principales hallazgos fueron: (i) la variabilidad absoluta de las puntuaciones directas de MT aumenta con la edad de los grupos y (ii) la variabilidad relativa no aumenta con la edad del grupo. Para lograr este último objetivo, fue necesario demostrar previamente que el aumento de las puntuaciones directas de MT en relación a la edad estaba regido por una relación inversa, de modo que existe un mayor aumento de las capacidades de MT en los niños más pequeños con respecto a los adolescentes. Esto último fue necesario para poder calcular los residuales de la MT con respecto a la edad. Para el segundo objetivo, la variabilidad del desarrollo individual mostró una fuerte relación entre EC con BF, mientras que la relación entre EC y AV, y la relación entre BF y AV fue menor.

Se obtuvo que hay un aumento en la variabilidad absoluta intergrupala de la MT en relación a la edad, probablemente debido a un efecto indirecto del aumento de magnitud de las puntuaciones directas con la edad, mientras que hay una estabilización de la variabilidad relativa, una vez que las puntuaciones directas dejan de ser tan grandes. La constancia de la variabilidad relativa entre edades garantizaría la misma variabilidad efectiva en cada grupo de edad con el mismo nivel de competencia interindividual en los diferentes grupos de edad.

La variabilidad relativa estable de la MT a través de las edades implica una variabilidad similar en la competencia de la MT que replicaría en el nicho ecológico de los niños la situación ecológica de los adultos con respecto a la capacidad de la MT. Poniendo un símil económico, es como si los niños más pequeños jugaran con céntimos (por ej. Cantidades entre 5 y 10 céntimos) , y los mayores en euros (entre 5 y 10 euros), pero manteniendo la misma variabilidad relativa en las cantidades con las que juegan. El mecanismo regulador de esta variabilidad (evolutiva, social, cultural, etc.) requeriría más investigación. Aunque la variabilidad absoluta en los grupos de edad se estudia comúnmente a través de pruebas psicométricas de MT (Gathercole y Pickering, 2001; Rosselli-Cock y cols., 2004), no se dedica ningún esfuerzo adicional a la exploración de las posibles diferencias en la variabilidad absoluta y relativa entre grupos de edad. Sin embargo, en las tareas computarizadas, la variabilidad intergrupala en los grupos de edad muestra una disminución en la variabilidad absoluta del número de errores con el aumento de la edad en una variedad de diferentes tipos de tareas computarizadas (Rojas-Benjumea at al., 2013; Luna y cols. 2004; Mondloch y cols., 2003), aunque no se estudia explícitamente la variabilidad intergrupala de edad absoluta ni relativa, a excepción del estudio de Rojas-Benjumea (2013) que mostró un aumento significativo de la variabilidad de los errores absolutos en los niños con respecto a los adolescentes.

Las posibles diferencias en la variabilidad absoluta y relativa del rendimiento entre edades en tareas psicométricas e informatizadas deben estudiarse más a fondo dada la importancia ya indicada para definir el rango de capacidades de procesamiento de población de los sujetos a diferentes edades. El rango de capacidades de procesamiento cognitivo es importante para nichos sociales de particular importancia como el aula.

En cuanto al estudio del segundo objetivo: estudiar una posible relación de interdependencia en el desarrollo de los componentes de la MT, el Análisis de Componentes Principales (ACP) replica los resultados obtenidos anteriormente por Gathercole y cols., (2004), mostrando que el EC y el BF presentan una relación más estrecha que EC con AV y BF con AV. Esta conclusión no solo está respaldada por los resultados obtenidos en el ACP que vincula estrechamente EC con BF, sino también por las regresiones realizadas a las puntuaciones residuales, que mostraron claramente que un sujeto avanzado o retrasado en el desarrollo de EC, lo estará a su vez de la misma forma en el desarrollo de BF.

Por otra parte, la relativa independencia del desarrollo de AV y BF confirma los resultados previos obtenidos en niños y preadolescentes (Gathercole y Pickering 2000, Jarvis y Gathercole 2003; Gathercole y Pickering, 2004).

Sin embargo, la relación de desarrollo significativa entre todos los componentes de la MT sugiere, como lo indica el único componente obtenido a través del ACP, que la independencia de desarrollo de AV es solo relativa y que existe un factor común subyacente al desarrollo de los componentes de MT, incluido la AV, cuyas puntuaciones se obtuvieron a partir de subtests en los que se sigue un diseño riguroso para evitar una recodificación verbal que surge naturalmente en los niños (Gathercole y Hitch 1993, Hitch y Halliday 1983; Hitch, Halliday, Schaafstal y Schraagen, 1988).

Estudio III: Relación de la MT con la inteligencia. Análisis de esta relación en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA.

Aunque no se especificó como un objetivo, los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las puntuaciones directas de los sujetos con ND y con diagnóstico de TDA en las medidas de MT y K-BIT. Esto respalda resultados obtenidos anteriormente que indican un peor desempeño de la MT de los niños que presentan TDA (Rapport y cols., 2008) y la inteligencia general (Mackenzie y Wonders, 2016). Cuando se controla estadísticamente (covariable en el ANOVA) por puntuaciones directas de K-BIT, solo el EC es estadísticamente significativo, lo que respalda que el TDA presenta rasgos de un síndrome disejecutivo (Rapport y cols., 2008).

El objetivo de esta última parte de la investigación es mostrar si existe una relación entre la MT medida con WMTB-C y la inteligencia general medida con K-BIT durante el desarrollo, en dos muestras diferentes: sujetos con ND y sujetos diagnosticados con TDA. Inicialmente, las hipótesis estudiadas fueron que el componente EC de la MT estaría relacionado con las puntuaciones directas de las escalas de Matrices y Vocabulario del K-BIT, mientras que la AV estaría relacionada con la escala de Matrices, y el BF estaría relacionado con la escala de Vocabulario.

Estas relaciones estarían más asociadas funcionalmente una vez descontado el componente de edad, dado que se eliminaría el factor común de maduración. Los resultados obtenidos en la muestra de sujetos con ND muestran que se establecieron

correlaciones significativas entre BF con Vocabulario y AV con Matrices como se predijo, y se obtuvo una significación estadística para EC con Vocabulario y Matrices (corregido con TDF). Estos resultados sugieren que la MT también está relacionada con otras funciones cognitivas, como la inteligencia. Hallazgos previos parecen mostrar que el almacén a corto plazo es el principal responsable de la relación entre Inteligencia y MT, y se descartan otros procesos cognitivos como principales protagonistas, como la atención (Colom y cols., 2008). Estos hallazgos fueron respaldados tras estudiar la relación entre tres tipos de inteligencia (general, fluida y cristalizada) con cuatro funciones cognitivas (atención, velocidad de procesamiento, almacenamiento a corto plazo y MT). Tourva y cols., (2016) desarrollaron un estudio para analizar la posible relación entre inteligencia y velocidad de procesamiento, atención y MT. Demostraron que existe una relación estadísticamente significativa entre MT y la inteligencia general, pero no con la atención y la velocidad de procesamiento. La fuerte relación entre MT e inteligencia ha sido documentada en otras ocasiones (Swanson & Alloway, 2012).

Las correlaciones obtenidas en esta investigación respaldan tal afirmación, agregando un cierto aspecto modular dado el patrón de correlación obtenido entre MT y K-BIT (EC-Matrices; EC-Vocabulary, BF-Vocabulary y AV-Matrices). Más recientemente, se ha descubierto el papel de MT como mediador entre el desarrollo de la materia blanca y la inteligencia fluida, pero también incluye la velocidad de procesamiento como mediador adicional (Fuhrmann y cols., 2020). La influencia de la MT en las funciones cognitivas superiores va más allá de su relación con la inteligencia general aunque mediada por la inteligencia. Las investigaciones en este campo han demostrado importancia de la MT en procesos escolares, como el rendimiento matemático (Lee & Bull, 2016; Passolunghi & Costa, 2019; Raghubar y cols., 2010) y la comprensión lectora (Carretti y cols., 2009; Peng y cols., 2018). Además, en sujetos en ND se obtuvo una correlación positiva entre los componentes de MT (EC-BF y EC-AV). Gathercole y cols. (2004), que mostraron un desarrollo independiente de los componentes, aunque se obtuvo una relación más íntima entre EC-BF que EC-AV.

Los resultados presentes también mostraron que existe una relación estadísticamente significativa entre los componentes de MT, aunque EC y BF presentaron una relación mayor que EC con AV, como se demostró previamente con una muestra mucho más grande (Gathercole y cols., 2004; Muñoz-Pradas, estudio 1 de esta tesis).

En cuanto al grupo diagnosticado con TDA, no solo presentó puntuaciones más bajas de MT y de inteligencia como se ha descrito previamente (Holmes y cols., 2010; Rapport y cols., 2008), sino que se ha demostrado una íntima relación entre inteligencia y MT, dado que considerando la inteligencia como variable determinante, desaparecen las diferencias en el rendimiento de MT para BF y AV entre sujetos con ND y sujetos diagnosticados con TDA, y no para el EC.

El patrón de correlación obtenido en la muestra de TDA es muy diferente al de ND, debido al sesgo de correlaciones significativas positivas del componente ejecutivo con lo Visoespacial tanto en K-BIT como en MT. Se obtuvieron correlaciones significativas, controlando por edad y corregidas con TDF, en CE-AV y AV-Matrices. Curiosamente en cuanto a la relación entre MT e inteligencia, solo la subprueba Matrices fue claramente predicha por las mediciones de MT a través de la AV. Este resultado sugeriría que la inteligencia fluida (medida por el subtest de Matrices) estaría más conectada a los componentes de MT, que la inteligencia cristalizada (medida por el subtest de Vocabulario) en el grupo con diagnóstico de TDA (Pitts & Mervis, 2016). Estos resultados sugieren que el patrón ya descrito en ND de una alta relación entre EC y BF decrece en niños con diagnóstico de TDA, y también con las medidas de Vocabulario (K-BIT). Esto podría deberse a un mayor deterioro de la integración funcional del hemisferio izquierdo en el TDA con respecto al ND. De hecho, ya se ha demostrado la posibilidad de que el nivel de inteligencia y el rendimiento en MT no estén directamente asociados con el TDA (Cornoldi y cols., 2013). Sin embargo, parte de las diferencias entre el TDA y el ND se podría deber a los diferentes tamaños de muestra de ambos grupos, por lo que el análisis de permutación permitió probar la robustez de estas correlaciones con una muestra pequeña igual para todos los grupos y pruebas.

El análisis de permutación con una pequeña colección de submuestras remuestreadas mostró un patrón muy sólido de correlaciones en MT EC-BF en ND, y por otro lado entre EC-AV y AV-Matrices en TDA. Este resultado apoya un patrón diferente de interrelaciones entre los procesos cognitivos en ND y TDA, más sesgado al control verbal en ND y visualmente sesgado en TDA. La pequeña muestra registrada en el grupo con diagnóstico de TDA sugiere que aunque el análisis de permutación indica que el modo de procesamiento visualmente sesgado en el TDA parece ser muy sólido en términos estadísticos, se necesitaría una muestra mayor para confirmar los resultados actuales. Cabe indicar que la falta de robustez que se presenta en las correlaciones del

grupo de ND no significa que dichas correlaciones no estén presentes cuando se analiza una muestra mayor, debido a que cuando se tiene una mayor potencia estadística gracias a considerar la muestra ND completa, tal como se describe en las Tablas 6 y 7, aparecen relaciones más estrechas entre MT e inteligencia.

En resumen, los resultados mostraron en las correlaciones de ND que las dos subescalas de inteligencia, Vocabulario y Matrices, estaban relacionadas con BF y AV, respectivamente, lo que sugiere un patrón modular específico en la relación de MT con inteligencia. Sin embargo, para el grupo diagnosticado con TDA, el patrón de relación entre MT e inteligencia (medido con K-BIT) se limitó a la relación del EC con la AV y la AV con las Matrices, lo que sugiere un papel más fundamental para la información visual durante el procesamiento cognitivo. Sin embargo, los resultados del grupo diagnosticado con TDA deben tomarse con mucha cautela dado el pequeño tamaño de la muestra de este grupo.

Una limitación importante detectada durante la realización de esta investigación es el amplio rango de edad de los sujetos, debido más a limitaciones de reclutamiento que a consideraciones teóricas, dado que las diferencias de edad influyen en la direccionalidad causal existente entre BF vs Vocabulario (Gathercole y cols., 1992). Sin embargo, la relación lineal entre la mayoría de las medidas cognitivas y la edad obtenida en este trabajo sugiere que, aunque ocurrirían cambios temporales en el nivel de relación entre las variables cognitivas, no pueden considerarse suficientes para invalidar las conclusiones obtenidas en ambos grupos de sujetos.

A modo de discusión general, se concluye este estudio afirmando que el orden de maduración de los componentes de la Memoria de Trabajo está directamente relacionado con la edad de los sujetos, y que éstos maduran en un orden diferente, siendo el Ejecutivo Central el último en hacerlo debido a la maduración tardía de la corteza prefrontal.

Por otra parte se determina que la variabilidad intergrupala absoluta aumenta con la edad, y la relativa se mantiene estable. Tras este hallazgo se investigó la posible relación existente entre el desarrollo de los componentes de la Memoria de Trabajo, se llegó a la conclusión de que sí existe una relación entre la maduración de los distintos componentes de la MT, por lo que un sujeto avanzado o retrasado en el

desarrollo de alguno lo estará a su vez en el otro, siendo esto especialmente válido en la relación ente EC y BF.

Finalmente, tras la investigación realizada se concluye además que la Memoria de Trabajo está relacionada con otros procesos cognitivos, entre ellos la Inteligencia, tanto en sujetos con ND como en sujetos diagnosticados con TDA, existiendo una mayor relación entre los componentes de la MT en sujetos con normodesarrollo y entre los componentes de la MT y de la Inteligencia en sujetos con diagnóstico de TDA. Además, se determina que existe un patrón modular de relación entre la Memoria de Trabajo y la Inteligencia en sujetos en normodesarrollo pero que es la información visual la que muestra un papel más fundamental durante el procesamiento cognitivo.

Es por la linealidad y coherencia de todos los hallazgos obtenidos, producto de las inquietudes del equipo de investigación por lo que este trabajo cobra sentido, llegando además a proporcionar conocimientos relevantes para los docentes, quienes pudiendo entender cómo funciona la Memoria de Trabajo, en qué orden se desarrollan sus componentes, las diferencias de variabilidad entre cada uno de sus alumnos y la relación de ésta con el constructo de la Inteligencia puedan desarrollar una metodología didáctica que se adapte a las necesidades individuales del alumnado, garantizando así una educación inclusiva que potencie el desarrollo integral del niño.

Capítulo V. Conclusiones

7. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas tras la realización de esta investigación sobre Memoria de Trabajo, el orden de maduración de sus componentes, la interdependencia de las diferencias individuales del desarrollo de sus componentes y la relación de la MT con la inteligencia en sujetos en normodesarrollo y diagnosticados con TDA se concretan en:

En relación al orden de maduración de los componentes de la Memoria de Trabajo:

I- Existe una relación lineal entre las puntuaciones de MT con respecto a la edad en años, por lo que se demuestra que los sujetos alcanzarán mayores puntuaciones a medida que aumente su edad.

II- Los componentes de la MT (Bucle Fonológico, Agenda Visoespacial y Ejecutivo Central) maduran en un orden diferente.

III- El Bucle Fonológico es el componente que madura de manera más temprana, a continuación la Agenda Visoespacial y finalmente, el Ejecutivo Central es el componente de la MT que tarda más en madurar, posiblemente debido a la maduración tardía de la corteza prefrontal, cuyas áreas se relacionan directamente con las tareas ejecutivas.

En relación a la interdependencia de las diferencias individuales del desarrollo de sus componentes:

Complementariamente al punto anterior, se obtuvo que la capacidad de la MT crece de forma acelerada en la primera infancia, desacelerando su crecimiento en la adolescencia, siguiendo una trayectoria de desarrollo regida por una función inversa.

I- Existe un efecto indirecto del aumento de las puntuaciones directas de los componentes de la MT con la edad, por lo cual la variabilidad intergrupala absoluta aumenta a la vez que la edad.

II- La variabilidad relativa se mantiene una vez reducida la magnitud de las puntuaciones directas obtenidas.

III- Existe una mayor dependencia entre los componentes de MT: Bucle Fonológico y Ejecutivo Central, por lo cual, si un sujeto presenta un desarrollo más adelantado o atrasado en uno de los componentes, lo estará también en el otro.

Con respecto a la relación de la Memoria de Trabajo con la Inteligencia en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA:

I- Aunque existan más correlaciones significativas en la relación de MT e Inteligencia en una muestra de sujetos en normodesarrollo que en una muestra de sujetos diagnosticados con TDA, ambas muestras reflejan relaciones significativas, por lo que se demuestra que existe relación entre los componentes de la MT (medidos a través del WMTB-C) y los componentes de la inteligencia medidos a través de (K-BIT).

II- En sujetos en ND todos los componentes de la MT están relacionados con todos los componentes de la inteligencia.

III- En sujetos diagnosticados con TDA, la inteligencia fluida (medida a través del subtest Matrices del K-BIT) está más relacionada con la memoria de trabajo que la inteligencia cristalizada (medida a través del subtest de vocabulario del K-BIT).

IV- Existe un patrón modular en la relación de la memoria de trabajo y la inteligencia.

V- La información visual tiene un papel más fundamental durante el proceso cognitivo en sujetos diagnosticados con TDA debido a que la relación más significativa entre la MT y la inteligencia para esta muestra es la de EC-AV y AV-Matrices.

Referencias bibliográficas.

- Akovlev/Lecours(1967),«The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain»,
Regional Development of the Brain in Early Life, Oxford, pp. 3a 70.
- Alloway TP, Gathercole SE, Pickering SJ. Verbal and visuospatial short-term and working memory in children: are they separable? *Child Dev.* 2006 Nov-Dec;77(6):1698-716. doi: 10.1111/j.1467-8624.2006.00968.x. PMID: 17107455.
- American Psychological Association [APA]. (2014). Manual de diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales (DSM-5).
- Andre, J., Picchioni,M., Zhang, R. & Touloupoulou, T. (2016). Working memory circuit as a function of increasing age in healthy adolescence: A systematic review and meta-analyses. *NeuroImage: Clinical* 12: 940-948.
- Arjona A, Rodríguez-Martínez EI, Ruiz-Martínez F, et al. (2018). Event-Related Potentials During a Delayed Match-to-Sample Test to Evaluate Working Memory Development in Control and Attention Deficit Children and Adolescents. *advances in cognitive neurodynamics* (vi), eds. springer verlag (singapore), pp 295-301
- Artuso, C., & Palladino, P. (2016). Letter updating is related to reading fluency but not comprehension. *Learning and Individual Differences*, 52, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2016.10.008>
- Baddeley (2000),“The episodic buffer: a new component of working memory?” *Trends Cogn Sci*,2000 Nov 1;4(11):417-423.DOI: 10.1016/s1364-6613(00)01538-2
- Baddeley (2010), “The episodic buffer: a new component of working memory?” *Trends Cogn Sci*.2000 Nov 1;4(11): 417-423.DOI: 10.1016/s1364-6613(00)01538-2.
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556–559. <http://doi.org/10.1126/science.1736359>.
- Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*. 63, 1–29.

- Baddeley, A. D. & Hitch, G. (1974). Working Memory. *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*. Vol. 8. G. H. Bower, ed. (New York: Academic Press), pp. 47–89.
- Baird, A. A., Kagan, J., Gaudette, T., Walz, K. A., Hershlag, N., & Boas, D. A. (2002). Frontal lobe activation during object permanence: Data from near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 16(4), 1120-1126.
- Barkley RA. Attention-Deficit Hyperactivity Disorder: A Handbook for Diagnosis and Treatment. 1998, New York: Guilford.
- Barriga-Paulino, C. I., Rodríguez-Martínez, E. I., Rojas-Benjumea, M. Á., & Gómez, C. M. (2014). Slow wave maturation on a visual working memory task. *Brain and cognition*, 88, 43-54.
- Barriga-paulino, C. I., Rodríguez-Martínez, E. I., Ángeles, M., Carlos, R., & Gómez, M. (2016). Análisis de componentes principales de las variables de la memoria de trabajo durante el desarrollo infantil y adolescente. 2004, 1–13
- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V., & Camos, V. (2009). Working memory span development: a time-based resource-sharing model account. *Developmental psychology*, 45(2), 477.
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*. 57 (1): 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Burin, D. & Duarte, D. & Delgado, Ana & Prieto, Gerardo. (2004). Memoria de trabajo visoespacial y aptitud de Visualización. <http://www.redined.mec.es/oai/indexg.php?registro=008200430448>. 16
- Carretti, B., Borella, E., Cornoldi, C., & De Beni, R. (2009). Role of working memory in explaining the performance of individuals with specific reading comprehension difficulties: A meta-analysis. *Learning and Individual Differences*, 19(2), 246–251doi: 10.1016/j.lindif.2008.10.002
- Case, R., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of experimental child psychology*, 33(3), 386-404.

