

La planificación cognitiva en el contexto de la evaluación neuropsicológica e investigación en neurociencia cognitiva: una revisión sistemática

Cognitive planning in the context of neuropsychological assessment and research in cognitive neuroscience: a systematic review

Marcos Domic-Siede^{1*}

iD 0000-0002-5191-1133

mdomic@ucn.cl

Martín Irani²

iD 0000-0002-4724-2248

mirani2@illinois.edu

Miguel Ramos-Henderson^{3,1}

iD 0000-0003-1045-6872

miguelramoshe@santotomas.cl

Carlos Calderón¹

iD 0000-0002-9237-3749

ccalderon@ucn.cl

Tomás Ossandón⁴

iD 0000-0002-7306-7754

tossandon@uc.cl

Marcela Perrone-Bertolotti⁵

iD 0000-0001-9981-7042

marcela.perrone-bertolotti@univ-grenoble-alpes.fr

¹ Universidad Católica del Norte. Facultad de Humanidades, Escuela de Psicología, Laboratorio de Neurociencia Cognitiva. Antofagasta, Chile.² University of Illinois Urbana-Champaign, Department of Psychology, Illinois, USA.³ Universidad Santo Tomás, Facultad de Salud, Centro de Investigación e Innovación en Gerontología Aplicada CIGAP, Antofagasta, Chile⁴ Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Psiquiatría, Neurodynamic of Cognition Laboratory, Santiago, Chile⁵ Université Grenoble Alpes, Department of Psychology. Psychology and NeuroCognition Lab, Grenoble, France

* Autor de correspondencia.

Resumen:

La planificación es definida como la habilidad de desarrollar un plan secuenciado de pasos conductuales para alcanzar una meta y forma parte de un conjunto de funciones cognitivas de alto orden denominadas funciones ejecutivas. Esta función se ve afectada en diversas situaciones de la vida cotidiana y en una variedad de trastornos neuropsiquiátricos (por ej., depresión, ansiedad, déficit atencional, esquizofrenia, etc.). Tanto el diseño de pruebas cognitivas para evaluar planificación en el contexto clínico, como también el diseño de paradigmas experimentales de evaluación de la planificación en el contexto de investigación, continúa siendo un desafío para la neuropsicología clínica y para las neurociencias. En este artículo de revisión sistemática que sigue las direcciones PRISMA, revisamos la teoría e investigación en relación con la evaluación clínica y la investigación de las bases neurobiológicas de la planificación y los aportes a la comprensión de los mecanismos de su implementación. Se reportan medidas metodológicas comunes y se resumen las aproximaciones teóricas que contribuyen en su comprensión. Nuestros hallazgos muestran la implicancia de la corteza prefrontal en el rendimiento en planificación, en particular el área dorsolateral, corteza cingulada anterior y frontopolar. Mayores estudios clínicos, instrumentales y experimentales son necesarios para comprender mejor la planificación en el contexto de una teoría integrativa de las funciones ejecutivas y del rol de la corteza prefrontal.

Palabras clave: planificación; funciones ejecutivas; evaluación neuropsicológica; corteza prefrontal.

Abstract:

Planning is defined as the ability to develop a sequenced plan of behavioral steps to achieve a goal and is part of a set of high-order cognitive functions called executive functions. This function is affected in various daily life situations and in a variety of neuropsychiatric disorders (e.g., depression, anxiety, attention deficit disorder, schizophrenia, etc.). Both the design of cognitive tests to assess planning in the clinical context, as well as the design of experimental paradigms for evaluating planning in research context, continues to be a challenge for clinical neuropsychology and neurosciences. In this PRISMA systematic review article, we review theory and research regarding clinical assessment and research into the neurobiological bases of planning and contributions to understanding the mechanisms of its implementation. Common methodological measures are reported and the theoretical approaches that contribute to their understanding are summarized. Our findings show the involvement of the prefrontal cortex in planning performance, particularly the dorsolateral area, the anterior cingulate cortex, and the frontopolar cortex. Further clinical, instrumental, and experimental studies are needed to better understand planning in the context of an integrative theory of executive functions and the role of the prefrontal cortex.

Keywords: planning; executive functions; neuropsychological evaluation; prefrontal cortex.