- Casey BJ, Trainor RJ, Orendi JL, Schubert AB, Nystrom LE, Giedd JN, Castellanos FX, Haxby JV, Noll DC, Cohen JD, Forman SD, Dahl RE, Rapoport JL. A Developmental Functional MRI Study of Prefrontal Activation during Performance of a Go-No-Go Task. *J Cogn Neurosci*. 1997 Nov;9(6):835-47. doi: 10.1162/jocn.1997.9.6.835. PMID: 23964603.
- Castellà Mate, J. (2010). El efecto de similitud en la memoria de trabajo visual mediante tareas de reconocimiento. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Castellanos FX, Lee PP, Sharp W, Jeffries NO, Greenstein DK, Clasen LS, et al. Developmental trajectories of brain volume abnormalities in children and adolescents with attentiondeficit/hyperactivity disorder. *JAMA* 2002; 288: 1740-8.
- Castellanos, F. X., & Tannock, R. (2002). Neuroscience of attention-deficit/hyperactivity disorder: The search for endophenotypes. *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 617–628. <https://doi.org/10.1038/nrn896>
- Climent, G., & Banterla, F. A. U. L. A. (2011). Manual Teórico. San Sebastián: Nesplora.
- Collette, F., & Van der Linden, M. (2002). Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(2), 105–125. [http://dx.doi.org/10.1016/S0149-7634\(01\)00063-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0149-7634(01)00063-X)
- Colom, R., Abad, F. J., Quiroga, M. Á., Shih, P. C., & Flores-Mendoza, C. (2008). Working memory and intelligence are highly related constructs, but why? *Intelligence*, 36(6), 584-606.
- Colom, R., Flores-Mendoza, C., & Rebollo, I. (2003). Working memory and intelligence. *Personality and Individual differences*, 34(1), 33-39.
- Cornoldi, C., Giofrè, D., Calgaro, G. y cols. Attentional WM is not necessarily specifically related with fluid intelligence: the case of smart children with ADHD symptoms. *Psychological Research* 77, 508–515 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00426-012-0446-8>
- Cowan N. (2010). Multiple concurrent thoughts: The meaning and developmental neuropsychology of working memory, *Developmental neuropsychology*, 35(5), 447–474. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.494985>
- Cowan, N. (1995). *Attention and Memory: An Integrated Framework*. Oxford University Press. <http://dx.doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195119107.001.0001>

- Cowan, N. (2014). Working memory underpins cognitive development, learning, and education. *Educational psychology review*, 26(2), 197-223.
- Diamond, A. (2001). A model system for studying the role of dopamine in prefrontal cortex during early development in humans. En C. Nelson, & M. Luciana (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (pp. 433-472). Cambridge, EE.UU.: MIT Press
- Diamond, A. (2002). Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: Cognitive functions, anatomy, and biochemistry. En D. T. Stuss, & R. T. Knight (Eds.), *Principles of frontal lobe function* (pp. 466-503). Londres, UK: Oxford University Press.
- Díaz-Orueta, U., García-López, C., Crespo-Eguílaz, N., Sánchez- Carpintero, R., Climent, C., & Narbona, J. (2014). AULA virtual reality test as an attention measure: Convergent validity with Conners' Continuous Performance Test. *Child Neuropsychology*, 20, 328–342. <https://doi.org/10.1080/09297049.2013.792332>
- DuPaul, G. J. (1998). *ADHD rating scale-IV: Checklists, norms, and clinical interpretation*, Nueva York: Guilford Press.
- Egeland, J. (2015). Measuring working memory with Digit Span and the Letter-Number Sequencing subtests from the WAIS-IV: too low manipulation load and risk for underestimating modality effects. *Applied Neuropsychology: Adult*, 22(6), 445-451.
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: a latent-variable approach. *Journal of experimental psychology: General*, 128(3), 309.
- Engle, R.W. (2002). Working Memory Capacity as Executive Attention. *Current Directions in Psychological Science*, 11(1), 19-23. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00160>
- Engle, RW., Tuholski, SW., Laughlin, JE., Conway, A. (1999), Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: a latent-variable approach, *J Exp Psychol Gen.*1999 Sep;128(3):309-331. Doi: 10.1037/0096-3445.128.3.309.
- Frazier, T.W., Demaree, H.A., Youngstrom, E.A., 2007. Meta-analysis of intellectual and neuropsychological test performance in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuropsychology* 18 (3), 543–555, <http://dx.doi.org/10.1037/0894-4105.18.3.54>
- Fry, A. F., & Hale, S. (2000). Relationships among processing speed, working memory, and fluid intelligence in children. *Biological psychology*, 54(1-3), 1-34.

- Fuster, J. M. (2002). Frontal lobe and cognitive development. *Journal of Neurocytology*, 31, 373-385.
- Fuster, J. M. (2007). Cortical memory. *Scholarpedia*, 2(4), 1644.
- Gardner, H. (1999). *Intelligence reframed: Multiple intelligences for the 21st century*. Basic books.
- Gathercole, S. E., & Hitch, G. J. (1993). Developmental changes in short-term memory: A revised working memory perspective. In A. Collins, S. E. Gathercole, M. A. Conway, & P. E. Morris (Eds.), *Theories of memory* (pp. 189–210). Hove, England: Erlbaum.
- Gathercole, S. E., & Pickering, S. J. (2000). Assessment of working memory in six- and seven-year-old children. *Journal of Educational Psychology*, 92, 377–390.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The Structure of Working Memory From 4 to 15 Years of Age. *Developmental Psychology*, 40(2), 177–190. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.2.177>
- Gathercole, S., & Pickering, S. (2001). *Working Memory Test Battery for Children (WMTB-C)*, Pearson Education, Ltd., London
- Gómez, C. M., Ruíz-Martínez, F. J., Angulo, B., & Rodríguez-Martínez, E. I. (2021). Working memory: Physiology and neurodevelopment. In *Factors Affecting Neurodevelopment* (pp. 447-458). Academic Press.
- Gómez, C. M., Barriga-Paulino, C. I., Rodríguez-Martínez, E. I., Rojas-Benjumea, M. Á., Arjona, A., & Gómez-González, J. (2018). The neurophysiology of working memory development: from childhood to adolescence and young adulthood. *Reviews in the Neurosciences*, 29(3), 261-282.
- Gorsuch, R. L. (1983). *Factor analysis* (2nd. ed.). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gray, J. R., Chabris, C. F., & Braver, T. S. (2003). Neural mechanisms of general fluid intelligence. *Nature neuroscience*, 6(3), 316–322. <https://doi.org/10.1038/nn1014>
- Hernández, S., Díaz, A., Jiménez, J., Martín, R., Rodríguez, C., García, E. (2012). Datos normativos para el test de Span Visual: estudio evolutivo de la memoria de trabajo visual y la memoria de trabajo verbal, *European Journal of Education*

and Psychology, Vol. 5, N° 1 (Págs. 65-77) © Eur. j. educ. psychol. ISSN 1888-8992 // www.ejep.es

- Hitch, G. J., Halliday, M. S., Schaafstal, A. M., & Schraagen, J. M. C. (1988). Visual working memory in young children. *Memory & Cognition*, 16, 120–132.
- Holmes, J., Gathercole, S., Place, M., Alloway, T., Elliott, J., & Hilton, K. (2010). An assessment of the diagnostic utility of executive function assessments in the identification of ADHD in children. *Child and Adolescent Mental Health*. 15. 37- 43
- Hoshi, E., & Tanji, J. (2004). Area-selective neuronal activity in the dorsolateral prefrontal cortex for information retrieval and action planning. *Journal of Neurophysiology*, 91, 2707-2722.
- Hulme, C., Thomson, N., Muir, C., & Lawrence, A. (1984). Speech rate and the development of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38(2), 241–253. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(84\)90124-3](https://doi.org/10.1016/0022-0965(84)90124-3).
- Jarvis, H.L., & Gathercole, S.E. (2003). Verbal and non-verbal working memory and achievements on national curriculum tests at 11 and 14 years of age. *Educ. Child Psychol* 20,123–140.
- Justicia F. J. (1995). *Vocabulary Development: Frequency Dictionary*. [The development of the vocabulary: Frequency dictionary]. Granada, Spain: Universidad de Granada.
- Kaufman, A.S., & Kaufman, N. L. (1990). *Manual for the Kaufman Brief Intelligence Test*. Circle Pines, MN: American Guidance Service.
- Kemps, E., Rammelaere, S. D. & Desmet, T. (2000). The Development of Working Memory: Exploring the Complementarity of Two Models. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(2), 89–109. <http://dx.doi.org/10.1006/jecp.2000.2589>
- Klingberg, T. (2006). Development of a superior frontal-intraparietal network for visuo-spatial working memory. *Neuropsychologia*, 44(11), 2171–2177. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.019>
- Kwon, H., Reiss, A. L., & Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(20), 13336-13341.

- Koenis, M. M. G., Brouwer, R. M., Swagerman, S. C., van Soelen, I. L. C., Boomsma, D. I., & Hulshoff Pol, H. E. (2018). Association between structural brain network efficiency and intelligence increases during adolescence. *Human brain mapping*, 39(2), 822–836. <https://doi.org/10.1002/hbm.23885>
- Konishi, S., Hayashi, T., Uchida, I., Kikyo, H., Takahashi, E., & Miyashita, Y. (2002). Hemispheric asymmetry in human lateral prefrontal cortex during cognitive set shifting. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(11), 7803-7808.
- Lee, K., & Bull, R. (2016). Developmental changes in working memory, updating, and math achievement. *Journal of Educational Psychology*, 108(6), 869–882. doi:10.1037/edu0000090
- Lenroot, R. K., & Giedd, J. N. (2006). Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 30, 718-729.
- Lenroot y col., 2007 → Mackie S, Shaw P, Lenroot R, Pierson R, Greenstein DK, Nugent TF III, et al. Cerebellar development and clinical outcome in attention deficit hyperactivity disorder. *Am J Psychiatry* 2007; 164: 647-55.
- Loe, I.M., Feldman, H.M., 2007. Academic and educational outcomes of children with ADHD. *Ambul. Pediatr.* 7 (1), 82–90, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ambp.2006.05.005>
- Logie R. H. & Pearson D. G. (1997). The inner ear and the inner scribe of visuo-spatial working memory: Evidence from developmental fractionation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(3), 241–257. <https://doi.org/10.1080/713752559>
- Luna, B., Padmanabhan, A. & O’Hearn, K. (2010). What has fMRI told us about the development of cognitive control through adolescence? *Brain and Cognition*, 72(1), 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.08.005>
- Mackenzie, G.B., Wonders, E., 2016. Rethinking intelligence quotient exclusion criteria practices in the study of attention deficit hyperactivity disorder. *Front. Psychol.* 2016 (7), 794, <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00794>.

- MacPherson, S.E., Gillebert, C.R., Robinson, G.A, Vallesi, A., (2019) Editorial: Intra- and Inter-individual Variability of Executive Functions: Determinant and Modulating Factors in Healthy and Pathological Conditions.
- Magnin, E. & Maurs, C. (2017). Attention-deficit/hyperactivity disorder during adulthood. *Revue Neurologique*. 173, 506-515. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neurol.2017.07.008>.
- Manoach, D. S., Schlaug, G., Siewert, B., Darby, D. G., Bly, B. M., Benfield, A., y cols. (1997). Prefrontal cortex fMRI signal changes are correlated with working memory load. *NeuroReport*, 8(2), 545–549. <https://doi.org/10.1097/00001756-199701200-00033>
- McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., Balota, D. A., & Hambrick, D. Z. (2010). The relationship between working memory capacity and executive functioning: evidence for a common executive attention construct., *Neuropsychology*, 24(2), 222–243. <https://doi.org/10.1037/a0017619>
- Mella N, Fagot D, Lecerf T, de Ribaupierre A. Working memory and intraindividual variability in processing speed: A lifespan developmental and individual-differences study. *Mem Cognit*. 2015;43(3):340-356. doi:10.3758/s13421-014-0491-1
- Mondloch, C. J., Geldart, S., Maurer, D., & de Schonen, S. (2003). Developmental changes in the processing of hierarchical shapes continue into adolescence. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84, 20-40. doi:10.1016/S0022-0965(02)00161-3.
- Morales, B. C. (2018). Modelos de la Memoria de Trabajo de Baddeley y Cowan: una revisión bibliográfica comparativa. *Revista Chilena de Neuropsicología*, 13(1), 6-10.
- Muñoz-Pradas, R., Díaz-Palacios, M., Rodríguez-Martínez, E., Gómez, C.M., (2021). Order of maturation of the components of the working memory from childhood to emerging adulthood. *Current Research* <https://doi.org/10.1016/j.crbeha.2021.100062>
- Nelson C. A. (2000). Neural plasticity and human development: The role of early experience in sculpting memory systems. *Developmental Science*, 3(2), 115– 136. <http://dx.doi.org/10.1111/1467-7687.00104>
- Nelson, C. A. (1995). The ontogeny of human memory: A cognitive neuroscience perspective. *Developmental Psychology*, 31(5), 723–738. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.31.5.723>

- Østby, Y., Tamnes, C. K., Fjell, A. M., & Walhovd, K. B. (2011). Morphometry and connectivity of the fronto-parietal verbal working memory network in development. *Neuropsychologia*, 49(14), 3854-3862.
- Pascual-Leone, J. and Baillargeon, R. (1994). Developmental measurement of mental attention. *Int. J. Behav. Dev.* 17, 161–200.
- Passolunghi, M.C., & Costa, H.M. (2019). Working memory and mathematical learning. In Fritz, A., Haase, V.G., & Räsänen, P. (Eds.), *International handbook of mathematical learning difficulties* (pp. 407–421). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-97148-3_25
- Pelegriña, S., Molina, R., Rodríguez-Martínez, E. I., Linares, R., & Gómez, C. M. (2020). Age-related changes in selection, recognition, updating and maintenance information in WM. An ERP study in children and adolescents. *Biological psychology*, 157, 107977. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2020.107977>
- Perlman, S. B., Huppert, T. J., & Luna, B. (2016). Functional near-infrared spectroscopy evidence for development of prefrontal engagement in working memory in early through middle childhood. *Cerebral Cortex*, 26(6), 2790-2799.
- Peng, P., Barnes, M., Wang, C., Wang, W., Li, S., Swanson, H. L., Dardick, W. & Tao, S. (2018). A meta-analysis on the relation between reading and working memory. *Psychological Bulletin*, 144(1), 48–76. <https://doi.org/10.1037/bul0000124>
- Pickering, S. J., Gathercole, S. E., & Peaker, S. M. (1998). Verbal and visuospatial short-term memory in children: evidence for common and distinct mechanisms. *Memory & cognition*, 26(6), 1117–1130. <https://doi.org/10.3758/bf032011897>
- Pitts, C.H., & Mervis, C.B. (2016). Performance on the Kaufman Brief Intelligence Test- 2 by Children With Williams Syndrome. *Am J Intellect Dev Disabil.*, 121(1):33-47. <https://doi.org/10.1352/1944-7558-121.1.33>
- Postle, B. R. (2006). Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, 139, 23–38
- Raghubar, K.P., Barnes, M.A., & Hecht, S.A. (2010). Working memory and mathematics: A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 110–122. doi:10.1016/j.lindif.2009.10.005

- Rappaport, M. D., Alderson, R. M., Kofler, M. J., Sarver, D. E., Bolden, J., & Sims, V. (2008). Working memory deficits in boys with attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD): The contribution of central executive and subsystem processes. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 36(6), 825–837. <https://doi.org/10.1007/s10802-008-9215-y>
- Raven, J. (2007). *Test de Matrices Progresivas: escala general: cuaderno de matrices; series A, B, C, D Y E* (2a. ed., 3a. reimp.). Buenos Aires: Paidós
- Riggins, T., & Scott, L. S. (2020). P300 development from infancy to adolescence. *Psychophysiology*, 57(7), e13346.
- Robison, M., Miller, A., Unsworth, N. (2018), Individual differences in working memory capacity and filtering, *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 2018 Jul;44(7):1038-1053. doi: 10.1037/xhp0000513. Epub 2018 Apr 23.
- Rodríguez-Martínez, E. I., Barriga-Paulino, C. I., Rojas-Benjumea, M. A., & Gómez, C. M. (2013). Spontaneous theta rhythm and working memory co-variation during child development. *Neuroscience Letters*, 550, 134-138.
- Rodríguez-Martínez EI, Arjona A, Ruíz-Martínez F, Barriga-Paulino CI, et al. (2018). Working Memory Development in Attention Deficit Children and Adolescents. *advances in cognitive neurodynamics* (vi), eds. springer verlag (Singapore), pp 279-285.
- Rojas-Benjumea, M., Quintero-Gallego, E., Zozaya, L., Barriga-Paulino, C. & Gómez, C. (2013). Children Cautious Strategy and Variable Maturation Time Window for Responding in a Visual Search Task. *Psychology*, 4, 19-32. doi:10.4236/psych.2013.41003
- Rosselli-Cock, M., Matute-Villaseñor, E., Ardila-Ardila, A., Botero-Gómez, V.E., Tangarife-Salazar, G.A., Echeverría-Pulido, S.E., Arbelaez-Giraldo, C., Mejía-Quintero, M., Méndez, L.C., Villa-Hurtado, P.C. & Ocampo-Agudelo, P. (2004). Evaluación Neuropsicológica Infantil (ENI): una batería para la evaluación de niños entre 5 y 16 años de edad. Estudio normativo colombiano. *Revista de neurología*, 38(8), 720-730.
- Sabaté, N., & Tomás, J. (1998). *Trastorno por déficit de atención (TDA). Actitudes educativas, trastornos del lenguaje y otras alteraciones en la infancia y adolescencia (Cuadernos de paidopsiquiatría V)* Josep Tomàs (ed). Barcelona: Laertes SA de Ediciones.

- Schachar, R., Mota, V. L., Logan, G. D., Tannock, R., & Klim, P. (2000). Confirmation of an inhibitory control deficit in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 28, 227–235.
- Shaw y col., 2008 → Shaw P, Eckstrand K, Sharp W, Blumenthal J, Lerch JP, Greenstein D, et al. Attention-deficit/hyperactivity disorder is characterized by a delay in cortical maturation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2007; 104: 19649-54.
- Sternberg, R. J. (1997). The concept of intelligence and its role in lifelong learning and success. *American psychologist*, 52(10), 1030.
- Swanson, H. L. (2008). Working memory and intelligence in children: What develops? *Journal of Educational Psychology*, 100(3), 581–602. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.3.581>
- Swanson, H. L., & Alloway, T. P. (2012). Working memory, learning, and academic achievement. In K. R. Harris, S. Graham, T. Urdan, C. B. McCormick, G. M. Sinatra, & J. Sweller (Eds.), *APA handbooks in psychology®. APA educational psychology handbook, Vol. 1. Theories, constructs, and critical issues* (p. 327-366). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/13273-012>
- Tourva, A., Spanoudis, G., & Demetriou, A. (2016). Cognitive correlates of developing intelligence: The contribution of working memory, processing speed and attention. *Intelligence*, 54, 136-146.
- Tsujimoto, S., Yamamoto, T., Kawaguchi, H., Koizumi, H., & Sawaguchi, T. (2004). Prefrontal cortical activation associated with working memory in adults and preschool children: an event-related optical topography study. *Cerebral cortex*, 14(7), 703-712.
- Tsujimoto, S., (2008). The prefrontal cortex: Functional neural development during early childhood. *The Neuroscientist*, 14, 345-358.
- Vestergaard, M., Madsen, K. S., Baaré, W. F., Skimminge, A., Ejersbo, L. R., Ramsøy, T. Z., ... & Jernigan, T. L. (2011). White matter microstructure in superior longitudinal fasciculus associated with spatial working memory performance in children. *Journal of cognitive neuroscience*, 23(9), 2135-2146.

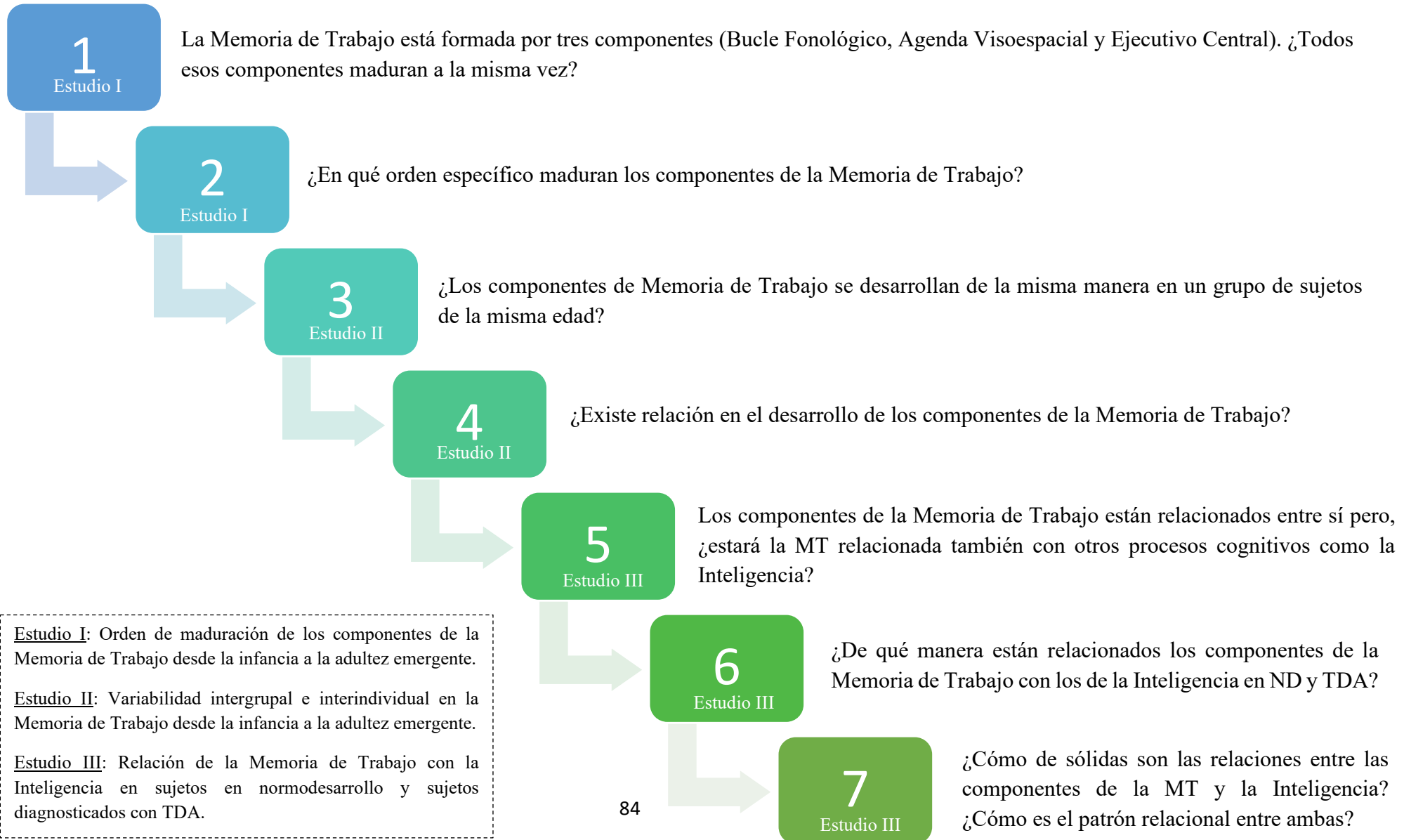
Wang, J. J., & Kaufman, A. S. (1993). Changes in fluid and crystallized intelligence across the 20-to 90-year age range on the K-BIT. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 11(1), 29-37.