Introducción

Las funciones cognitivas de control ejecutivo que orientan nuestras conductas hacia una meta, guiando nuestros pensamientos, parecen ser una de las más notables características de la conducta humana. En términos generales, las funciones ejecutivas, también conocidas como las funciones de control cognitivo, aluden a la habilidad para realizar conductas orientadas a metas (Cohen, 2017). Estas habilidades incluyen la elaboración mental de planes conductuales, tomarse algo de tiempo antes de decidirse a actuar, resolver con flexibilidad desafíos imprevistos, postergar recompensas inmediatas, y mantenerse enfocado en una tarea específica (Diamond, 2013).

Existe un consenso general de que las funciones ejecutivas están compuestas por tres funciones cognitivas centrales: i) Control de la inhibición o de la interferencia: la capacidad de inhibir conductas prepotentes o automáticas, y controlar la interferencia de distractores por medio del control atencional o de la atención selectiva (Posner y DiGirolamo, 1998; Theeuwes 1991; López-Villalobos, 2016); ii) Memoria de trabajo: el almacenamiento temporal y la manipulación de la información requerida para realizar conductas orientadas a meta (Baddeley, 2021; Baddeley y Hitch 1994; Smith y Jonides 1999); iii) Flexibilidad cognitiva: se ha definido como la habilidad para intercambiar fluidamente entre el curso de dos pensamientos paralelos o dos conductas distintas (Davidson et al., 2006; Collins y Koechlin, 2012), y también como la habilidad para cambiar y adaptar estrategias conductuales de acuerdo a los cambios entre las asociaciones entre estímulo-respuesta-recompensa (Spellman et al., 2021).

A partir de estas funciones ejecutivas centrales, se construyen las funciones ejecutivas de alto orden (Diamond, 2013). Estas funciones son: i) Razonamiento: El proceso cognitivo en el que el conocimiento es aplicado para bosquejar conclusiones o alcanzar un objetivo (Evans et al., 1993; Luria, 1973). Incluye tanto el razonamiento lógico inductivo y deductivo, y está implicado en resolver las relaciones abstractas que subyacen a las analogías (Diamond, 2013); ii) Resolución de problemas: Búsqueda y selección de las acciones más efectivas para lograr un objetivo (Ward & Morris, 2005). El razonamiento y la resolución de problemas juntos conforman el constructo conocido como inteligencia fluida: La habilidad para razonar, resolver problemas y encontrar patrones o relaciones lógicas entre elementos (Ferrer et al., 2010; Kent, 2017); y finalmente iii) la planificación (Collins y Koechlin 2012, Lunt et al., 2012; Lezak, 1995).

La planificación cognitiva consiste en desarrollar un plan secuenciado de pasos para alcanzar un objetivo de una manera organizada, estratégica y eficiente (Domic-Siede et al., 2021; Collins y Koechlin, 2012; Sira y Mateer, 2014; Lunt et al. 2012; Hayes-Roth y Hayes-Roth, 1979). Esta habilidad nos permite, entre otras cosas, imaginar cómo nuestra conducta podría afectar directamente nuestro estado actual y conducirnos a un estado futuro diferente (Benson, 1993).

En los seres humanos, el acto de planificar requiere de la creación de una representación mental de una meta, y la representación del estado conductual actual en relación con la meta a ser alcanzada (Domic-Siede et al., 2021; Hayes-Roth y Hayes-Roth, 1979; Benso, 1993). Una