Wechsler, D. (2015). WISC-V. Escala de inteligencia de Wechsler para niños-V. Pearson

Zhou, X., Zhu, D., Katsuki, F., Qi, X. L., Lees, C. J., Bennett, A. J., ... & Constantinidis, C. (2014). Age-dependent changes in prefrontal intrinsic connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(10), 3853-3858.

ANEXOS

Anexo I - PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

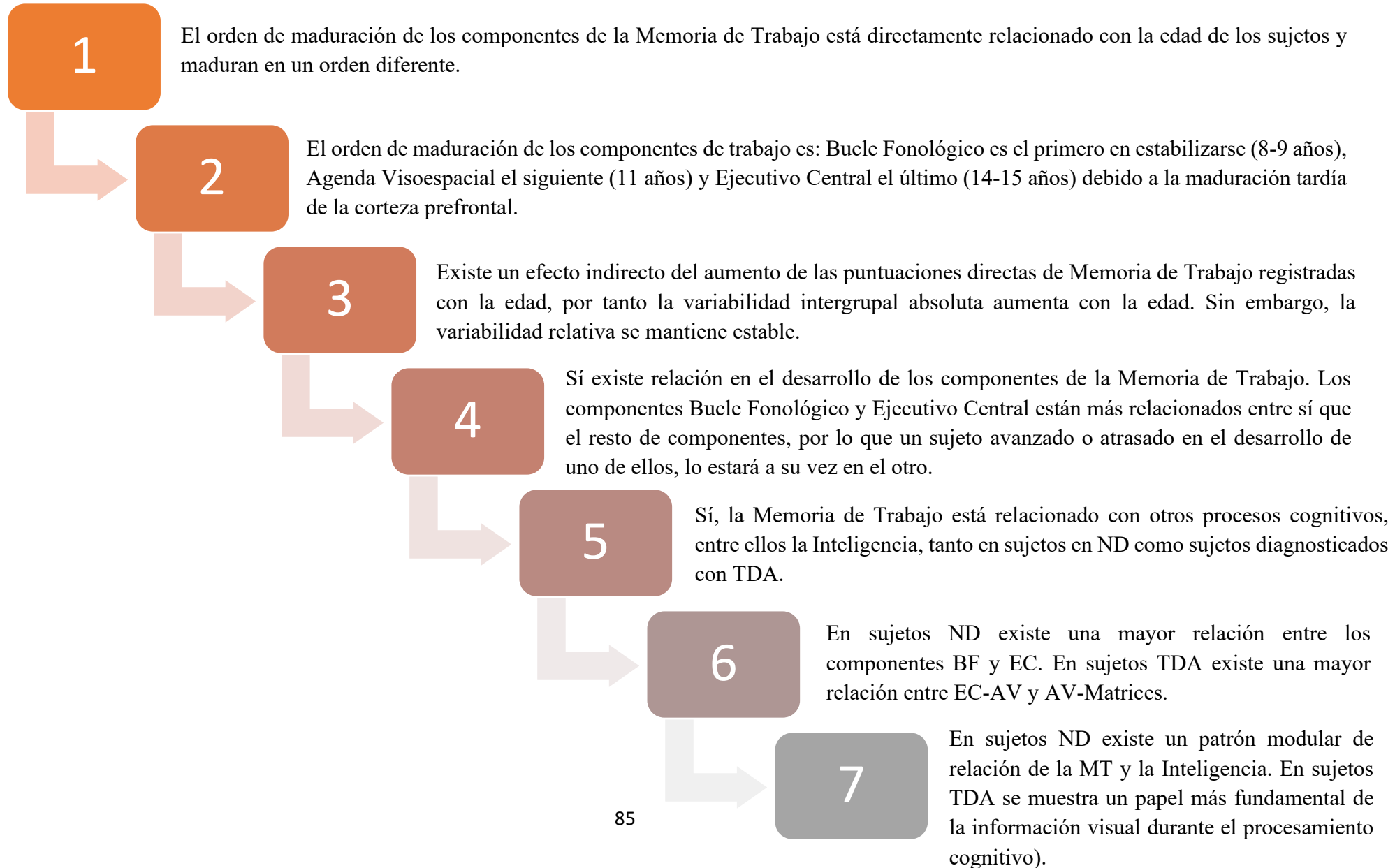


Estudio I: Orden de maduración de los componentes de la Memoria de Trabajo desde la infancia a la adultez emergente.

Estudio II: Variabilidad intergrupal e interindividual en la Memoria de Trabajo desde la infancia a la adultez emergente.

Estudio III: Relación de la Memoria de Trabajo con la Inteligencia en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA.

Anexo II - RESPUESTAS DE INVESTIGACIÓN



Anexo III - ESQUEMA DE DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

ESTUDIO I: Orden de maduración de los componentes de la Memoria de Trabajo desde la infancia a la adultez emergente

Objetivo: Corroborar el orden de maduración de los componentes de la MT (BF, AV, EC) que componen el modelo multicomponente de la MT.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	PROPÓSITO	RESULTADOS	CONCLUSIÓN
Regresión lineal de las puntuaciones Z de MT en relación a la edad medida en años	Estudiar la evolución de BF, AV y EC.	Todas las regresiones son significativas.	Existe una relación directamente proporcional entre la edad y las PD obtenidas.
ANOVAS lineales univariados de edad y género frente a BF, AV y EC.	Determinar si existen diferencias en el orden de maduración de los componentes de MT.	La edad y el género no son variables significativas. Las PD crecen en la infancia y adolescencia y se estabilizan en la adultez temprana.	El orden de maduración de los componentes de la MT es diferente.
Post-hoc Bonferroni	Analizar las diferencias significativas entre los componentes de MT y determinar el orden de maduración.	BF madura a los 8-9 años. AV madura a los 11 años. EC madura a los 14-15 años.	EC es el último en madurar debido a la maduración tardía de la corteza prefrontal y a la relación de sus áreas con tareas ejecutivas.

Hipótesis:

El Ejecutivo Central es el componente de Memoria de Trabajo que madurará de forma más tardía.

Estudio III

Muestra:

Nº sujetos	Género masculino	Género femenino	Edad
258	134	124	6-29 años

ESTUDIO II: Variabilidad intergrupala e interindividual en la Memoria de Trabajo desde la infancia a la adultez emergente

Objetivo I: Determinar si existen o no diferencias individuales intergrupales de las puntuaciones directas de los componentes de la MT obtenidas a través del WMTB-C en diferentes grupos de edad.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	PROPÓSITO	RESULTADOS	CONCLUSIÓN
Regresiones lineales de las DS de las PD de MT considerando y excluyendo los valores outliers.	Estudiar la variabilidad absoluta.	Considerando valores outliers solo las PD de BF son consideradas significativas. Excluyendo valores outliers todas las relaciones son significativas.	Hay un efecto indirecto del aumento de las PD con la edad, por lo cual la variabilidad absoluta intergrupala aumenta con ella. La variabilidad relativa se mantiene.
Coefficiente de Variación y regresiones lineales de las DS de los residuales.	Estudiar la variabilidad relativa.	No hay diferencias significativas en ningún componente.	

Objetivo II: Determinar si existe una relación entre el desarrollo de los diferentes componentes de la MT (BF, AV, EC) siguiendo el Modelo de Baddeley y Hitch.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	PROPÓSITO	RESULTADOS	CONCLUSIÓN
Regresiones lineales de los residuales de la edad (reduciendo así el factor edad, cuyo gran impacto absorbería la mayor parte de variabilidad de los datos)	Estudiar en qué componentes hay mayor dependencia en el desarrollo.	Existe una mayor dependencia en el desarrollo de Bucle Fonológico con Ejecutivo Central.	Si un sujeto presenta un desarrollo más adelantado o más atrasado en uno de esos componentes, lo hará a su vez en el otro.
Análisis de Componentes Principales (ACP) y Rotación Varimax	Explicar la varianza de las variables (los componentes de carga permitirán evaluar qué variable tiene más peso).	Hay mayor carga (dependencia) entre los componentes BF y EC.	

Hipótesis:

Se espera que la variabilidad absoluta de las puntuaciones directas de MT aumenten con la edad de los grupo, pero no la variabilidad relativa.

Muestra:

Nº sujetos	Género masculino	Género femenino	Edad
258	134	124	6-18 años (grupos de 1 año)

18 a 29 años (grupos de 2 años)

ESTUDIO III: Relación de la Memoria de Trabajo con la Inteligencia en sujetos en normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA

Objetivo: Mostrar si existe una relación entre el desarrollo de la MT medida a través del WMTB-C (Gathercole & Pickering, 2001) y la inteligencia medida con K-BIT durante el desarrollo tanto en sujetos en normodesarrollo como en sujetos diagnosticados con TDA.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	PROPÓSITO	RESULTADOS	CONCLUSIÓN
ANOVAS univariadas y corrección con TDF entre los componentes de MT e Inteligencia.	Estudiar la diferencia de medias y determinar si existe o no relación entre ambos procesos cognitivos.	Existen más relaciones significativas en sujetos ND que en sujetos diagnosticados con TDA. Pero ambas muestras presentan relaciones significativas.	La MT está relacionada con la inteligencia en ambas muestras.
Regresiones lineales de las PD de MT e Inteligencia respecto a la edad medida en días.	Comprobar por otro medio si existe o no relación entre ambos procesos cognitivos.	En ND todas las regresiones son significativas. En TDA todas, menos BF, son significativas.	
Correlaciones bivariadas de Spearman y correlaciones parciales controlando por edad en las PD de WM y K-BIT corregidas con TDF.	Determinar qué componente de MT está relacionado con qué componente de K-BIT.	En ND todas las correlaciones son significativas. En TDA hay correlación entre EC-AV y AV-Matrices.	En ND todos los componentes de la MT están relacionados con la inteligencia. En TDA la inteligencia fluida (matrices) está más relacionada con la MT que la inteligencia cristalizada (vocabulario).
Correlación por permutación sin reemplazo.	Comprobar la solidez de las correlaciones y tratar de calcular las correlaciones con el mismo número de sujetos ND que TDA (solventando la limitación de	En ND la correlación más significativa (sólida) es la de BF-EC. En TDA las correlaciones más significativas (sólidas) son EC-	En ND hay un patrón modular en la relación entre MT e inteligencia. En TDA existe un papel más fundamental

	una muestra dispar).	AV y AV-Matrices.	de la información visual durante el procesamiento cognitivo.
--	----------------------	-------------------	--

Hipótesis:

Se espera que los componentes de la MT estén relacionados con la inteligencia tanto en sujetos con normodesarrollo y sujetos diagnosticados con TDA.

Muestra:

	Nº sujetos	Género masculino	Género femenino	Edad
Normodesarrollo (ND)	84	45	38	6-18 años
Trastorno de déficit de atención (TDA)	36	28	8	6-17 años

Anexo IV – Criterios de diagnóstico del TDA recogidos en el DSM-V (2014)

Dentro de los criterios de diagnóstico del TDA recogidos en el DSM-V (2014) se destacan:

A. Patrón persistente de inatención y/o hiperactividad-impulsividad que interfiere con el funcionamiento o desarrollo que se caracteriza por (1) y/o (2):

1. Inatención

Seis (o más) de los siguientes síntomas se han mantenido durante al menos 6 meses en un grado que no concuerda con el nivel de desarrollo y que afecta directamente las actividades sociales y académicas/laborales:

Nota: Los síntomas no son sólo una manifestación del comportamiento de oposición, desafío, hostilidad o fracaso para comprender las tareas o instrucciones.

* Para adolescentes mayores y adultos (a partir de 17 años de edad), se requiere un mínimo de 5 síntomas.

a. Con frecuencia falla en prestar la debida atención a los detalles o por descuido se cometen errores en las tareas escolares, en el trabajo o durante otras actividades (por ejemplo, se pasan por alto o se pierden detalles, el trabajo no se lleva a cabo con precisión).

b. Con frecuencia tiene dificultades para mantener la atención en tareas o actividades recreativas (por ejemplo, tiene dificultad para mantener la atención en clases, conversaciones o lectura prolongada).

c. Con frecuencia parece no escuchar cuando se le habla directamente (por ejemplo, parece tener la mente en otras cosas, incluso en ausencia de cualquier distracción aparente).

d. Con frecuencia no sigue las instrucciones y no termina las tareas escolares, los quehaceres o los deberes laborales (por ejemplo, inicia tareas pero se distrae rápidamente y se evade con facilidad).

e. Con frecuencia tiene dificultad para organizar tareas y actividades (por ejemplo, dificultad para gestionar tareas secuenciales; dificultad para poner los materiales y

pertenencias en orden; descuido y desorganización en el trabajo; mala gestión del tiempo; no cumple los plazos).

f. Con frecuencia evita, le disgusta o se muestra poco entusiasta en iniciar tareas que requieren un esfuerzo mental sostenido (por ejemplo tareas escolares o quehaceres domésticos; en adolescentes mayores y adultos, preparación de informes, completar formularios, revisar artículos largos).

g. Con frecuencia pierde cosas necesarias para tareas o actividades (por ejemplo, materiales escolares, lápices, libros, instrumentos, billetero, llaves, papeles de trabajo, gafas, móvil).

h. Con frecuencia se distrae con facilidad por estímulos externos (para adolescentes mayores y adultos, puede incluir pensamientos no relacionados).

i. Con frecuencia olvida las actividades cotidianas (por ejemplo, hacer las tareas, hacer las diligencias; en adolescentes mayores y adultos, devolver las llamadas, pagar las facturas, acudir a las citas).

2. Hiperactividad

Seis (o más) de los siguientes síntomas se han mantenido durante al menos 6 meses en un grado que no concuerda con el nivel de desarrollo y que afecta directamente las actividades sociales y académicas/laborales:

Nota: Los síntomas no son sólo una manifestación del comportamiento de oposición, desafío, hostilidad o fracaso para comprender las tareas o instrucciones.

* Para adolescentes mayores y adultos (a partir de 17 años de edad), se requiere un mínimo de 5 síntomas.

a. Con frecuencia juguetea o golpea con las manos o los pies o se retuerce en el asiento.

b. Con frecuencia se levanta en situaciones en que se espera que permanezca sentado (por ejemplo, se levanta en clase, en la oficina o en otro lugar de trabajo, en situaciones que requieren mantenerse en su lugar).

c. Con frecuencia corretea o trepa en situaciones en las que no resulta apropiado. (Nota: En adolescentes o adultos, puede limitarse a estar inquieto.).

d. Con frecuencia es incapaz de jugar o de ocuparse tranquilamente en actividades recreativas

e. Con frecuencia está `ocupado`, actuando como si `lo impulsara un motor (por ejemplo, es incapaz de estar o se siente incómodo estando quieto durante un tiempo prolongado, como en restaurantes, reuniones; los otros pueden pensar que está intranquilo o que le resulta difícil seguirlos).

f. Con frecuencia habla excesivamente.

3. Impulsividad

g. Con frecuencia responde inesperadamente o antes de que se haya concluido una pregunta (por ejemplo, termina las frases de otros; no respeta el turno de conversación)

h. Con frecuencia le es difícil esperar su turno (por ejemplo, mientras espera una cola).

i. Con frecuencia interrumpe o se inmiscuye con otros (por ejemplo, se mete en las conversaciones, juegos o actividades; puede empezar a utilizar las cosas de otras personas sin esperar o recibir permiso; en adolescentes y adultos, puede inmiscuirse o adelantarse a lo que hacen los otros).

B. Algunos síntomas de inatención o hiperactivo-impulsivos estaban presentes antes de los 12 años.

C. Varios síntomas de inatención o hiperactivo-impulsivos están presentes en dos o más contextos (por ejemplo, en casa, en el colegio o el trabajo; con los amigos o familiares; en otras actividades).

D. Existen pruebas claras de que los síntomas interfieren con el funcionamiento social, académico o laboral, o reducen la calidad de los mismos.

E. Los síntomas no se producen exclusivamente durante el curso de la esquizofrenia o de otro trastorno psicótico y no se explican mejor por otro trastorno mental (por ejemplo, trastorno del estado de ánimo, trastorno de ansiedad, trastorno disociativo, trastorno de la personalidad, intoxicación o abstinencia de sustancias).

En función de los resultados se podrán clasificar las siguientes presentaciones:

Presentación combinada: Si se cumplen el Criterio A1 (inatención) y el Criterio A2 (hiperactividad-impulsividad) DURANTE los últimos 6 meses.

Presentación predominante con falta de atención: Si se cumple el Criterio A1 pero no se cumple el criterio A2 (hiperactividad-impulsividad) durante los últimos 6 meses.

Presentación predominante hiperactiva/impulsiva: Si se cumple el Criterio A2 (hiperactividad-impulsividad) y no se cumple el Criterio A1 (inatención) durante los últimos 6 meses.



Order of maturation of the components of the working memory from childhood to emerging adulthood

Raquel Muñoz-Pradas, Miriam Díaz-Palacios, Elena I. Rodríguez-Martínez, Carlos M. Gómez*

Human Psychobiology Lab, Experimental Psychology Department, Psychology School, University of Sevilla, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Working memory
Development
Multicomponent model
Differential maturation

ABSTRACT

The objective of this paper was to analyze the maturation order of WM components Phonological loop (PL), Visuo-spatial Sketchpad (VSS) and Central executive (CE), from childhood to emerging adulthood in subjects aged between 6 and 29 years; by means of Bonferroni comparisons between the direct scores of the different age groups. The WM direct scores were obtained with the Working Memory Test Battery for Children (WMTBC). Linear regressions between age and Z-scores of the direct scores of the three components of the WM were carried out. The results indicate that the different components of WM are linearly related to age, from 6 to 15 years old, replicating previously obtained results. ANOVA and Bonferroni-type comparisons show that there is a different order of maturation among the components that make up the WM, with the central executive being the component that matures later. A peculiar result was observed in the 16–17-year group for PL and CE. This group presents a significant difference with all the groups of lower age.

1. Introduction

1.1. Working memory: definition, components and models

Working memory (WM) is a psychological process of psychobiological and neurophysiological origin, which is involved in the temporary storage and manipulation of information to execute complex cognitive functions, including language, understanding, learning and reasoning (Baddeley, 1992). WM also allows keeping active the information and operations necessary to solve a task. WM is a system that has the ability to store information in a short period of time (for seconds) and process the stored information (Baddeley, 1992). Memory is especially important in the field of curricular activities and in the cognitive development of the child, fulfilling such important functions as assimilating different types of information, and in turn, interacting with long-term memory to rescue relevant and semantically related information. On the other hand, it is also capable of facilitating the consolidation of the contents of the working memory in long-term memory (LTM) and allowing a behavior directed towards objectives (Baddeley, 2012).

Several models have proliferated to explain WM and its development, for instance those of Pasqual-Leone (1994) and Cowan (1995) (for a review on developmental issues of these models see: Gómez et al., 2018 and 2021).

1.2. Development of WM according to the Baddeley & Hitch model

Baddeley and Hitch (1974) proposed one of the most relevant models to explain the functioning and structure of WM. This model is empirically based through experiments in which the performance of each component can be independently interfered by concurrent tasks (Baddeley, 2012). The WM is composed by a central executive (CE), which is in charge of coordinating the slave components, the visuo-spatial sketchpad (VSS) and the phonological loop (PL), and allows interaction with LTM. CE is important in novel situations such as problem solving, planning, selection of strategies (Baddeley, 2012) and complex situations such as multitasking. The CE component participates in tasks that require immediate processing, high-level attentional control and/or coordination of attention.

On the other hand, PL and VSS are specialized systems for the manipulation and retention of material in particular information domains. The PL component is responsible for storing temporarily and processing verbal information, and the VSS is responsible for storing and processing visual and spatial information (Logie et al., 1990).

More recently a fourth component called episodic information buffer memory has been added (Baddeley, 2000). This new system is in charge of simultaneously storing phonological and visual information of the slave systems, and it is capable of integrating information from the LTM (Baddeley, 2000).

* Corresponding author at: Departamento de Psicología Experimental, c/Camilo José Cela s/n, Sevilla 41018, Spain.

E-mail addresses: raqmumpra@alum.us.es (R. Muñoz-Pradas), elisroma@us.es (E.I. Rodríguez-Martínez), cgomez@us.es (C.M. Gómez).

The WM maturation depends on several aspects, such as the type of information that is stored, the encoding, the retention of the information, and the changes related to the maturation of executive functions that mainly involve a specific area of the brain, the prefrontal cortex (Klingberg et al., 2006). WM development would be related to the maturation of WM processing and WM structure and with the increased performance as age progresses. The Working Memory Test Battery for Children (WMTBC; Gathercole and Pickering, 2001) which operationalizes the Baddeley and Hitch Component Model in a population between 6 and 14 years old has been widely used for this purpose. It appears that from 6 years of age, a child's WM presents a structure similar to adults (Gathercole et al., 2004), and the differentiation between the two slave systems is already in place at five years (Pickering et al., 1998). They also found that the change from a visual information coding strategy based solely on visual characteristics of objects to a strategy in which visual information can be supported by verbal strategies occurs around 7–8 years (Gathercole et al., 2004). Although more recent data suggests that the three componential model with a common resource processor and two short-term slave domain-specific systems is already in place at 4 years old (Alloway et al., 2006). The improvement with age of verbal information rehearsal would allow to stabilize the working memory contents.

WM participates in complex cognitive skills and school-related measures, for example, reading comprehension (Carretti et al., 2009), mathematical performance (Passolunghi and Costa, 2019; Raghubar et al., 2010), academic achievement and intelligence (Tourva et al., 2016). Therefore, the understanding of the order of maturation of the different WM components would be important to understand the maturation of these high-level cognitive functions.

Therefore, the progress of WM depends on several aspects such as “the specific information processing of each modality, the encoding and retention in memory, the increase in capacity and the changes related to the maturation of cognitive functions that mainly involve to the prefrontal cortex” (Logie and Pearson, 1997; Nelson, 1995, 2000).

1.3. Order of maturation of WM components

Gathercole et al. (2004) suggested that there are no differences in maturation order of the WM components. They showed that there is a linear growth of the Z-scores of the WM tests included in the WMTBC in subjects between 4 and 14 years, stabilizing at 14 and 15 years of age, except for the visual pattern subtest test in which they found a performance stability at 11 years. In this study no ages higher than 15 years were explored. Alloway et al. (2006), have shown that in verbal short-term memory tasks performance leveled off at 10–11 years, while, visuo-spatial short-term memory, visuo-spatial and verbal working memory present a linear increase up to 11 years. However, in the latter study 11 years was the oldest tested group. Therefore, there is not a systematic study that would include children, adolescents and young adults to test maturation order of the WM components.

1.4. Objectives and hypotheses

The aims of this report are (i) to replicate the linear relationship between the direct scores, expressed in standardized scores, of the WM components with age, as carried out by Gathercole et al. (2004), and (ii) to analyze the maturation order of WM components (VSS, PL and CE) that make up the multicomponent model of WM, by means of Bonferroni comparisons between the direct scores of the different age groups. Regarding the hypothesis of this research, there could be a different maturation order for the systems that make up the multicomponent model of the WM. Possibly, the CE would be the last to mature due to the dependence on the prefrontal cortex maturation.

Table 1
Age and gender of the different age groups.

Age	(n)	Gender
6–7	32	Male: 18 Female: 14
8–9	35	Male: 16 Female: 19
10–11	32	Male: 18 Female: 14
12–13	32	Male: 17 Female: 15
14–15	26	Male: 13 Female: 13
16–17	24	Male: 12 Female: 12
18–19	17	Male: 8 Female: 7
20–21	16	Male: 8 Female: 8
22–29	44	Male: 24 Female: 20

2. Material and methods

2.1. Sample

The sample has been chosen in present form for two reasons; (i) the researchers wanted to study the development and maturation order of WM during this age period, and (ii) gender parity. The sample of subjects for this study was made up of a total of 258 participants with ages between 6 and 29 years, 134 belonging to the male gender (52%, $M = 14.49$, $DT = 6.249$) and 124 to the female gender (48%, $M = 14.35$, $DT = 5.885$). They were divided into groups using the age criterion in years, forming two-year groups from 6 to 17 years old. Subjects in the age range 18–21 and 22–29 formed independent age groups. The group organization in different age ranges was done in order to approximately equate the number of subjects in each age group (see Table 1).

No diagnosed neurological, psychiatric or psychological disease was informed in any of the subjects. No subject was on pharmaceutical treatment. The socioeconomic level of the subjects was middle class and all the participants were in the school grade corresponding to their biological age. Experiments were conducted with the informed and written consent of each participant (parents/tutors in the case of the children and adolescents) following the Helsinki protocol. The study was approved by the Bioethical Committee of the Junta de Andalucía (<https://www.juntadeandalucia.es/salud/portaldeteica/>).

2.2. Working memory test battery for children (WMTBC)

The subjects were tested with the Working Memory Test Battery for Children (WMTBc). This battery is composed of a total of 9 subtests, combined in a specific order to be able to measure through direct scores the three components that make up the WM (phonological loop, visuo-spatial sketchpad and central executive). The order of administration is as follows: (1) Digit Retrieval, (2) Word List Match, (3) Word List Retrieval, (4) Wordless List Retrieval, (5) Block Retrieval, (6) Mazes Memory, (7) Listening Recall, (8) Counting Recall, and (9) Digit Recall Backward. The combination of these subtests provides information regarding the different components: Phonological loop direct scores are obtained from tests 1, 2, 3 and 4, visuo-spatial sketchpad direct scores from 5 to 6 measure the second, and 7, 8 and 9 permitted to obtain the central executive direct scores. The battery used had to be adapted from English to Spanish, following a series of criteria such as:

- For the Word List Agreement and Word List Reminder sub-items, disyllabic words collected from a list of frequency of words used by children were used, with certain similar criteria such as the length

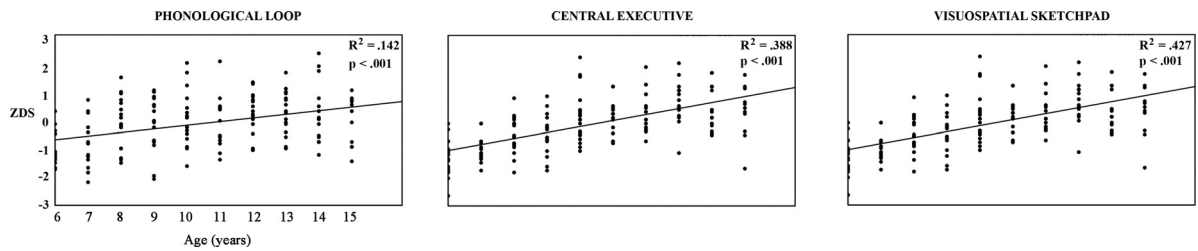


Fig. 1. Linear regressions of Phonological loop, Visuo-spatial Sketchpad and Central Executive Z-scores (ZDS) vs. the age group measured in years up to 15 years. Quitar 16.

Linear regressions of Phonological loop, Visuo-spatial Sketchpad and Central Executive Z-scores (ZDS) vs. the age group measured in years up to 15 years.

between the original words and high frequency of use, with in order to facilitate the completion of the test to younger age groups (Justicia, 1995).

- For the subtest of Retrieval of the list of non-words, the same words have been used as in the previous tests. To transform words into non-words, we changed the order of the vowels within the words and the order of the syllabi that made up each word

2.3. Statistical analysis

All the statistical analysis were computed with IBM SPSS Statistics 26.

- WM components Z-scores linear regression with respect to age measured in years.

A replica of the Gathercole et al. (2004) analysis was carried out, with the aim of studying the increase of Z-scores WM components with age. In order to replicate this analysis, only subjects with ages 15 or lower were selected. The Z-scores of the direct scores of the WM components obtained from the WMTBC were linearly regressed with the age group.

- Order of maturation of WM components.

To carry out the study on the order of maturation of the WM components with respect to age, univariate linear ANOVAS with the factors age groups and gender were computed with the direct scores of the PL, VSS and CE as dependent variables. Greenhouse-Geisser correction for sphericity was applied when needed. Bonferroni post-hoc were computed for the age group significant results. The post-hoc would permit to establish possible differences in the order of maturation of the three WM components.

3. Results

Linear regressions of the Z-scores of the three WM components with respect to age (up to 15 years old) were computed. All the regressions were significant ($p < 0.001$) (see Fig. 1). Fig. 1 clearly shows a linear increase of direct scores with age for PL, VSS and CEE across these age groups.

To study the WM components, order of maturation a two-factor ANOVA was carried out to determine whether the variables gender and age were significant. The results show that the age variable measured in years were significant for the three components of WM: PL ($F [7241] = 12.87, p < 0.001, \eta^2 = 0.272$ and observed power=1.000.; VSS ($F [7241] = 27,583, p < 0.001, \eta^2 = 0.445$ and observed power=1.000; CE ($F [7241] = 34,267, p < 0.001, \eta^2 = 0.499$ and observed power=1.000.

The Fig. 2 displays the increase of WM performance with age for the PL, VSS and CE components during childhood and adolescence, and the stabilization of direct scores values during early adulthood, in both: male and females. Bonferroni post-hocs were computed to show the significant differences between the age groups (see Table 2), which could

provide information on the maturation order of the three WM components. The CE component presents the longest period to mature, showing statistically significant differences between the older groups up to the ages of 14–15 years, which implies that the complete maturation of this component does not end until the adolescent period (see Fig. 2 and Table 2). The direct scores of the VSS show statistically significant differences between the oldest groups and the 10–11-year group, but not with older groups than 10–11 years. The PL direct scores reached its peak of maturity at the age of 8–9 years because this age group was the most aged groups showing statistically significant differences with the older groups.

A peculiar result was observed in the 16–17-year group, which presents a significant difference with all the groups of lower age (see Fig. 2 and Table 2). These results represent that the verbal memory capacity is increased in the age of 16–17 years, with extremely high scores in this group. In the CE the 16–17-year-old group also showed a significant direct score increase, similarly to PL.

The gender factor was significant in VSS ($F [1, 241] = 3.894, p < 0.05, \eta^2 = 0.016$ and observed power=0.5), and CE ($F [1, 241] = 8.086, p < 0.005, \eta^2 = 0.032$ and observed power=0.8). The descriptive statistics of the direct scores of the three WM components considering the age group and gender are displayed Fig. 2 and Table 3. The gender differences were due to higher direct scores of males in the CE and VSS (see Table 3).

4. Discussion and conclusions

The present study has two main objectives, the first was to replicate the linear relationship between the direct scores, expressed in standardized scores, of the WM components with age, as carried out by Gathercole et al. (2004), and the second to analyze the maturation order of the three WM components (VSS, PL and CE) that make up the multi-component model of WM, by means of Bonferroni comparisons between the direct scores of the different age groups.

For the first objective, the main findings were that there is a linear increase with age of the direct scores of the WM three components expressed in standardized scores, as it was previously obtained in a sample between 4 and 15 years old (Gathercole et al., 2004). These authors found that in the last age group there was a tendency towards the stabilization of Z-scores, however, they did not find a differential dynamic in the order of maturation of the WM components. In the results shown in Fig. 1, a certain moderation of growth in the Z-scores of the three components can be seen as age increases, which would replicate the results obtained by Gathercole et al. (2004). However, a differential maturational dynamic between the different subtests of the three components was not reported in this study, which in part can be explained by the Z transformation, $((\text{WM direct scores} - \text{mean of direct scores}) / \text{Standard deviation})$ that could be producing a certain homogenization of the data of the three components. For this reason, we propose that it would be better to work with direct scores and with a broader age range to establish the order of maturation of the WM components.

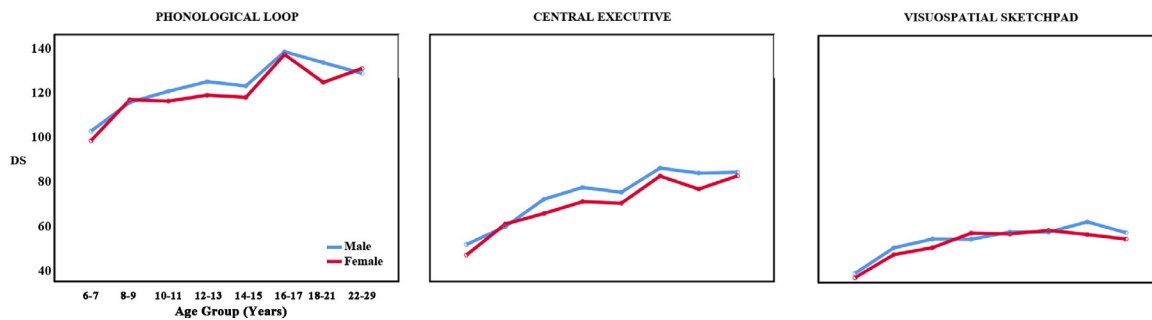


Fig. 2. Direct scores (DS) of the Phonological Loop, the Visuospatial-Sketchpad and Central Executive with respect to the age groups.

Table 2

Statistical significance of the age groups comparisons using the Bonferroni corrections for multiple comparisons.

<i>Phonological loop</i>								<i>Visuo-spatial sketchpad</i>							
8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-21	22-29		8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-21	22-29	
.001	.001	.001	.001	.001	.001	.001	6-7	.001	.001	.001	.001	.001	.001	.001	6-7
				.001	.001	.020	8-9			.006	.001	.001	.001	.001	8-9
				.001			10-11						.014		10-11
				.022			12-13								12-13
				.012			14-15								14-15
							16-17								16-17
							18-21								18-21
							22-29								22-29

<i>Central Executive</i>							
8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-21	22-29	
.001	.001	.001	.001	.001	.001	.001	6-7
		.001	.002	.001	.001	.001	8-9
				.001	.006	.001	10-11
						.027	12-13
				.016		.007	14-15
							16-17
							18-21
							22-29

Table 3

Descriptive statistics of direct scores of the phonological loop (PL), visuospatial sketchpad (VSS) and central executive CE), for males and females.

	1=MALE				2=FEMALE			
	Min	Max	Mean	Std	Min	Max	Mean	Std
PL	81	174	122,4	19,3	79	172	119,7	19,6
VSS	27	72	53,64	9,7	29	75	51,89	9,7
CE	37	108	73,2	16	28	106	69,25	16,1

For the second objective, the Bonferroni-type comparisons would permit to define at which age the WM direct scores would level off. The PL direct scores (verbal memory) stabilize in the 8–9 age group (with the exception of the 16–17 group that corresponded to a special situation discussed later). The latter result is coincident with the leveling off in the age group of 10–11 years obtained by Alloway et al. (2006). VSS reaches stability around 11 years and finally, the executive component is the last to mature reaching stability around 14–15 years. These results obtained with respect to the WM components maturational order contradict what was expressed in the study by Gathercole et al. (2004) of a similar maturation order of the three WM components, probably due to the fact that the age range selected by these authors ended at 15 years, and because these authors used Z-scores. The late maturation

of the CE obtained in present report could be due to the slower maturation of the prefrontal cortex, since the maturation of the anterior regions such as the prefrontal cortex begins in childhood, but continues until adolescence and adulthood (Luna et al., 2010), and that activities related to executive functions are related to a variety of areas within the frontal lobes (Manoach et al., 1997; Collette and Van der Linden, 2002). The prefrontal cortex is largely responsible for executive functions because it sends and receives information through cognitive sensory and motor systems. It is divided into three parts: dorsolateral prefrontal cortex, middle prefrontal cortex, and orbitofrontal cortex (Fuster, 2002). Regarding the relationship of the prefrontal cortex with working memory, the dorsolateral prefrontal cortex is responsible for influencing activities related to planning, problem solving, working memory, etc. (Casey et al., 1997; Diamond, 2002; Fuster, 2002; Hoshi and Tanij, 2004; Konishi et al., 2002). During childhood there is an accelerated development of executive functions that is not considered linear, but has stages due to the functional and structural changes of the central nervous system (Diamond, 2001), continuing its development until the third decade of life (Tsujimoto, 2008), thus being the prefrontal cortex together with the supralimbic region the last to complete its development (Lenroot and Giedd, 2006). Therefore, the protracted maturation of prefrontal cortex would determine the late maturation of the CE.

Present results showed an anomaly in the results obtained for the age group of 16 and 17 years, a group that shows a notable increase

in the PL scores. The reason for this particular result is not clear, and could be due to the recruitment of a group of brilliant subjects carried out not completely randomly for this age group, or perhaps due to a genuine effect. A larger sample size would be required to resolve this anomaly. In any case, the most plausible hypothesis is of a very early maturation of the PL given that the direct scores of the phonological loop of the oldest groups are no longer statistically significantly different from the age group of 10–11 years (except for the aforementioned group 16–17 years), a result also obtained for short-term verbal memory by Alloway et al. (2006). Furthermore, from the point of view of WM models, it has been proposed that the improvement of PL supposes a support for recoding that would improve the performance of any other type of WM, so that its maturation should precedes that of any other component (Gathercole et al., 2004).

Finally, small amplitude gender differences are observed for the VSS and CE, in which men showed a higher performance compared to women. Given the small amplitude of these gender effects and that this gender influence has not been replicated by other similar studies with larger samples (Alloway et al., 2006), or only in a few subtests (Gathercole et al., 2004), the gender differences obtained in present report must be cautiously considered.

Limitations

The peculiar result of the age group of 16–17 years old could be due to biased sampling or to a genuine WM performance burst at this age. Therefore, a replication study would be needed to confirm or reject such result.”

Credit roles of authors

Raquel Muñoz-Pradas: Conceptualization, Data curation; Formal analysis; Methodology; Project administration; Roles/Writing - original draft; Writing - review & editing.

Miriam, Díaz-Palacios: Conceptualization, Data curation; Formal analysis; Methodology; Project administration; Roles/Writing - original draft; Writing - review & editing.

Elena I. Rodríguez-Martínez: Conceptualization; Data curation; Investigation; Methodology.

Carlos M. Gómez: Conceptualization, Funding acquisition; Methodology; Project administration; Supervision; Visualization; Roles/Writing - original draft; Writing - review & Editing.

Data and code availability

Due to the sensitive nature of the questions asked in this study, survey respondents were assured raw data would remain confidential and would not be shared.

The research protocols used in this research were approved by the ethics committee of the University of Seville.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This study was supported by the Spanish Agencia Estatal de Investigación (AEI) (PID2019-105618RB-I00) (FEDER funds), and by the Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa of the Junta de Andalucía (P20_00537).

References

- Alloway, T.P., Gathercole, S.E., Pickering, S.J., 2006. Verbal and visuospatial short-term and working memory in children: are they separable? *Child Dev.* 77 (6), 1698–1716. doi:10.1111/j.1467-8624.2006.00968.x, Nov-DecPMID: 17107455.
- Baddeley, A.D., Hitch, G., 1974. Working memory. In: Bower, G.H. (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in Research and Theory*, 8. Academic Press, New York, pp. 47–89.
- Baddeley, A., 1992. Working memory. *Science* 255 (5044), 556–559. <http://doi.org/10.1126/science.1736359>.
- Baddeley, 2000. The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends Cogn. Sci.* 4 (11), 417–423. doi:10.1016/s1364-6613(00)01538-2, 2000 Nov 1.
- Baddeley, A., 2012. Working memory: theories, models, and controversies. *Annu. Rev. Psychol.* 63, 1–29.
- Casey, B.J., Trainor, R.J., Orendi, J.L., Schubert, A.B., Nystrom, L.E., Giedd, J.N., Castellanos, F.X., Haxby, J.V., Noll, D.C., Cohen, J.D., Forman, S.D., Dahl, R.E., Rapoport, J.L., 1997. A developmental functional MRI study of prefrontal activation during performance of a Go-No-Go task. *J. Cogn. Neurosci.* 9 (6), 835–847. doi:10.1162/jocn.1997.9.6.835, NovPMID: 23964603.
- Carretti, B., Borella, E., Cornoldi, C., De Beni, R., 2009. Role of working memory in explaining the performance of individuals with specific reading comprehension difficulties: a meta-analysis. *Learn Individ. Differ.* 19 (2), 246–251. doi:10.1016/j.lindif.2008.10.002.
- Collette, F., Van der Linden, M., 2002. Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 26 (2), 105–125. doi:10.1016/S0149-7634(01)00063-X.
- Cowan, N., 1995. *Attention and Memory: An Integrated Framework*. Oxford University Press doi:10.1093/acprof:oso/9780195119107.001.0001.
- Gathercole, S., Pickering, S., 2001. *Working Memory Test Battery for Children (WMTB-C)*. Pearson Education, Ltd., London.
- Gathercole, S.E., Pickering, S.J., & Ambridge, B. (2004). The structure of working memory between the ages of 4 and 15. *40*, 177–190.
- Gómez, C.M., Barriga-Paulino, C.I., Rodríguez-Martínez, E.I., Rojas-Benjumea, M.Á., Arjona, A., Gómez-González, J., 2018 Mar 28. The neurophysiology of working memory development: from childhood to adolescence and young adulthood. *Rev. Neurosci.* 29 (3), 261–282. doi:10.1515/revneuro-2017-0073, PMID: 29176031.
- Gómez, C.M., Ruíz-Martínez, F.J., Angulo, B., Rodríguez-Martínez, E.I., 2021. Chapter 38 - Working memory: physiology and neurodevelopment. In: Martin, Colin R., Preedy, Victor R., Rajendram, Rajkumar (Eds.), *Factors Affecting Neurodevelopment*. Academic Press, pp. 447–458. doi:10.1016/B978-0-12-817986-4.00038-9 Editor(s).
- Diamond, A., 2001. A model system for studying the role of dopamine in prefrontal cortex during early development in humans. In: Nelson, En C., Luciana, M. (Eds.), *Handbook of Developmental Cognitive Neuroscience*. MIT Press, Cambridge, EE.UU, pp. 433–472.
- Diamond, A., 2002. Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: cognitive functions, anatomy, and biochemistry. In: Stuss, En D.T., Knight, R.T. (Eds.), *Principles of Frontal Lobe Function*. Oxford University Press, Londres, UK, pp. 466–503.
- Fuster, J.M., 2002. Frontal lobe and cognitive development. *J. Neurocitol.* 31, 373–385.
- Hoshi, E., Tanji, J., 2004. Area-selective neuronal activity in the dorsolateral prefrontal cortex for information retrieval and action planning. *J. Neurophysiol.* 91, 2707–2722.
- Justicia, F.J., 1995. *Vocabulary development: frequency dictionary. The Development of the Vocabulary: Frequency Dictionary*. Universidad de Granada, Granada, Spain.
- Klingberg, T., 2006. Development of a superior frontal-intraparietal network for visuo-spatial working memory. *Neuropsychologia* 44 (11), 2171–2177. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.019.
- Konishi, S., Hayashi, T., Uchida, I., Kikyo, H., Takahashi, E., Miyashita, Y., 2002. Hemispheric asymmetry in human lateral prefrontal cortex during cognitive set shifting. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 99 (11), 7803–7808.
- Lenroot, R.K., Giedd, J.N., 2006. Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience and Biobehavioral Review* 30, 718–729.
- Logie, R.H., Pearson, D.G., 1997. The inner ear and the inner scribe of visuo-spatial working memory: evidence from developmental fractionation. *Eur. J. Cognit. Psychol.* 9, 241–257.
- Logie, R.H., Zucco, G.M., Baddeley, A.D., 1990. Interference with visual short-term memory. *Acta Psychol. (Amst)* 75 (1), 55–74. doi:10.1016/0001-6918(90)90066-O.
- Luna, B., Padmanabhan, A., O’Hearn, K., 2010. What has fMRI told us about the development of cognitive control through adolescence? *Brain Cogn.* 72 (1), 101–113. doi:10.1016/j.bandc.2009.08.005.
- Manoach, D.S., Schlaug, G., Siewert, B., Darby, D.G., Bly, B.M., Benfield, A., et al., 1997. Prefrontal cortex fMRI signal changes are correlated with working memory load. *Neuroreport* 8 (2), 545–549. doi:10.1097/00001756-199701200-00033.
- Nelson, C.A., 1995. The ontogeny of human memory: a cognitive neuroscience perspective. *Dev. Psychol.* 31 (5), 723–738. doi:10.1037/0012-1649.31.5.723.
- Nelson, C.A., 2000. Neural plasticity and human development: the role of early experience in sculpting memory systems. *Dev. Sci.* 3 (2), 115–136. doi:10.1111/1467-7687.00104.
- Pascual-Leone, J., Baillargeon, R., 1994. Developmental measurement of mental attention. *Int. J. Behav. Dev.* 17, 161–200.
- Passolunghi, M.C., Costa, H.M., 2019. Working memory and mathematical learning. In: InFritz, A., Haase, V.G., Räsänen, P. (Eds.), *International Handbook of Mathematical Learning Difficulties*. Springer International Publishing, pp. 407–421. doi:10.1007/978-3-319-97148-3.25.

Pickering, S.J., Gathercole, S.E., Peaker, M., 1998. Verbal and visuo-spatial short-term memory in children: evidence for common and distinct mechanisms. *Mem. Cognit.* 26, 1117–1130.

Raghubar, K.P., Barnes, M.A., Hecht, S.A., 2010. Working memory and mathematics: a review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learn. Individ. Differ.* 20 (2), 110–122. doi:10.1016/j.lindif.2009.10.005.

Tourva, A., Spanoudis, G., Demetriou, A., 2016. Cognitive correlates of developing intelligence: the contribution of working memory, processing speed and attention. *Intelligence* 54, 136–146.

Tsujimoto, S., 2008. The prefrontal cortex: functional neural development during early childhood. *Neuroscientist* 14, 345–358.



Inter-group and Inter-individual variability in working memory from childhood to emerging adulthood

Raquel Muñoz-Pradas, Irene Íñigo-Ruíz, Elena I. Rodríguez-Martínez, Carlos M. Gómez*

Human Psychobiology lab, Experimental Psychology Department, Psychology school, University of Sevilla, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Working Memory
Working Memory Test Battery for Children
Development
Hitch and Baddeley model

ABSTRACT

This report is a cross-sectional study aiming to establish the status of age inter-group and individual variability for Working Memory (WM) for the three WM components: Phonological loop (PL), Visuo-spatial Sketchpad (VSS) and Central executive (CE). The direct scores of the CE, the PL and the VSS were obtained in a sample of 258 subjects between 6 and 26 years. The obtained results indicate an increase of direct scores with age that was modeled by an age inverse function. The absolute age inter-group variability increased with age while the relative variability was constant across ages. The WM individual developmental variability showed that although a single principal component would explain the total variability, there was a closer relationship between the development of CE and PL with respect to VSS. The obtained results suggest that the range of WM relative competence is preserved along development which would favour the ecological adaptive value of WM across ages.

1. Introduction

1.1. Working memory: Definition and components

WM corresponds to a crucial executive function needed for subjects' cognitive operations, and is considered as one of the basic executive functions during development (Miyake et al., 2000). One of the most accepted definitions of WM is Postle's (2006), in which "working memory is the retention of information in conscious perception, its manipulation and its use in guiding behavior, when that information is not present in the environment".

In 1974, Baddeley and Hitch described a WM model based on empirical results (Baddeley & Hitch, 1974; Baddeley, 2012) with a three-component structure: Two systems related to information storage, VSS and PL, and a CE. Pickering and Gathercole (2001) have developed the Working Memory Test Battery for children (WMTBC) that operationalizes the measure of these three components with a developmental approach. WMTBC is conceptually based on Baddeley and Hitch's (1974) Working Memory model.

The PL is responsible for the temporary maintenance of verbal and auditory information in the brain. The VSS is involved in the cognitive retention and processing of visual and spatial information for a limited time. The VSS and the PL are subordinated to the Central Executive (CE), since their functions are distributing the information received among

the different subsystems and coordinating the cognitive processes carried out by them. It is also in charge of the attention and strategic aspects of cognitive processes (Baddeley, 2010; and is the link between subsystems and long-term memory (McCabe et al., 2010). According to Baddeley (2010), there is a fourth component in the WM model, called the episodic buffer, which corresponds to a system of limited and temporary storage capacity that can relate and integrate information from the other subsystems and long-term memory into a single episodic representation.

WM is related to the maintenance and manipulation of information and can be metaphorically visualized as a mental blackboard where the intended tasks are solved (Baddeley, 2012). It is characterized by a wide range of information content, either external or internal information, since these can range from elements of long-term memory, to newly acquired information, or even the results of operations that take place in WM. However, there are limitations in the processing of information by WM: restricted storage capacity, and limited duration of information maintenance (Cowan, 2010). These processing limitations are related to the interferences that competing stimuli easily produces in WM. The WM construct is related to that of fluid intelligence (Engle et al., 1999), and is of particular importance in the development of curricular activities. According to Cowan (2014), WM is a crucial part of cognitive processing and allows to carry out more complex and necessary functions of daily life, such as linguistic comprehension, reading, reasoning, and

* Corresponding author. Prof. Carlos M. Gómez, Departamento de Psicología Experimental, c/Camilo José Cela s/n, Sevilla 41018. Spain.

E-mail addresses: raqmumpra@alum.us.es (R. Muñoz-Pradas), ireneinigo@outlook.es (I. Íñigo-Ruíz), elisroma@us.es (E.I. Rodríguez-Martínez), cgomez@us.es (C.M. Gómez).

<https://doi.org/10.1016/j.crbeha.2021.100041>

Received 9 March 2021; Received in revised form 13 April 2021; Accepted 16 April 2021

2666-5182/© 2021 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

others cognitive functions. It is also key in the interaction between the information received and long-term memory by retrieving stored information that may be relevant, reinforcing its role in the development of curricular activities (Cowan, 2014).

1.2. Interdependence of developmental individual differences of the Working Memory components (IDWM)

WM development has been studied through experimental tasks, but also by means of psychometric batteries, such as the WMTBC which operationalizes the Hitch and Baddeley WM model (Gathercole and Pickering, 2000). As the present report deals with the maturation of the WM component model, we would comment only aspects related to the WM components development. (Hitch et al., 1988). The structure in the three components is clearly attained at 7 years of age in terms of organization and strategies (Gathercole and Hitch, 1993). The format of coding information changes with age, with young children using visual information, and adding verbal recoding of information after 8 years old by using the PL (Hitch et al., 1988). The verbal formatting, which would permit the use of the verbally based rehearsal mechanism, would be part of the increase in visuospatial WM performance with age, although other mechanisms not well understood would also be related to the increase of VSS capacity with age. An additional factor for increased efficacy would be in the increase of the rehearsal rate that would liberate WM space facilitating the capacity increase of verbal information (Hulme et al., 1984).

Concerning the structural development of WM, the PL and VSS develop independently in the 5-8 years old period (Pickering et al., 1998). The independence of the VSS and PL was confirmed in preadolescents (11–14 years; Jarvis and Gathercole (2003). The PL and CE showed a moderate association in 6- and 7-year-old children (Gathercole and Pickering, 2000). In a confirmatory analysis and by using the WMTBC in children and adolescents (6 to 15 years) the independence of the three WM components was demonstrated (Gathercole et al., 2004; Barriga-Paulino et al., 2016). Despite the statistical independence between the three component a closer association between CE and PL than between CE and VSS was found. The WM reaches a plateau at 15 years, with CE attaining the highest performance later than the slave systems. The increased efficiency of WM operations with age would permit the release of space facilitating the increase of capacity which is observed in WM (Case, 1992). Interestingly, the WM individual variability is addressed in scientific literature in relation to individual variability of other cognitive functions such as processing speed (Mella et al., 2015) fluid intelligence (Fry and Hale, 2000), but only in a limited manner by itself (Gathercole et al., 2004).

1.3. Individual differences variability between age groups (age inter-group variability)

Variability refers to the differences between the factors measured at different measurement points. In the present report the main objective is to observe if the magnitude of individual variability of WM direct scores differs between age groups during children and adolescent development (age Inter-group WM variability). Although age inter-group variability is described in WM psychometric tests (Pickering and Gathercole, 2001; Rosselli-Cock et al., 2004), however no effort is made in order to understand if the intergroup absolute variability (measured as standard deviation of direct scores), and relative variability (measured as coefficient of variation of direct scores) changes in the different age groups. As far as we know this aspect has not been studied in the WM literature. In particular, and concerning more complex measures of WM as those included in the Baddeley and Hitch model the magnitude of individual differences between difference age groups has not been studied. This aspect is of societal importance given that subjects of a given age group have to share the same ecological niches and be under the same social pressure, as for instance the same classroom and curricula

demands. Therefore, the knowledge of the expected variability in individual differences for each age group should be a primary concern for educators.

1.4. Objectives and hypotheses

The aims of the present report are (i) to determine if inter-group individual differences variability of direct scores of WMTBC differs in different age groups, and (ii) if there is a relationship between the development of the different components of the WMTBC Baddeley and Hitch model. With respect to the inter-group differences variability between age groups there are no specific hypotheses. For the second objective, a higher relationship between the direct scores of CE with PL, than with VSS is expected following previous results (Gathercole et al., 2004). The latter objective corresponds to computing the individual variability interdependence between the direct scores of WMTBC across development.

2. Material and methods

2.1. Sample

The database is made up of 258 subjects, approximately distributed equally by gender: 134 males ($M = 14.49$, $St = 6.25$; range = 6–26), and 124 females ($M = 14.35$, $St = 5.88$; range = 6–26). A subsample of 167 (Rodríguez-Martínez et al., 2013) and 108 subjects (Barriga-Paulino et al., 2016) were previously used for other complementary purposes. For the analysis of the inter-group WM variability subjects between 6 and 18 years were organized in groups of one year. Due to a reduced number of participants from 18 years of age to 26 years, subjects were organized in groups with a range of 2 years instead of 1 year, in order to match the groups size with the number of participants per group under 18 years of age. Table 1 shows the distribution of subjects grouped by years. The sample was recruited from the local community and tested in a lab located at the Psychology school.

The selected subjects did not report to have been diagnosed of any neurological, psychological or psychiatric impairment and they were not taking any psychotropic pharmaceutical compound. Additionally, all participants in school and high school age were enrolled in the grade corresponding to their biological age. The participants were extracted from a middle-class socioeconomic background.

Experiments were conducted with the informed and written consent of each participant (parents/tutors in the case of the children and adolescents) following the Helsinki protocol. The study was approved by the Bioethical Committee of the Junta de Andalucía (<https://www.juntadeandalucia.es/salud/portaldeetica/>).

2.2. Testing

2.2.1. Working Memory Test Battery for Children (WMTBC)

The WMTBC by Pickering and Gathercole (2001), which is based in the WM model of Baddeley (2012) was used. The researcher obtained the informed consent signed by the subjects participating in the study. The test measures three WM components: PL, VSS and CE. This test is made up of 9 subtests that were applied in the following order: (1) Digit Recall, (2) Word List Matching, (3) Word List Recall, (4) Nonword List Recall, (5) Block Recall, (6) Mazes Memory, (7) Listening Recall, (8) Counting Recall, and (9) Backward Digit Recall. The subtests 1, 2, 3 and 4 measure the phonological loop, subtests 5 and 6 measure the visuospatial sketchpad, and subtests 7, 8 and 9 measure the central executive.

The original battery was in English, but the battery used in our laboratory was translated into Spanish (Rodríguez-Martínez et al., 2013). The following subtest were applied as in the original battery, just translating from English when needed: The Digit Recall, Backward digit recall, Block Recall, Counting Recall, Mazes memory. However, for the

Table 1
Subjects age and gender.

Age	Number of subjects	Gender ratio
6	18	Male: 9 Female: 9
7	14	Male: 9 Female: 5
8	19	Male: 8 Female: 11
9	16	Male: 8 Female: 8
10	18	Male: 11 Female: 7
11	14	Male: 7 Female: 7
12	16	Male: 9 Female: 7
13	16	Male: 8 Female: 8
14	15	Male: 7 Female: 8
15	11	Male: 6 Female: 5
16	12	Male: 7 Female: 5
17	12	Male: 5 Female: 7
18	17	Male: 8 Female: 9
20	16	Male: 8 Female: 8
22	16	Male: 8 Female: 8
24	16	Male: 8 Female: 8
26+	12	Male: 8 Female: 4
	258	

following subtests some specific criteria were needed for the Spanish translation:

- For the Word List Matching and Word List Recall subtests, disyllabic words obtained from a word frequency list used by children were employed, with similar lengths to original words and high frequency of use, in order to facilitate the testing of young children (Justicia, 1995).
- For the Nonword List Recall subtest, we used the same words as on the previous subtests. To convert words into nonwords, we changed the vowel order within words and the order of the syllabi that composed each word.
- For the Listening Recall subtest, we simply translated the original sentences from English to Spanish, in order to maintain the reliability of the task. The Direct scores obtained from the WMTBC were used for statistical analysis.

The stimuli used in the visuo-spatial tests of the WMTB-C are selected on the basis of being very difficult to recodify verbally because they do not correspond to namable family objects. On tasks involving such materials, older children and adults should use nonverbal forms of the short-term memory store.

2.3. Possible gender differences

Gender was evaluated as a possible significant variable in the WM direct scores obtained using a T-test for independent samples. There were no statistically significant differences in the PL and VSS direct scores, however, in the direct CE scores, a significant difference at the limit of Type I error significance ($p = .049$) was observed. The limited gender differences precluded to separate by gender for the sake of simplicity.

2.4. Statistical analysis

The first aspect analyzed was to determine which type of regression model best fits the improvement with age of the direct WM scores: The regression of each of the direct scores obtained from WMTBC vs. age in days was computed using linear, logarithmic, inverse, quadratic, cubic, potential, growth and exponential models as implemented in SPSS Statistics 26. As the inverse regression was selected to model the functional relationship between direct scores and age (see below) (direct scores = $b_0 + (b_1/\text{age})$), the residuals between the recorded direct scores and the predicted values were obtained for subsequent analysis (age residuals from now).

For the analysis of age inter-group WM direct scores variability, the following strategies were used:

-Absolute individual differences variability of the different age groups:

For this objective, the standard deviation (SD) of the direct scores of CE, PL and VSS in each age group was computed and then a linear regression of the latter value vs. the mean age of the age group was computed (see Figs. 2 A-C). As each standard deviation WM component regression presented an age group that could be classified as an outlier ($-2.8 < z < 2.8$), which corresponds to $p = 0.005$ bilateral under the normal probability curve, the regression of standard deviations of the direct scores in each age group vs. group age was repeated again eliminating the outlier in each WM component regression (see Figs. 2 D-F).

-Relative inter-individual variability in the different age groups:

To reduce the effect of the absolute value of direct scores in the computation of age inter-group variability through standard deviation, which is affected by the numbers magnitude, two different procedures were applied: The coefficient of variation of direct scores in each age group (CV), and a method based on the residuals of the direct scores vs. age. For the former, the CV ($CV = SD/\text{mean}$) obtained in each age group and regressed against group age. The method of residuals pretends to obtain a measure of individual variability discounting the effect of maturation by obtaining the predicted direct score from the age, and subtracting the predicted values from the empirical direct scores. The age residuals were obtained from the regression between the direct scores of WMTBC vs. age using the inverse model as indicated previously in the results section (see Table 2). To determine the possible relationship of the age inter-group relative variability with age based on the residual direct scores, the linear regression of the standard deviation of the age residuals scores in each age group vs. the age group was computed.

-Individual variability interdependence between the direct scores of WMTBC across development:

Two different strategies were used to observe if a given subject which is advanced or protracted in a given WM direct score with respect to the expected value for his/her age is also advanced or protracted in another measurement. The methods would be based in Principal Component analysis (PCA) and in the linear regressions of the age residuals. The use of age residuals in both methods, obtained using an age inverse model, permitted to focus the analysis on the individual variability over or under the predicted values for the subject's age, reducing the impact of the age factor that would absorb most of the data variability. PCA permits to obtain a reduced set of latent variables explaining the variance of the empirical variables (Gorsuch, 1983). The Varimax orthogonal rotation would be applied to the variables introduced in the PCA. The Varimax rotation, while keeping orthogonality between components facilitates results interpretation given that it rotates the axes to explain the higher proportion of variability in a reduced number of components. The criterion followed to decide which components are extracted was the Kayser criterion (eigenvalues > 1). In order to interpret the meaning of the extracted components, the values of the loading components were taking into account. The loading component represents the correlation between the scores obtained for each subject in each PCA component vs. the empirical scores of a given variable. Before doing the PCA and the regressions the residuals having a z-value higher than 2.8 or lower than -2.8 were removed (1 case for VSS, 1 case for CE).

Table 2

Summary of model and parameter estimates in Working Memory direct scores vs age regressions. Dependent variables were Phonological Loop, Visuo-spatial Sketchpad and Central Executive direct scores. The independent variable was Age measured in days.

Model summary and parameter estimates Phonological Loop									
Equation	Model summary					Parameter estimates			
	R ²	F	DF1	DF2	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,16	50,16	1	255	<i>p</i> < 0.001	101,57	,004		
Logarithmic	,20	63,74	1	255	<i>p</i> < 0.001	-56,32	20,8		
Inverse	,22	72,39	1	255	<i>p</i> < 0.001	142,67	-98585,3		
Quadratic	,22	36,77	2	254	<i>p</i> < 0.001	70,82	,016	-1,018E-6	
Cubic	,22	24,77	3	253	<i>p</i> < 0.001	54,96	,025	-2,762E-6	9,589E-11
Potencial	,21	68,34	1	255	<i>p</i> < 0.001	26,59	,177		
Growth	,17	52,97	1	255	<i>p</i> < 0.001	4,61	3,031E-5		
Exponential	,17	52,97	1	255	<i>p</i> < 0.001	101,4	3,031E-5		
Model summary and parameter estimates Visuospatial Sketchpad									
Equation	Model summary					Parameter estimates			
	R ²	F	DF1	DF2	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,21	71,02	1	255	<i>p</i> < 0.001	41,53	,002		
Logarithmic	,30	110,00	1	255	<i>p</i> < 0.001	-56,00	12,77		
Inverse	,37	151,00	1	255	<i>p</i> < 0.001	66,72	-63847,17		
Quadratic	,41	88,88	2	254	<i>p</i> < 0.001	13,96	,013	-9,130E-7	
Cubic	,42	63,07	3	253	<i>p</i> < 0.001	-5,87	,025	-3,094E-6	1,200E-10
Potencial	,31	116,61	1	255	<i>p</i> < 0.001	5,385	,266		
Growth	,22	72,71	1	255	<i>p</i> < 0.001	3,716	4,255E-5		
Exponential	,22	72,71	1	255	<i>p</i> < 0.001	41,098	4,255E-5		
Model summary and parameter estimates Central Executive									
Equation	Model summary					Parameter estimates			
	R ²	F	DF1	DF2	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,37	151,96	1	255	<i>p</i> < 0.001	46,86	,004		
Logarithmic	,43	199,25	1	255	<i>p</i> < 0.001	-146,13	25,52		
Inverse	,47	226,90	1	255	<i>p</i> < 0.001	97,25	-119000,72		
Quadratic	,47	112,68	2	254	<i>p</i> < 0.001	14,61	,017	-1,068E-6	
Cubic	,47	76,08	3	253	<i>p</i> < 0.001	-2,03	,027	-2,898E-6	1,006E-10
Potencial	,45	214,82	1	255	<i>p</i> < 0.001	2,57	,386		
Growth	,38	156,10	1	255	<i>p</i> < 0.001	3,87	6,704E-5		
Exponential	,38	156,10	1	255	<i>p</i> < 0.001	48,14	6,704E-5		

In order to visualize more clearly the possible relationship of individual variability between the different WM direct scores, after discounting the effect of age, the age residuals of the direct scores vs. age were linearly regressed between them. With this method it would be possible to observe if one subject which is advanced or protracted in development in a certain measure is also delayed or protracted with respect to another.

3. Results

To evaluate the increase in direct scores with age and validate the most appropriate regression model to explain the WM direct scores of WMTBC components, the WM scores were regressed vs. the age with different models: linear, logarithmic, inverse, quadratic, cubic, potential, growth and exponential. Most models were significant for WMTBC direct scores (Table 2). In order to choose the same model for fitting all the variables the goodness of fit (as estimated by R²) in the different variables being high and the simplicity, the need for estimating less parameters was used. The inverse model fulfilled both criteria for the regressed variables (Table 2). The Fig. 1 shows the direct scores of WMTBC vs. age using an inverse model fitting.

To study the absolute variability of the direct scores with respect to the age groups, the SD of direct scores of each age group were linearly regressed vs. the age group (Fig. 1A-C). Only the phonological loop vs. age was statistically significant when regressed vs. age. However, one outlier (-2.8 < z < 2.8, *p* = 0.005 bilateral) was present in each of the age

Table 3

Loading components and explained variance of the components extracted after applying PCA to the age residuals of the WMTBC (258 subjects).

Component Matrix ^a	
	Component 1
Phonological loop residual direct scores	,842
Visuospatial Sketchpad residual direct scores	,497
Central Executive residual direct scores	,882
Explained variance 57.84%	

groups SD used for the regressions. Figs 1D-E, shows the regression of the age groups SD of the direct scores once the outliers were removed, showing a statistically significant increase of WM standard deviation with age for the three WM components.

With respect to the analysis of WM age inter-group relative variability obtained by linearly regressing the CV vs. age group for each WM model component direct scores were not significant. Similarly, the age residuals SD of WMTBC direct scores of each age group when regressed vs. group age were not statistically significant.

Individual variability interdependence between the direct scores of WMTBC across development:

One single component was extracted from the PCA of the age residuals direct scores obtained from WMTBC. The loading factors and the explained variance appears in Table 3. indicating a higher relationship of

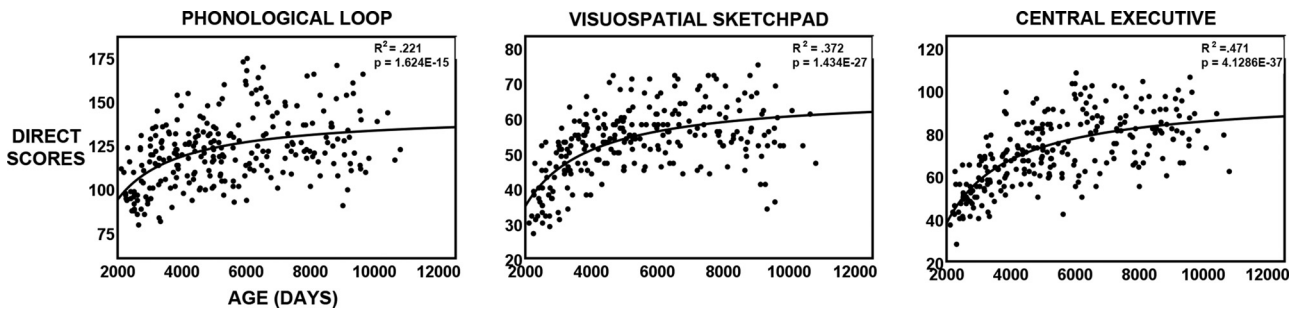


Fig. 1. Inverse regression of Working Memory components direct scores (Phonological loop, Visuospatial Sketchpad and Central Executive Direct Scores) vs. Age was measured in days. The age inverse model confirmed previous results obtained with a subsample of these data (Rodríguez-Martínez et al., 2013).

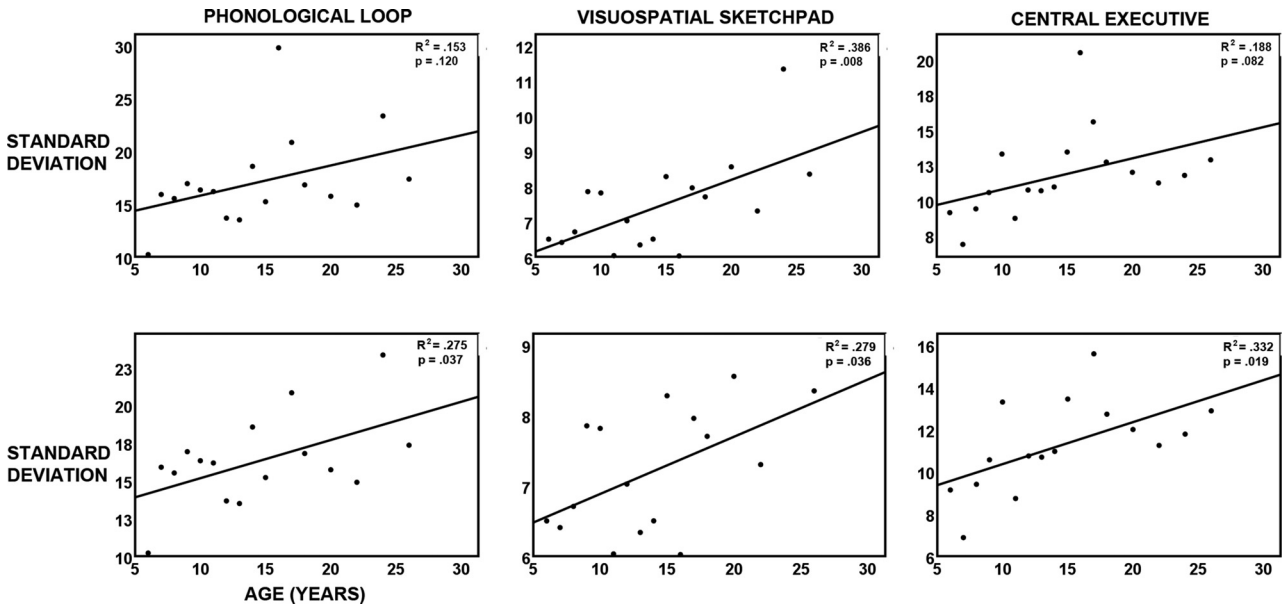


Fig. 2. Linear regressions of Phonological loop, Visuospatial Agenda and Central Executive Standard deviations vs. the age group age measured in years. No-excluding (above) and excluding (below) the Standard deviation outlier values.

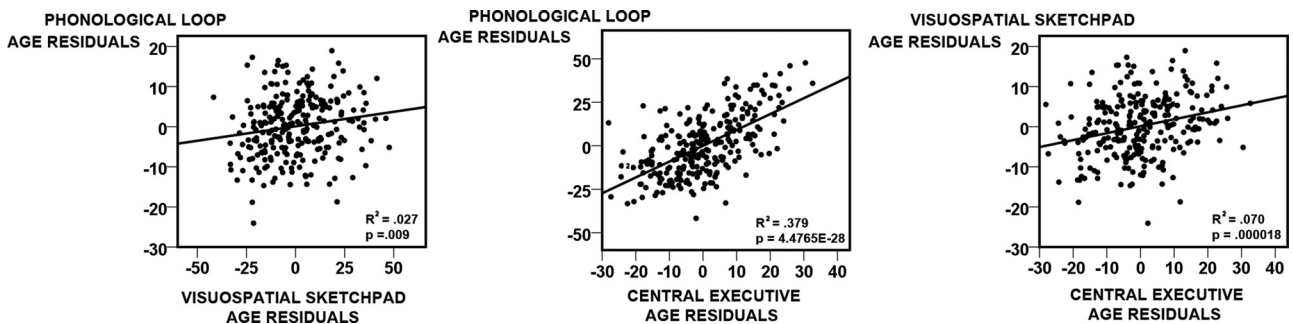


Fig. 3. Linear regression of the age residual scores of the Working Memory components.

the extracted component with CE and PL than with VSS. Fig. 3 shows the regressions of the age residuals of the WM components. All the WM age residuals regressions were significant (Fig. 3A, 3B and 3C). The strongest relationship of the PL with the CE age residuals (Fig. 3B) was evident, when compared with the regressions between the PL and VSS age residuals (Fig. 3A) and VSS and CE age residuals (Fig. 3C).

4. Discussion

The present study had two main objectives. The first objective tried to study whether the variability of the direct scores of the WM dif-

fers in the different age groups and the second one, to study a possible relationship of interdependence between the development of WM components. For the first objective the main findings were (i) the absolute variability of direct WM scores increases with the age of the groups and (ii) the relative variability did not increase with the group age. To accomplish the latter objective, it was needed to demonstrate that the increase of WM direct scores with age was modelled by an inverse relationship, with higher increase in WM capacities in youngest children with respect to adolescents, as it was previously demonstrated with a subsample of present data (Rodríguez-Martínez et al. 2013). For the second objective the developmental individual variability showed a strong relationship between CE with PL, while the

relationship between CE and VSS, and PL and VSS development was lower.

The present study concludes that there is an increase in the inter-group absolute variability of WM with age, probably due to an indirect effect of magnitude increase of direct scores with age, while there is a maintenance of the relative variability, once the effects of the numerical magnitude of direct scores are eliminated. The constancy of relative variability across ages would guarantee the same effective variability in each age group with the same level of interindividual competence in the different age groups. An economic metaphor would illustrate the importance of the maintenance of the relative age inter-group variability in WM. Suppose that children play economic games with cents, while adults invest in dollars: the magnitude is very different, but if the relative variability of economic capacity is maintained in children with respect to adults it would imply a high ecological validity of children play for future adult economic scenarios, something that would not be preserved if the relative inter-group economic capacity were not preserved in the different age groups during play and investment. The stable relative variability of WM across ages implies a similar variability in WM competence that would replicate in the ecological niche of children the ecological situation of adults with respect to WM capacity. The regulatory mechanism for this variability (evolutionary, social, cultural, etc.) would require further research. Although the absolute variability in age groups is commonly reported in WM psychometrical tests (Pickering and Gathercole, 2001; Rosselli-Cock et al., 2004), no further effort is being devoted for the exploration of the possible differences in absolute and relative variability between age groups. However, in computerized tasks the age intergroup variability shows a decrease in absolute variability of the number of errors with the increase of age in a variety of different types of computerized tasks (Rojas-Benjumea et al., 2013; Luna et al. 2004; Mondloch et al., 2003), although neither the absolute nor the relative age intergroup variability are explicitly studied, except for the Rojas-Benjumea study (2013) which showed a significant increase of absolute errors variability in children with respect to adolescents. The possible differences in absolute and relative variability performance variability across ages in psychometric and computerized tasks should be further studied given the already indicated importance to define the range of population processing capacities of subjects at different ages. The range of cognitive processing capacities is important for social niches of particular importance such as the classroom.

Concerning the IDWM which proposes the analysis of the interdependence of the development of the WM components, the PCA replicates previous results from Gathercole et al. (2004), showing that CE and PL present a closer relationship than CE with VSS and PL with VSS. This conclusion is not only supported by the presence of one PCA component which links closely CE with PL, but also by the age residuals regressions, that clearly showed that a given subject which is developmentally advanced or protracted with respect to CE is also delayed or protracted with respect to PL. The relative independence of the VSS and PL development confirms previous results obtained in children and preadolescents (Gathercole and Pickering 2000, Jarvis and Gathercole 2003; Gathercole et al., 2004). However, the significant developmental relationship between all the WM components suggests, as indicated by the single PCA obtained component, that the developmental independence of VSS is only relative and that there is a common factor underlying the WM components development, including the VSS which was obtained from subtests in which a careful design is followed to avoid a verbal recoding that naturally arises in children (Gathercole & Hitch 1993, Hitch and Halliday 1983; Hitch, Halliday, Schaafstal and Schraagen, 1988).

5. Conclusions

As conclusions (i) The WM capacity increase with age can be modelled by an inverse function, (ii) the preservation of a relative similar range of WM competence across age is obtained, suggesting that the

higher order cognitive strategies developed by subjects with different levels of WM capacity would be adaptive as age progresses, and (iii) a closer developmental association exists between CE and PL with respect to VSS.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This study was supported by a grant from the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness (PID2019-105618RB-I00, funded by FEDER). We are grateful to the children, adolescents and young adults who participated in the study

Credit roles of authors

Raquel Muñoz-Pradas: Conceptualization, Data curation; Formal analysis; Methodology; Project administration; Roles/Writing - original draft; Writing - review & editing.

Irene, Íñigo-Ruíz: Conceptualization, Data curation; Formal analysis; Methodology; Project administration; Roles/Writing - original draft; Writing - review & editing.

Elena I. Rodríguez-Martínez: Conceptualization; Data curation; Investigation; Methodology.

Carlos M. Gómez: Conceptualization, Funding acquisition; Methodology; Project administration; Supervision; Visualization; Roles/Writing - original draft; Writing - review & Editing.

Data and code availability

Due to the sensitive nature of the questions asked in this study, survey respondents were assured raw data would remain confidential and would not be shared.

The research protocols used in this research were approved by the ethics committee of the University of Seville.

References

- Baddeley, A.D., Hitch, G., 1974. Working Memory. *The Psychology of Learning and Motivation*. In: Bower, G.H. (Ed.), *Advances in Research and Theory*. Vol. 8. Academic Press, New York, pp. 47–89.
- Baddeley, 2010. The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends Cogn. Sci.* 4 (11), 417–423. doi:10.1016/s1364-6613(00)01538-2, 2000 Nov 1.
- Baddeley, A., 2012. Working memory: theories, models, and controversies. *Annu. Rev. Psychol.* 63, 1–29.
- Barriga-Paulino, C.I., Rodríguez-Martínez, E.I., Rojas-Benjumea, M.A., Gómez, C.M., 2016. Principal component analysis of working memory variables during child and adolescent development. *Span. J. Psychol.* 19, E62.
- Case, R., 1992. The mind's staircase: Exploring the conceptual underpinnings of children's thought and knowledge. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- Cowan, N., 2010. The Magical Mystery four: how is working memory capacity limited, and why? *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 19, 51–57. doi:10.1177/0963721409359277.
- Cowan, N., 2014. Working Memory underpins cognitive development, learning, and education. *Educ. Psychol. Rev.* 26 (2), 197–223. doi:10.1007/s10648-013-9246-y.
- Engle, R.W., Tuholski, S.W., Laughlin, J.E., Conway, A., 1999. Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: a latent-variable approach. *J. Exp. Psychol. Gen.* 128 (3), 309–331. doi:10.1037/0096-3445.128.3.309, 1999 Sep.
- Fry, A.F., Hale, S., 2000. Relationships among processing speed, working memory, and fluid intelligence in children. *Biol. Psychol.* 54 (Issues 1–3), 1–34 October.
- Gathercole, S.E., Hitch, G.J., 1993. Developmental changes in short-term memory: A revised working memory perspective. In: Collins, A., Gathercole, S.E., Conway, M.A., Morris, P.E. (Eds.), *Theories of memory*. Erlbaum, Hove, England, pp. 189–210.
- Gathercole, S.E., Pickering, S.J., 2000. Assessment of working memory in six- and seven-year-old children. *J. Educ. Psychol.* 92, 377–390.
- Pickering, S., Gathercole, S., 2001. Working Memory Test Battery for Children (WMTBC). Pearson Education, Ltd., London.
- Gathercole, S.E., Pickering, S.J., Ambridge, B., Wearing, H., 2004. The Structure of Working Memory From 4 to 15 Years of Age. *Dev. Psychol.* 40 (2), 177–190. doi:10.1037/0012-1649.40.2.177.
- Gorsuch, R.L., 1983. *Factor analysis*, 2nd. ed. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

- Hitch, G.J., Halliday, M.S., 1983. Working memory in children. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. B* 302, 324–340.
- Hitch, G.J., Halliday, M.S., Schaafstal, A.M., Schraagen, J.M.C., 1988. Visual working memory in young children. *Mem. Cognit.* 16, 120–132.
- Hulme, C., Thomson, N., Muir, C., Lawrence, A., 1984. Speech rate and the development of short-term memory span. *J. Exp. Child Psychol.* 38 (2), 241–253. doi:10.1016/0022-0965(84)90124-3.
- Jarvis, H.L., Gathercole, S.E., 2003. Verbal and non-verbal working memory and achievements on national curriculum tests at 11 and 14 years of age. *Educ. Child Psychol* 20, 123–140.
- Justicia, F.J., 1995. *El desarrollo del vocabulario: Diccionario de frecuencias*. [The development of the vocabulary: Frequency dictionary]. Universidad de Granada, Granada, Spain.
- Luna, B., Garver, E., Urban, T.A., Lazar, N.A., Sweeney, J.A., 2004. Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child. Dev.* 75, 1357–1375. doi:10.1111/j.1467-8624.2004.00745.x.
- McCabe, D.P., Roediger, H.L., McDaniel, M.A., Balota, D.A., Hambrick, D.Z., 2010. The relationship between working memory capacity and executive functioning: evidence for a common executive attention construct. *Neuropsychology* 24 (2), 222–243. doi:10.1037/a0017619.
- Mella, N., Fagot, D., Lecerf, T., de Ribaupierre, A., 2015. Working memory and intraindividual variability in processing speed: A lifespan developmental and individual-differences study. *Mem. Cognit.* 43 (3), 340–356. doi:10.3758/s13421-014-0491-1.
- Miyake, A., Friedman, N.P., Emerson, M.J., Witzki, A.H., Howerter, A., Wager, T.D., 2000. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognit. Psychol.* 41, 49–100.
- Mondloch, C.J., Geldart, S., Maurer, D., de Schonen, S., 2003. Developmental changes in the processing of hierarchical shapes continue into adolescence. *J. Exp. Child Psychol.* 84, 20–40. doi:10.1016/S0022-0965(02)00161-3.
- Pickering, S.J., Gathercole, S.E., Peaker, M., 1998. Verbal and visuo-spatial short-term memory in children: evidence for common and distinct mechanisms. *Mem. Cognit.* 26, 1117–1130.
- Postle, B.R., 2006. Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience* 139, 23–38.
- Rodríguez-Martínez, E.I., Barriga-Paulino, C.I., Rojas-Benjumea, M.A., Gómez, C.M., 2013. Spontaneous theta rhythm and working memory co-variation during child development. *Neurosci. Lett.* 550, 134–138. doi:10.1016/j.neulet.2013.06.054.
- Rojas-Benjumea, M., Quintero-Gallego, E., Zozaya, L., Barriga-Paulino, C., Gómez, C., 2013. Children cautious strategy and variable maturation time window for responding in a visual search task. *Psychology* 4, 19–32. doi:10.4236/psych.2013.41003.
- Rosselli-Cock, M., Matute-Villaseñor, E., Ardila-Ardila, A., Botero-Gómez, V.E., Tangarife-Salazar, G.A., Echeverría-Pulido, S.E., Arbelaez-Giraldo, C., Mejía-Quintero, M., Méndez, L.C., Villa-Hurtado, P.C., Ocampo-Agudelo, P., 2004. Evaluación Neuropsicológica Infantil (ENI): una batería para la evaluación de niños entre 5 y 16 años de edad. Estudio normativo colombiano. *Revista de neurología* 38 (8), 720–730.

Cognitive Processing

Relationship of Working Memory with K-BIT Matrices and Vocabulary in normodevelopment and ADHD children and adolescents

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	COPR-D-23-00058	
Full Title:	Relationship of Working Memory with K-BIT Matrices and Vocabulary in normodevelopment and ADHD children and adolescents	
Article Type:	Research Article	
Keywords:	ADHD, Central Executive, Phonological Loop, Visuospatial Sketchpad, K-BIT.	
Corresponding Author:	Carlos Gómez Universidad de Sevilla SPAIN	
Corresponding Author Secondary Information:		
Corresponding Author's Institution:	Universidad de Sevilla	
Corresponding Author's Secondary Institution:		
First Author:	Elena I. Rodríguez-Martínez	
First Author Secondary Information:		
Order of Authors:	Elena I. Rodríguez-Martínez	
	Raquel Muñoz-Pradas	
	Antonio Arjona	
	Brenda Y. Angulo-Ruiz	
	Vanesa Muñoz	
	Carlos Gómez	
Order of Authors Secondary Information:		
Funding Information:	Agencia Estatal de Investigación (PID2019-105618RB-I00)	Ph-D Carlos Gómez
	Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía (P20_00537)	Ph-D Carlos Gómez
Abstract:	<p>The present report tries to understand the possible relationship between Working Memory (WM) and intelligence measurements using the direct scores of the Working Memory Test Battery for Children (WMTBC) and Kaufman's Brief Intelligence Test (K-BIT), in normodevelopment (ND) and diagnosed Attention Deficit and Hyperactivity Disorder (ADHD) children and adolescents. Once discounting the effect of age, the results showed a significant correlation for ND subjects of the Central Executive (CE) component of WM with the WM Visuospatial Sketchpad component (VSS), and the WM Phonological loop (PL); also, significant correlations were obtained between WM VSS with the K-BIT matrices scores, the WM PL with the K-BIT Vocabulary and the K-BIT matrices scores with the K-BIT Vocabulary. For ADHD subjects there were significant correlations between WM VSS with WM CE and K-BIT matrices. Testing the robustness of these correlations by selecting a small number of subjects through permutations, a robust correlation between WM CE vs. WM PL in ND, and between WM VSS vs WM CE and, WM VSS vs. K-BIT matrices scores were obtained. The results suggest that in ADHD subjects WM VSS component presents a more pivotal role during cognitive processing with respect to ND subjects.</p>	

**Relationship of Working Memory with K-BIT Matrices and Vocabulary in
normodevelopment and ADHD children and adolescents**

Elena I. Rodriguez-Martínez²

Raquel Muñoz-Pradas

Antonio Arjona¹

Brenda Y. Angulo-Ruiz¹

Vanesa Muñoz¹

Carlos M. Gómez¹

Short title for page headings: WM and Intelligence in ND and ADHD.

¹ Human Psychobiology laboratory, Experimental Psychology Department, University of Sevilla.

² Developmental and Educational Psychology Department, University of Sevilla.

Postal address:

Prof. Carlos M. Gómez, Experimental Psychology Department, c/Camilo José Cela
s/n, Sevilla 41018. Spain

Corresponding Author:

Carlos M. Gómez

Human Psychobiology lab, Experimental Psychology Department, University of Sevilla.

ORCID:

Elena I. Rodriguez-Martínez¹, 0000-0001-6082-1298

Raquel Muñoz-Pradas¹, 0000-0001-7873-6307

Antonio Arjona¹, 0000-0003-4488-1957

Brenda Y. Angulo-Ruiz¹, 0000-0002-3527-2714

Vanesa Muñoz¹, 0000-0002-7434-8793

Carlos M. Gómez¹, 0000-0001-6399-5066

Abstract

The present report tries to understand the possible relationship between Working Memory (WM) and intelligence measurements using the direct scores of the Working Memory Test Battery for Children (WMTBC) and Kaufman's Brief Intelligence Test (K-BIT), in

normodevelopment (ND) and diagnosed Attention Deficit and Hyperactivity Disorder (ADHD) children and adolescents. Once discounting the effect of age, the results showed a significant correlation for ND subjects of the Central Executive (CE) component of WM with the WM Visuospatial Sketchpad component (VSS), and the WM Phonological loop (PL); also, significant correlations were obtained between WM VSS with the K-BIT matrices scores, the WM PL with the K-BIT Vocabulary and the K-BIT matrices scores with the K-BIT Vocabulary. For ADHD subjects there were significant correlations between WM VSS with WM CE and K-BIT matrices. Testing the robustness of these correlations by selecting a small number of subjects through permutations, a robust correlation between WM CE vs. WM PL in ND, and between WM VSS vs WM CE and, WM VSS vs. K-BIT matrices scores were obtained. The results suggest that in ADHD subjects WM VSS component presents a more pivotal role during cognitive processing with respect to ND subjects.

Keywords. ADHD, Central Executive, Phonological Loop, Visuospatial Sketchpad, K-BIT.

Statements and declarations

Competing Interest:

The authors declare that they don't have any competing financial interests or personal relationships that could influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This study was supported by the Spanish Agencia Estatal de Investigación (AEI) (PID2019-105618RB-I00) (FEDER funds), and by the Consejería de Innovación Ciencia y Empresa of the Junta de Andalucía (P20_00537).

Authors' Contribution Statements

Elena I. Rodríguez-Martínez: Conceptualization; Data curation; Investigation; Methodology.

Raquel Muñoz-Pradas: Conceptualization, Data curation; Formal analysis; Methodology; Project administration; Roles/Writing - original draft; Writing - review & editing.

Antonio Arjona: Conceptualization; Data curation; Investigation; Methodology.

Brenda Y. Angulo-Ruiz: Writing - review & editing.

Vanessa Muñoz: Writing - review & editing.

Relationship of Working Memory with K-BIT Matrices and Vocabulary in normodevelopment and ADHD children and adolescents

Abstract

The present report tries to understand the possible relationship between Working Memory (WM) and intelligence measurements using the direct scores of the Working Memory Test Battery for Children (WMTBC) and Kaufman's Brief Intelligence Test (K-BIT), in normodevelopment (ND) and diagnosed Attention Deficit and Hyperactivity Disorder (ADHD) children and adolescents. Once discounting the effect of age, the results showed a significant correlation for ND subjects of the Central Executive (CE) component of WM with the WM Visuospatial Sketchpad component (VSS), and the WM Phonological loop (PL); also, significant correlations were obtained between WM VSS with the K-BIT matrices scores, the WM PL with the K-BIT Vocabulary and the K-BIT matrices scores with the K-BIT Vocabulary. For ADHD subjects there were significant correlations between WM VSS with WM CE and K-BIT matrices. Testing the robustness of these correlations by selecting a small number of subjects through permutations, a robust correlation between WM CE vs. WM PL in ND, and between WM VSS vs WM CE and, WM VSS vs. K-BIT matrices scores were obtained. The results suggest that in ADHD subjects WM VSS component presents a more pivotal role during cognitive processing with respect to ND subjects.

Keywords. ADHD, Central Executive, Phonological Loop, Visuospatial Sketchpad, K-BIT.

Statements and declarations

Competing Interests:

The authors declare that they don't have any competing financial interests or personal relationships that could influence the work reported in this paper.

INTRODUCTION

Working Memory (WM) is a psychological process that is responsible for the processes of retention, perception, and manipulation of information in order to make changes in behavior (Postle, 2006). One of the most used models to understand the functioning of the WM is the model of Baddeley & Hitch (1974). This model explains that WM is made up of three components: Phonological Loop (PL), responsible for

1 retaining verbal/auditory information; Visuospatial sketchpad (VSS), responsible for the
2 cognitive processing of visual and spatial contents and, Control Executive (CE) the main
3 system to which the other two components are subordinated. The CE is responsible for
4 attentional issues, problem solving, planning complex strategies, and multitasking
5 (Baddeley, 2012). In addition, it covers other functions such as the coordination of verbal
6 and visual information (Gathercole et al., 2004).
7
8
9

10 Concerning the structural development of WM, the PL, and VSS develop
11 independently in the 5-8 years old period (Pickering et al., 1998). The independence of
12 the VSS and PL was confirmed in preadolescents (11-14 years old) (Jarvis & Gathercole,
13 2003). The PL and CE showed a moderate association in 6 and 7 years old children
14 (Gathercole & Pickering, 2001). In a confirmatory analysis using the WMTBC, a working
15 memory test based in the Baddeley & Hitch (1974) model, the independence of the three
16 WM components was demonstrated in children and adolescents (6 to 15 years old)
17 (Gathercole et al., 2004). Despite the statistical independence between the three
18 components a closer association between CE and PL than between CE and VSS has been
19 found. The WM reaches a plateau at 15 years, with CE attaining the highest performance
20 later than the slave systems (Muñoz-Pradas et al., 2021). The increased efficiency of WM
21 operations with age would permit the release of space and permit the increase of capacity
22 which is observed in WM during development (Case et al., 1982). Although Baddeley
23 and Hitch three componential model is highly prevalent, the updating function is also a
24 quite important WM operation that affects WM development (Artuso & Palladino, 2016;
25 Pelegrina et al., 2020)
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39

40 The relationship between Working Memory and Intelligence has been studied, and
41 it has been proved that they are strongly related (Colom et al., 2003; Colom et al., 2008).
42 There is a correlation between the results of diverse WM tasks and intelligence tests
43 (Tourva et al., 2016). Indeed, the memory index obtained from the administration of
44 some subtests of the Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS) and Wechsler
45 Intelligence Scale for Children (WISC) allows for assessing the ability to attend
46 verbally presented information, manipulating it in immediate short-term memory, and
47 then respond. (Cornoldi et al., 2013b; Egeland, 2015). Therefore, WM is a constituent
48 part of these widely accepted intelligence tests.
49
50
51
52
53
54
55
56

57 The WM construct is statistically related to that of fluid intelligence (Engle et al.,
58 1999; Engle, 2002) and is of particular importance in the development of curricular
59 activities. According to Cowan (2014), WM is a crucial part of cognitive processing and
60
61
62
63
64
65

1 allows carrying out more complex and necessary functions of daily life, such as linguistic
2 comprehension, reading, reasoning, or other executive functions. It is also key in the
3 interaction between the information received and long-term memory, in terms of
4 retrieving stored information that could be relevant, reinforcing its role in the
5 development of curricular activities (Cowan, 2014). Tourva et al., (2016) developed a
6 study to analyze the possible relationship between intelligence and three cognitive
7 functions: attention, working memory, and processing speed. These results, show that
8 there is a statistically significant relationship between WM and general intelligence, but
9 not between the other two cognitive functions. However, more recently, a watershed
10 model based on structural equation modeling has shown that not only WM but also
11 processing speed play a mediation role between white matter development and fluid
12 intelligence. The relationship between working memory and fluid intelligence is
13 important in educational settings given the importance of WM in other school processes,
14 such as mathematical performance (Lee & Bull, 2016; Passolunghi & Costa, 2019;
15 Raghubar et al., 2010) or reading comprehension (Carretti et al., 2009; Peng et al., 2018).

16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27 In the present report, the Kaufman's Brief Intelligence Test (K-BIT; Kaufman &
28 Kaufman, 1990) is used. This test measures general intelligence through two subtests.
29 The first sub-test measures verbal skills through word recognition (Vocabulary test) and
30 non-verbal skills through tests to complete analogies (Matrices test). It is considered that
31 Vocabulary is related to crystallized intelligence, while Matrices is more related to fluid
32 intelligence (Wang & Kaufman, 1993). In fact, in a similar test, (Raven's matrices; Raven,
33 2007) it has been shown that fluid intelligence mediates through the dorsolateral
34 prefrontal cortex and parietal areas in the control of interference in a WM task, suggesting
35 an intimate relationship between these two cognitive functions (Gray et al, 2003). The K-
36 BIT vocabulary sub-scale is related to vocabulary breadth and depth, given that is based
37 in the recognition of simple images and finding the words related to a definition. One of
38 the advantages of using K-BIT is the much shorter time needed for application than for
39 instance the more complete Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-V; Wechsler,
40 2015) which makes K-BIT particularly useful for children and attentionally impaired
41 groups. Direct scores in Intelligence tests increase with age until late adolescence and
42 early adulthood, following a pattern similar to that of WM (Koenis et al., 2018).

43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

1 family, and several social contexts (Magnin & Maurs, 2017). WM deficit has been
2 associated with ADHD and is considered one of the main information processing deficits
3 in ADHD, projecting impairment on more complex behavioral and cognitive processes
4 (Castellanos & Tannock, 2002; Rapport et al., 2008; Schachar et al., 2000). In terms of
5 general intelligence, children with ADHD have been shown to have a relatively lower IQ
6 than typically developing children (Frazier et al., 2007; Loe & Feldman, 2007). This
7 decrease in general intelligence is part of the normal phenotype of ADHD (Mackenzie &
8 Wonders, 2016). Interestingly, the watershed model of fluid intelligence (Fuhrmann et
9 al., 2020) showed that when tested in a community-ascertained developmental sample
10 compared with an impaired developmental sample, including problems in attention,
11 learning, and/or memory, showed a differential relationship between certain white matter
12 tracts and WM. But also, the variability in the community-ascertained group permitted to
13 separate the WM and fluid intelligence, while in the impaired sample, both WM and fluid
14 intelligence were not differentiated in the impaired population.
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

25 The objectives of the present report are to show whether there is a relationship
26 between the development of WM as measured with WMTBC (Gathercole & Pickering,
27 2001), and intelligence as measured with K-BIT during development. The hypotheses are
28 that the executive components of WM would be related to the direct scores of the Matrices
29 and Vocabulary scales of K-BIT, and the VSS would be related to the Matrices scale,
30 while PL would be related to the Vocabulary scale. A different pattern of relationship
31 between WM and intelligence measurements in normodevelopment and ADHD children
32 is expected.
33
34
35
36
37
38
39

40 **METHODS**

41 **Participants**

42 Two different samples participated in the present study: Normodevelopment
43 (ND) and ADHD subjects. The ND sample is composed of 84 participants with
44 corresponding ages between 6 and 18 years (M=11.31, SD=3.3, range: 6/18 years), 45
45 males (53.5%) and 39 females (46.5%). The sample of ADHD subjects is composed of
46 36 subjects with corresponding ages between 6 and 17 years (M=11.29, SD=3.19,
47 range:6/18), 28 males (77.8%), and 8 females (22.2%). Age did not show significant
48 differences between groups. In the ND group, controlled by age, no significant gender
49 differences were obtained for any of the analyzed empirical variables after FDR
50 correction (Benjamini & Hochberg, 1995). In ADHD, controlled by age, only the
51 Vocabulary was higher in males than females (p=.045), however, the low number of
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61

1 females in this group raises doubts about the latter result. Given the low influence of
2 gender and for the sake of simplicity the gender factor would not be considered in the
3 analysis.
4

5 Initially, the ADHD sample was composed of 41 children and adolescents. They
6 were evaluated through two different methods: A structured interview and “Nesplora
7 Aula” (Climent & Banterla, 2011; Díaz-Orueta et al., 2014). All participants had been
8 prescribed different amounts of methylphenidate, but they did not take the medication 48
9 hours before participating in the study. The parents filled out the DuPaul questionnaire
10 (DuPaul et al., 1998). After the evaluation, there were 5 cases with no diagnostic
11 concordance between the questionnaire and the clinical interview, so these subjects were
12 rejected for further assessment, and the ADHD sample was finally composed of 36
13 participants.
14

15 The participants had a medium socioeconomic status, and they were in the
16 academic year that corresponds to their age. No psychological, psychiatric, or
17 neurological disease has been reported (except for the diagnosis of ADHD). When ADHD
18 subjects were taking medication, it was suppressed 48 hours before the experiment to
19 carry out the assessment, and the parents or tutors of the participants signed a written
20 consent (parents/tutors in the case of the children and adolescents) following the Helsinki
21 protocol. The study was approved by the Bioethical Committee of Sevilla University
22 (<https://www.juntadeandalucia.es/salud/portaldeetica/>).
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37

38 **Working Memory Test Battery for Children (WMTBC)**

39 The participants were administered with the WMTBC (Gathercole & Pickering,
40 2001). This test is composed of 9 subtests, and by combining the results obtained in a
41 specific order (phonological loop (PL)=test 1, 2, 3, 5; visuospatial sketchpad (VSS)= test
42 4, 8; central executive (CE)= test 6, 7, 9) the direct scores that correspond to the three
43 major components of the WM (PL, VSS, and CE) are obtained. The order of
44 administration was as follows: (1) Digit Recall, (2) Word List Matching, (3) Word List
45 Recall, (4) Block Recall, (5) Nonword List Recall, (6) Listening Recall, (7) Counting
46 Recall, (8) Mazes Memory and (9) Digit Recall Backward.
47
48
49
50
51
52
53

54 The battery used was adapted from English to Spanish, following a series of
55 criteria such as:
56

57 -For the Word List Matching and Word List Recall sub-items, disyllabic words collected
58 from a list of frequency of words used by children were used, with certain similar criteria
59
60
61
62
63
64
65

1 such as the length between the original words and high frequency of use, to facilitate the
2 completion of the test to younger age groups (Justicia, 1995).

3 - For the subtest of Nonword List Recall, the same words have been used as in the
4 previous tests. To transform words into non-words, we changed the order of the vowels
5 within the words and the order of the syllabi that made up each word.
6

7
8 - For the subtest of Listening Recall, due to the characteristics of the subtest, the original
9 sentences were translated from English to Spanish, in order to keep the semantic meaning
10 and the possible interference between words as in the original English sentences.
11
12
13

14 **Kaufman Brief Intelligence Test (K-BIT)**

15
16 K-BIT measures verbal and non-verbal intelligence in children, adolescents, and
17 adults (Kaufman & Kaufman, 1990). The test consists of two subtests, a Vocabulary test
18 (verbal cristallized intelligence) and a Matrices test (non-verbal fluid intelligence).
19 Finally, from the sum of both subtests, an overall IQ score is obtained. Here, only the
20 subtests would be analyzed.
21
22

23 The order of testing K-BIT and WMTBC was counterbalanced. Due to difficulties
24 in arranging the time schedules, the K-BIT was only administered to 21 ADHD subjects
25 and the whole sample of ND subjects (84). The direct scores of the K-BIT for the verbal
26 (Vocabulary), and non-verbal (Matrices) in both groups were obtained.
27
28

29 **Statistical analysis**

30 All the statistical analyses were computed with IBM SPSS Statistics 26.

31 - *Mean group differences.*

32 Univariate ANOVAs with the group as a between-subject factor were computed
33 for PL, VSS, and CE of the WMTBC; Vocabulary, and Matrices of K-BIT, using age and
34 gender as covariates. The obtained p-values were corrected for multiple comparisons
35 using the False Discovery Rate (FDR) (Benjamini & Hochberg, 1995).
36

37 -*Relationship between the components of WM and K-BIT.*

38 To study a possible relationship between the components of the WM and the K-
39 BIT components of intelligence, bivariate Spearman correlations were performed
40 between the scores of each of the subtests. Additionally, the same correlations were
41 computed controlling by age. The obtained p-values were corrected for multiple
42 comparisons using the FDR.
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Given the different number of subjects in the ND (84 subjects for WMTBC and K-BIT,) and ADHD (36 subjects for WMTBC, and 21 subjects for K-BIT) 10000 correlations, selecting 17 subjects by permutation without replacement were computed. This procedure would permit the elimination of the biases that would appear from the different numbers of subjects in ND and ADHD, while not discarding the information from any single subject. The values of the selected subjects during permutations were selected from the residuals of the regressions of the WM and K-BIT variables vs. age, to minimize possible different ages of the ND and ADHD subjects. This method of selecting subjects permitted validation of which correlations were not affected by the sample size and should be considered as highly robust.

RESULTS

The ANOVA mean comparisons FDR corrected, with gender and age as covariates, showed significant differences between groups PL ($F(1,116)=15.64$, $p<.001$, $\eta^2=.119$), VSS ($F(1,116)=6.49$, $p=.012$, $\eta^2=.053$), CE($F(1,116)=28.08$, $p=.007$, $\eta^2=.195$), Matrices ($F(1,101)=43.21$, $p<.001$, $\eta^2=.300$), Vocabulary ($F(1,101)=25.62$, $p<.001$, $\eta^2=.202$). In these five direct scores variables ND presented significantly higher scores than ADHD. An additional univariate ANOVA to compare the WM direct scores of ND and ADHD, with the Matrices and Vocabulary covariates as additional covariates, showed that only the CE was statistically significant after FDR correction ($F(1,99)=7.55$, $p=.021$, $\eta^2=.071$). K-BIT and WM direct scores were Spearman correlated with the impulsivity and inattention scores of the DuPaul questionnaire, but no significant correlations were obtained.

To study the age dependence of WM and intelligence in both samples, linear regressions of the direct scores of the three WM components and the two K-BIT components with respect to age (measured in days) were computed. All the linear regressions were significant (Figures 1 and 2) for ND, while for ADHD all regressions were significant except for the PL. In all significant cases, there was an increase in direct scores with age. The obtained p-values were corrected for multiple comparisons using FDR.

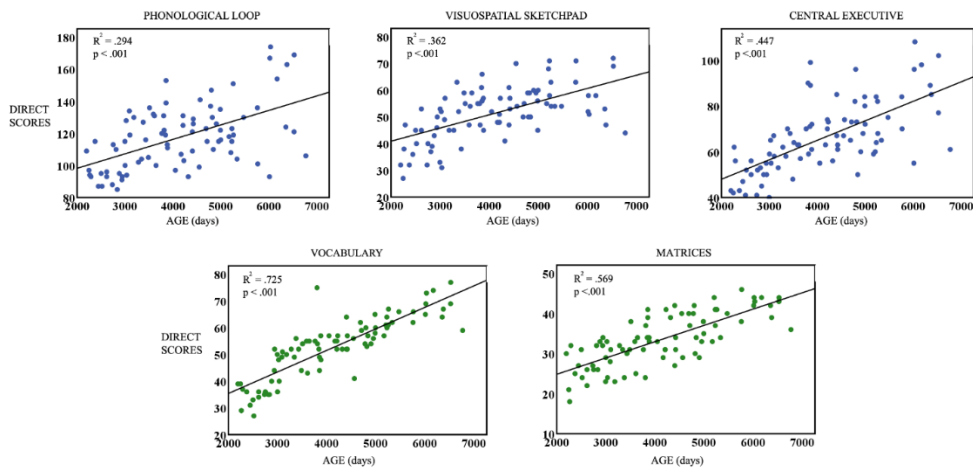


Fig. 1 ND sample: Linear regressions of direct scores of Phonological loop, Visuospatial sketchpad, Central Executive (WM components), Vocabulary, and Matrices (K-BIT components) vs. the age group measured in days

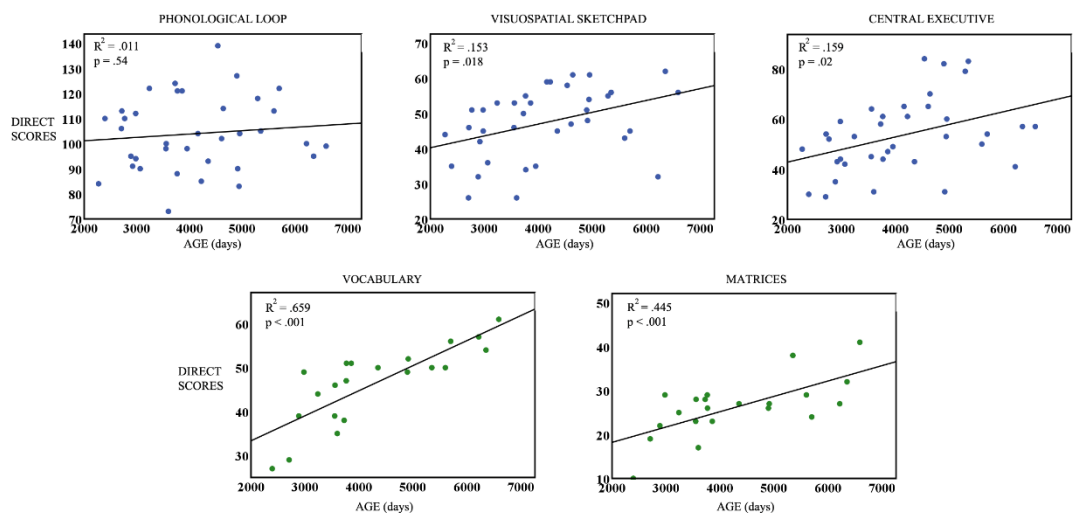


Fig. 2 ADHD sample: Linear regressions of direct scores of Phonological loop, Visuospatial sketchpad, Central Executive (WM components), Vocabulary, and Matrices (K-BIT components) vs. the age group measured in days

To study a possible relationship between the components of WM and the K-BIT components, bivariate Spearman correlations were performed between the scores of each of the subtests in both samples (Table 1). For the ND sample, all tested FDR corrected correlations were significant (see table 1). The results obtained for the ADHD sample showed a statistically significant correlation between CE-PL; CE-VSS; CE-Matrix; VSS-Matrix and Matrix-Vocabulary.

Table 1. FDR corrected Spearman correlations between the scores of each of the subtests of K-BIT and WMTBC in normodevelopment (ND) and ADHD subjects. WM PL: Phonological Loop; WM VSS Visuospatial Sketchpad; WM CE Central Executive. Direct scores of the Vocabulary and Matrices subscales of the K-BIT are also indicated in the table. P-values were corrected using the (FDR). With asterisk significant p-values.

CORRELATED VARIABLES	ND			ADHD		
	R	p	N	R	p	N
WM CE/WM PL	.753	<.001*	84	.389	.038*	36
WM CE/WM VSS	.581	<.001*	84	.797	<.001*	36
WM CE/KBIT Matrix	.612	<.001*	84	.644	.005*	21
WM CE/KBIT Vocabulary	.669	<.001*	84	.261	.361	21
WM PL/WM VSS	.430	<.001*	84	.162	.432	36
WM PL/KBIT Matrix	.384	<.001*	84	-.147	.583	21
WM PL/KBIT Vocabulary	.503	<.001*	84	-.001	.997	21
WM VSS/KBIT Matrix	.587	<.001*	84	.651	.005*	21
WM VSS/KBIT Vocabulary	.545	<.001*	84	.349	.201	21
KBIT Matrix/KBIT Vocabulary	.706	<.001*	84	.542	.028*	21

To analyze the possible correlations between the components of the WM and the components of Intelligence, discounting age as a determining factor, partial correlations were computed between the direct scores of the subtests controlling for the variable "age measured in days" (Table 2). For the ND subjects, significant correlations were obtained between CE-PL, CE-VSS, PL-Vocabulary, VSS-Matrix, and Vocabulary-Matrix. For ADHD subjects, significant correlations were obtained between CE-VSS and VSS-Matrix.

Table 2. Partial Spearman correlations (controlling by age) between the scores of each of the subtests of K-BIT and WMTBC in normodevelopment (ND) and ADHD subjects. WM PL: Phonological Loop; WM VSS Visuospatial Sketchpad; WM CE Central Executive. Direct scores of the Vocabulary and Matrices subscales of the K-BIT are also indicated in the table. P-values were corrected using the (FDR). With asterisk significant p-values.

CORRELATED VARIABLES	ND			ADHD		
	R	p	N	R	p	N
WM CE/WM PL	.613	<.001*	84	.368	.066	36
WM CE/WM VSS	.248	.048*	84	.735	.033*	36
WM CE/KBIT Vocabulary	.220	.063	84	.317	.231	21
WM CE/KBIT Matrix	.221	.063	84	.509	.061	21
WM PL/WM VSS	.101	.403	84	.177	.376	36
WM PL/KBIT Vocabulary	.277	.035*	84	-.044	.849	21
WM PL/KBIT Matrix	.055	.620	84	-.178	.489	21
WM VSS/KBIT Vocabulary	.175	.138	84	.353	.194	21
WM VSS/KBIT Matrix	.335	.009*	84	.551	.048*	21

KBIT Vocabulary /KBIT Matrix	.245	.048*	84	.466	.066	21
------------------------------	------	-------	----	------	------	----

To test for the robustness of the obtained significant correlations, and try to compute correlations with the same number of subjects in ND and ADHD, 17 subjects were selected from each sample without replacement and correlated 10000 times. Figure 3 shows the p-values histogram for each correlation. For ND only the correlation between CE-PL showed most correlations obtained with the sampled subjects being significant, while for ADHD CE-VSS and VSS-Matrices were highly significant.

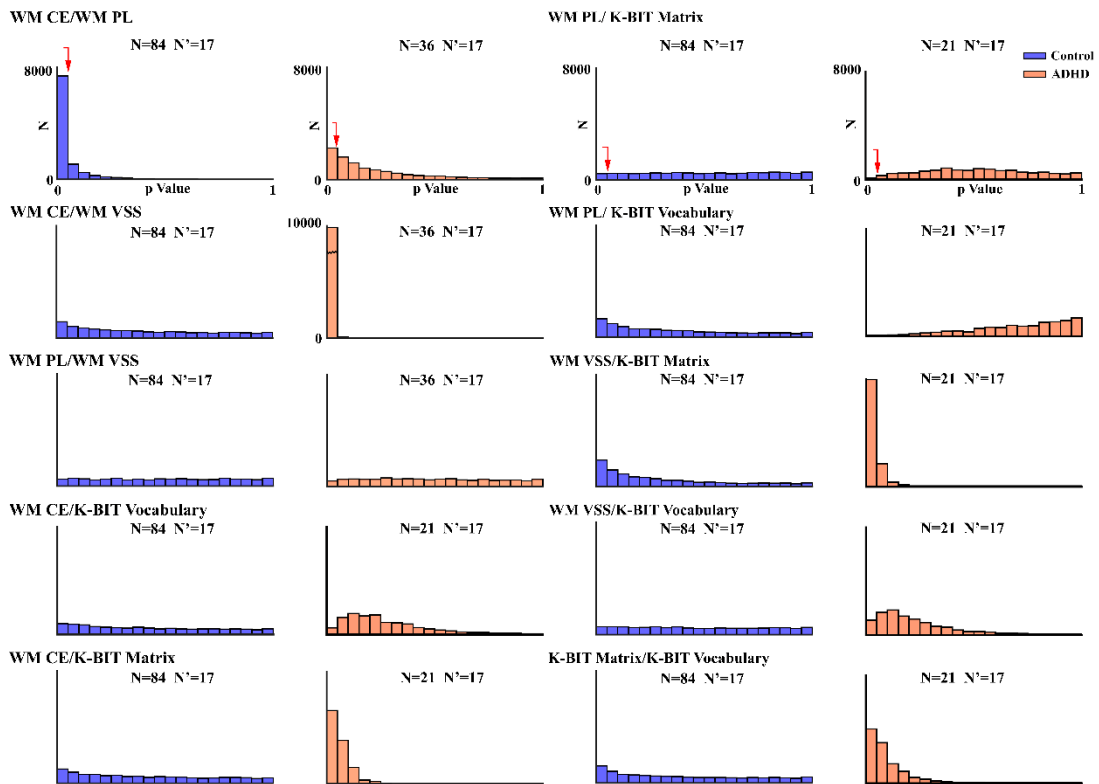


Fig. 3 Probability values obtained in the Spearman correlations for 17 subjects selected from 10000 permutations without replacement. N: number of subjects of the original sample, N': number of subjects selected for correlations from permutations. The red arrow indicates the $p=0.05$ value. WM PL: Phonological Loop; WM VSS: Visuospatial Sketchpad; WM CE: Central Executive. Direct scores of the Vocabulary (K-BIT vocabulary) and Matrices subscales of the K-BIT (K-BIT matrix) are also indicated in the figure.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

1 Although not specified as an objective, the results showed statistically significant
2 differences between ND and ADHD subjects direct scores in WM and K-BIT measures.
3 This supports previous results which indicate a poorer performance of ADHD children
4 WM (Rapport et al., 2008) and general intelligence (Mackenzie & Wonders, 2016). When
5 controlled by K-BIT direct scores only CE remains statistically significant, supporting
6 that ADHD presents traits of a dysexecutive syndrome (Rapport et al., 2008).
7
8
9

10 The first objective of this report is to show if there is a relationship between WM
11 as measured with WMTBC and general intelligence as measured with K-BIT during
12 development in two different samples: ND and ADHD subjects. Initially, the hypotheses
13 studied were that the CE of WM would be related to the direct scores of the Matrices and
14 Vocabulary scales of K-BIT, while VSS would be related to the Matrices scale, and PL
15 would be related to the Vocabulary scale. These relationships would be more functionally
16 associated once the age component was discarded, given that the common factor of
17 maturation would be eliminated. The results obtained in the ND subjects sample show
18 that significant correlations were established between PL with Vocabulary, and VSS with
19 Matrices as predicted, and a trend for statistical significance was obtained for CE with
20 Vocabulary and Matrices (FDR corrected). These results suggest that WM is also related
21 to other cognitive functions, such as intelligence. Previous findings seem to show that the
22 short-term store is the main responsible for the relationship between Intelligence and
23 WM, and other cognitive processes are discarded as main protagonists, such as attention
24 (Colom et al., 2008). These findings were supported after studying the relationship
25 between three types of intelligence (general, fluid, and crystallized) with four cognitive
26 functions (attention, processing speed, short-term storage, and WM). Tourva et al. (2016)
27 developed a study to analyze the possible relationship between intelligence and
28 processing speed, attention, and WM. They showed that there is a statistically significant
29 relationship between WM and general intelligence, but not with attention and speed
30 processing. The strong relationship between WM and intelligence has been widely
31 replicated (Swanson & Alloway, 2012; for a review). The correlations obtained in the
32 present report support such claim, adding a certain modular aspect given the pattern of
33 correlation obtained between WM and K-BIT (CE-Matrices; CE-Vocabulary, PL-
34 Vocabulary, and VSS-Matrices). More recently, the role of WM as a mediator between
35 white matter development and fluid intelligence has been found, but also includes
36 processing speed as an additional mediator (Fuhrmann et al., 2020). The influence of
37 WM on higher cognitive functions goes further than its relationship with general
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 intelligence although mediated by intelligence. Research shows the importance of WM
2 in other school processes, such as mathematical performance (Lee & Bull, 2016;
3 Passolunghi & Costa, 2019; Raghubar et al., 2010), and reading comprehension (Carretti
4 et al., 2009; Peng et al., 2018).
5
6

7 Also, in ND positive correlation between the WM components (CE-PL and CE-
8 VSS) were obtained. Gathercole et al. (2004) showed an independent development of the
9 components, although a more intimate relationship CE-PL than CE-VSS was obtained.
10 Present results also showed that there is a statistically significant relationship between
11 WM components, although CE and PL presented a higher relationship than CE with VSS,
12 as it was previously demonstrated with a much larger sample (Gathercole et al., 2004;
13 Muñoz-Pradas et al., 2021).
14
15
16
17
18
19

20 Concerning ADHD, not only presented lower WM and intelligence measures, as
21 has been previously described (Holmes et al., 2010; Rapport et al., 2008), indeed, an
22 intimate relationship between intelligence and WM has been shown, given that
23 controlling by intelligence the differences in WM performance between ND and ADHD
24 disappears, except for CE. Interestingly, the correlational pattern obtained in the ADHD
25 sample is very different to ND, biasing the positive significant correlations to the
26 visuospatial module in both the K-BIT and in WM. Significant correlations, controlled
27 by age and FDR corrected, were obtained in CE-VSS, and VSS-Matrices. Interestingly,
28 only the Matrices subtest was clearly predicted by WM measurements (VSS). This result
29 would suggest that fluid intelligence (measured by the Matrices subtest) would be more
30 connected to the WM components, than crystallized intelligence (measured by the
31 Vocabulary subtest) in the ADHD group (Pitts & Mervis, 2016) in ADHD. These results
32 suggest, that the already described pattern in ND of a high relationship between CE and
33 PL is breaking down in ADHD children, and also with the Vocabulary measures. This
34 could be due to a higher impairment of left hemisphere functional integration in ADHD
35 with respect to ND. In fact, the possibility that intelligence level and WM performance
36 could be not directly associated with ADHD has already been demonstrated (Cornoldi et
37 al., 2013a). However, part of the differences between ADHD and ND would be due to
38 the different sample sizes of both groups, the permutation analysis permitted testing the
39 robustness of these correlations with a small sample equal for all groups and tests.
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55

56 The permutation analysis with a small resampled collection of subsamples showed
57 a very robust pattern of correlations in WM CE-PL in ND, and CE-VSS and VSS-
58 Matrices in ADHD. This result supports a different pattern of interrelationships between
59
60
61
62
63
64
65

1 cognitive processes in ND and ADHD, more biased to verbal control in ND and visually
2 biased in ADHD. The small sample recorded in the ADHD group suggests that although
3 permutation analysis indicates that the visually biased mode of processing in ADHD
4 seems to be very robust in statistical terms, a higher sample should be needed to confirm
5 present results. It must be indicated that the lack of robustness that appears in the ND
6 correlations does not mean that those correlations are not present when a higher sample
7 is tested, as described in Tables 1 and 2, and discussed above.

8
9
10
11
12 In summary, the results showed in ND correlations that the two subscales of
13 intelligence, Vocabulary, and Matrices, were related to PL and VSS, respectively,
14 suggesting a modular specific pattern in the relationship of WM with intelligence.
15 However, for ADHD, the pattern of relationship between WM and intelligence (as
16 measured with K-BIT) was limited to the relationship of CE with VSS, and VSS with
17 Matrices, suggesting a more pivotal role for visual information during cognitive
18 processing. However, ADHD results must be taken very cautiously given the small
19 sample size of the ADHD group.

20
21
22
23
24
25
26
27 An important limitation of the present report is the broad range of age of subjects,
28 due more to recruitment limitations rather than to theoretical considerations, given that
29 age differences in the causal directionality of the WM PL vs Vocabulary relationships
30 (Gathercole et al., 1992), and in the strength of the white matter relationship with
31 cognitive abilities in the watershed model of fluid intelligence (Fuhrmann et al., 2020)
32 have been found. However, the linear relationship between most cognitive measures and
33 age obtained in the present report suggests that, although temporary changes in the level
34 of relationship between cognitive variables would occur, they cannot be considered
35 enough to invalidate the conclusions of the present report, in both groups of subjects.

36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65

- Artuso, C., & Palladino, P. (2016). Letter updating is related to reading fluency but not
comprehension. *Learning and Individual Differences*, 52, 53–59.
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2016.10.008>
- Baddeley A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. Annual
review of psychology, 63, 1–29. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>

- 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. (1974). Working Memory. *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*. Vol. 8. G. H. Bower, ed. (New York: Academic Press), pp. 47–89.
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*. 57 (1): 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Carretti, B., Borella, E., Cornoldi, C., & De Beni, R. (2009). Role of working memory in explaining the performance of individuals with specific reading comprehension difficulties: A meta-analysis. *Learning and Individual Differences*, 19(2), 246–251. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.10.002>
- Case, R., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of experimental child psychology*, 33(3), 386–404. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(82\)90054-6](https://doi.org/10.1016/0022-0965(82)90054-6)
- Castellanos, F. X., & Tannock, R. (2002). Neuroscience of attention-deficit/hyperactivity disorder: The search for endophenotypes. *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 617–628. <https://doi.org/10.1038/nrn896>
- Climent, G., & Banterla, F. A. U. L. A. (2011). *Manual Teórico*. San Sebastián: Nesplora.
- Colom, R., Abad, F. J., Quiroga, M. Á., Shih, P. C., & Flores-Mendoza, C. (2008). Working memory and intelligence are highly related constructs, but why? *Intelligence*, 36(6), 584–606. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2008.01.002>
- Colom, R., Flores-Mendoza, C., & Rebollo, I. (2003). Working memory and intelligence. *Personality and Individual Differences*, 34(1), 33–39. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00023-5)
- Cornoldi, C., Giofrè, D., Calgaro, G. et al. (2013a). Attentional WM is not necessarily specifically related with fluid intelligence: the case of smart children with ADHD symptoms. *Psychological Research* 77, 508–515. <https://doi.org/10.1007/s00426-012-0446-8>
- Cornoldi, C., Orsini, A., Cianci, L., Giofrè, D., & Pezzuti, L. (2013b). Intelligence and working memory control: Evidence from the WISC-IV administration to Italian children. *Learning and Individual Differences*, 26, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.04.005>
- Cowan, N. (2014). Working memory underpins cognitive development, learning, and education. *Educational psychology review*, 26(2), 197–223. <https://www.jstor.org/stable/43549792>

- 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
- Díaz-Orueta, U., Garcia-López, C., Crespo-Eguílaz, N., Sánchez- Carpintero, R., Climent, C., & Narbona, J. (2014). AULA virtual reality test as an attention measure: Convergent validity with Conners' Continuous Performance Test. *Child Neuropsychology*, 20, 328–342. <https://doi.org/10.1080/09297049.2013.792332>
- DuPaul, G. J., Power, T. J., Anastopoulos, A. D., & Reid, R. (1998). *ADHD Rating Scale—IV: Checklists, norms, and clinical interpretation*. The Guilford Press.
- Egeland, J. (2015). Measuring Working Memory with Digit Span and the Letter-Number Sequencing Subtests From the WAIS-IV: Too Low Manipulation Load and Risk for Underestimating Modality Effects. *Applied neuropsychology. Adult*, 22(6), 445–451. <https://doi.org/10.1080/23279095.2014.992069>
- Engle, R.W. (2002). Working Memory Capacity as Executive Attention. *Current Directions in Psychological Science*, 11(1), 19-23. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00160>
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: a latent-variable approach. *Journal of experimental psychology. General*, 128(3), 309–331. <https://doi.org/10.1037//0096-3445.128.3.309>
- Frazier, T.W., Demaree, H.A., Youngstrom, E.A., (2007). Meta-analysis of intellectual and neuropsychological test performance in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuropsychology* 18 (3), 543–555, <http://dx.doi.org/10.1037/0894-4105.18.3.54>
- Fuhrmann, D., Simpson-Kent, I. L., Bathelt, J., CALM Team, & Kievit, R. A. (2020). A Hierarchical Watershed Model of Fluid Intelligence in Childhood and Adolescence. *Cerebral cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 30(1), 339–352. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz091>
- Gathercole, S., & Pickering, S. (2001). *Working Memory Test Battery for Children (WMTB-C)*, Pearson Education, Ltd., London.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The Structure of Working Memory From 4 to 15 Years of Age. *Developmental Psychology*, 40(2), 177–190. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.2.177>
- Gathercole, S.E., Willis, C.S., Emslie, H.B., Alan, D. (1992). Phonological memory and vocabulary development during the early school years: A longitudinal study. *Developmental Psychology*, 28(5), 887-898.

- 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
- Gray, J. R., Chabris, C. F., & Braver, T. S. (2003). Neural mechanisms of general fluid intelligence. *Nature neuroscience*, 6(3), 316–322. <https://doi.org/10.1038/nn1014>
- Holmes, J., Gathercole, S., Place, M., Alloway, T., Elliott, J., & Hilton, K. (2010). An assessment of the diagnostic utility of executive function assessments in the identification of ADHD in children. *Child and Adolescent Mental Health*. 15. 37 - 43.
- Jarvis, H.L., & Gathercole, S.E. (2003). Verbal and non-verbal working memory and achievements on national curriculum tests at 11 and 14 years of age. *Educ. Child Psychol* 20,123–140.
- Justicia F. J. (1995). *Vocabulary Development: Frequency Dictionary*. [The development of the vocabulary: Frequency dictionary. Granada, Spain: Universidad de Granada.
- Kaufman, A.S., & Kaufman, N. L. (1990). *Manual for the Kaufman Brief Intelligence Test*. Circle Pines, MN: American Guidance Service.
- Koenis, M. M. G., Brouwer, R. M., Swagerman, S. C., van Soelen, I. L. C., Boomsma, D. I., & Hulshoff Pol, H. E. (2018). Association between structural brain network efficiency and intelligence increases during adolescence. *Human brain mapping*, 39(2), 822–836. <https://doi.org/10.1002/hbm.23885>
- Lee, K., & Bull, R. (2016). Developmental changes in working memory, updating, and math achievement. *Journal of Educational Psychology*, 108(6), 869–882. <https://doi.org/10.1037/edu0000090>
- Loe, I.M., & Feldman, H.M., (2007). Academic and educational outcomes of children with ADHD. *Ambul. Pediatr.* 7 (1), 82–90, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ambp.2006.05.005>
- Mackenzie, G.B., & Wonders, E., (2016). Rethinking intelligence quotient exclusion criteria practices in the study of attention deficit hyperactivity disorder. *Front. Psychol.* 2016 (7), 794, <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00794>
- Magnin, E. & Maurs, C. (2017). Attention-deficit/hyperactivity disorder during adulthood. *Revue Neurologique.* 173, 506-515. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neurol.2017.07.008>
- Muñoz-Pradas, R., Díaz-Palacios, M., Rodríguez-Martínez, E., Gómez, C.M., (2021). Order of maturation of the components of the working memory from childhood to emerging adulthood. *Current Research in Behavioral Sciences.* <https://doi.org/10.1016/j.crbeha.2021.100062>

- 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
- Passolunghi, M.C., & Costa, H.M. (2019). Working memory and mathematical learning. In Fritz, A., Haase, V.G., & Räsänen, P. (Eds.), *International handbook of mathematical learning difficulties* (pp. 407–421). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97148-3_25
- Pelegriña, S., Molina, R., Rodríguez-Martínez, E. I., Linares, R., & Gómez, C. M. (2020). Age-related changes in selection, recognition, updating and maintenance information in WM. An ERP study in children and adolescents. *Biological psychology*, 157, 107977. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2020.107977>
- Peng, P., Barnes, M., Wang, C., Wang, W., Li, S., Swanson, H. L., Dardick, W., & Tao, S. (2018). A meta-analysis on the relation between reading and working memory. *Psychological bulletin*, 144(1), 48–76. <https://doi.org/10.1037/bul0000124>
- Pickering, S. J., Gathercole, S. E., & Peaker, S. M. (1998). Verbal and visuospatial short-term memory in children: evidence for common and distinct mechanisms. *Memory & cognition*, 26(6), 1117–1130. <https://doi.org/10.3758/bf03201189>
- Pitts, C.H., & Mervis, C.B. (2016). Performance on the Kaufman Brief Intelligence Test-2 by Children With Williams Syndrome. *Am J Intellect Dev Disabil.*, 121(1):33-47. <https://doi.org/10.1352/1944-7558-121.1.33>
- Postle B. R. (2006). Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, 139(1), 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.06.005>
- Raghubar, K.P., Barnes, M.A., & Hecht, S.A. (2010). Working memory and mathematics: A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.10.005>
- Rappport, M. D., Alderson, R. M., Kofler, M. J., Sarver, D. E., Bolden, J., & Sims, V. (2008). Working memory deficits in boys with attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD): The contribution of central executive and subsystem processes. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 36(6), 825–837. <https://doi.org/10.1007/s10802-008-9215-y>
- Raven, J. (2007). *Test de Matrices Progresivas: escala general: cuaderno de matrices; series A, B, C, D Y E* (2a. ed., 3a. reimp.). Buenos Aires: Paidós
- Schachar, R., Mota, V. L., Logan, G. D., Tannock, R., & Klim, P. (2000). Confirmation of an inhibitory control deficit in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of abnormal child psychology*, 28(3), 227–235. <https://doi.org/10.1023/a:1005140103162>

- 1 Swanson, H. L., & Alloway, T. P. (2012). Working memory, learning, and academic
2 achievement. In K. R. Harris, S. Graham, T. Urdan, C. B. McCormick, G. M.
3 Sinatra, & J. Sweller (Eds.), *APA handbooks in psychology®. APA educational*
4 *psychology handbook, Vol. 1. Theories, constructs, and critical issues* (p. 327–
5 366). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/13273-012>
6
7
8
9 Tourva, A., Spanoudis, G., & Demetriou, A. (2016). Cognitive correlates of developing
10 intelligence: The contribution of working memory, processing speed and
11 attention. *Intelligence*, 54, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.12.001>
12
13
14 Wang, J. J., & Kaufman, A. S. (1993). Changes in fluid and crystallized intelligence
15 across the 20-to 90-year age range on the K-BIT. *Journal of Psychoeducational*
16 *Assessment*, 11(1), 29-37. <https://doi.org/10.1177/073428299301100104>
17
18
19
20 Wechsler, D. (2015). *WISC-V. Escala de inteligencia de Wechsler para niños-V*. Pearson
21

22 **ETHICS APPROVAL**

23
24 The experiment has been developed following the Helsinki protocol. The study
25 was approved by the Bioethical Committee of the Junta de Andalucía
26 (<https://www.juntadeandalucia.es/salud/portaldeetica/>).
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65