vez que estas representaciones son creadas, el siguiente paso es la elaboración mental de una secuencia de pasos conductuales para conseguir la meta. Subsecuentemente se ejecuta la ejecución motora de la secuencia de pasos, la cual conduce a la transformación del estado actual en el estado objetivo (Sternberg y Ben-Zeev, 2001; Anderson, 2000). De esta manera, el alcance de los planes puede variar desde un simple comportamiento motor (p. ej., planificar una secuencia de pulsaciones de teclas) (Pascual-Leone et al., 1993) hasta una tarea cognitiva de gran exigencia (p. ej., en el caso de un piloto, decidir los pasos necesarios para aterrizar un avión) (Suchman, 1987). La planificación se puede medir utilizando tareas simples y/o más complejas (Schwartz et al., 1991). Así, podemos distinguir dos modelos diferentes según el nivel de complejidad: la planificación motora simple y la planificación cognitiva. En el caso de la primera, una conducta motora simple involucra una interacción sensoriomotora entre el organismo y su ambiente que culmina en una apropiada respuesta motora (Wong et al., 2014). Wong et al. (2014) propusieron que la planificación motora puede ser dividida en dos grandes dominios: i) el dominio perceptual, en el cual se identifica el objetivo de un movimiento a través de la selección de un objeto y la aplicación de *tasks rules* (reglas de la tarea): qué hacer con el objeto, y definiendo de esta manera el objetivo del acto motor. El siguiente dominio es ii) el motor, que incluye especificar la trayectoria del movimiento para ejecutar la acción deseada, es decir, la elaboración de una representación cinemática, la selección de la acción, y especificar el movimiento. Todos estos procesos forman un marco unificado que describe la vía desde la percepción al movimiento (Wong et al., 2014). En el caso de la planificación cognitiva, el proceso puede ser dividido en dos grandes fases: i) una fase de planificación mental, que implica la representación interna de una secuencia de pasos para conseguir un objetivo (Wilensky, 1983; Domic-Siede et al., 2021) y ii) una fase de ejecución del plan que involucra la acción motora para conseguir el objetivo previamente planificado (Grafman & Hendler, 1991; Domic-Siede et al., 2021). Estas fases son posibles de identificar incluso con algoritmos de inteligencia artificial capaces de detectar estados de actividad de la red cerebral distintivos para cada una de estas dos fases de la planificación (Alchihabi et al., 2021).

El proceso de planificación comprende un conjunto de componentes cognitivos. Cada plan consiste en eventos o pasos que tienen una determinada duración de tiempo. El número de eventos podría variar de acuerdo con las características del plan o del contexto en el que se ejecutará. Los eventos imprevistos podrían desviar leve o fuertemente a la persona del plan. Por ejemplo, una persona podría elaborar un plan para ir a visitar a un amigo a su casa y almorzar juntos. Para hacer esto, esta persona decide ir en bicicleta, generando un plan de ruta para dirigirse donde vive su amigo, el cual puede consistir en varios eventos, por ejemplo, preparar la bicicleta, tomar los elementos de seguridad para conducirla, establecer la ruta que va a tomar, y montar la bicicleta hasta llegar al destino objetivo (Grafman et al., 2005).

Las contingencias que podrían interrumpir un plan pueden ser “*branching*” o bifurcaciones, el cual es un evento que obliga a la persona a detenerse en una etapa específica del plan y resolver el problema imprevisto (Grafman et al., 2005). A partir de ahí, se retoma el plan desde donde se interrumpió. En el ejemplo, la bifurcación puede ocurrir si, en el trayecto, la persona recibe una llamada solicitando comprar algunos comestibles en el camino. Esto

implicaría desviarse de la ruta planificada para comprar lo requerido y luego regresar al mismo punto de la ruta. Otro tipo de evento imprevisto puede ser la planificación reactiva, que implica la introducción inesperada de un nuevo evento del plan. En el ejemplo, podemos considerar que una parte de la ruta planificada quedó inaccesible debido a una reconstrucción o reparación vial, lo que lleva a desviarse por tres calles más para llegar a la casa del amigo. Otra característica de la planificación es que se pueden hacer planes para resolver problemas bien definidos (*"well-defined problems"*) o mal estructurados (*"ill-structured problems"*) (Spector y Grafman, 1994). Retomando el ejemplo, un problema mal estructurado sería planificar una ruta considerando una orientación general desde el origen hasta el destino, donde las calles específicas para llegar al destino se decidirán en línea durante el viaje. Por el contrario, un problema bien definido sería planificar una ruta definiendo previamente todas las rutas a utilizar (Grafman et al., 2005). Además, existen paradigmas conductuales para evaluar el desempeño de la capacidad de planificación que se basan en problemas semánticamente ricos versus problemas semánticamente empobrecidos. En el caso de los problemas semánticamente ricos, requieren de mayores conocimientos previos para resolver el problema (p. ej., problemas de ajedrez, decidir procedimientos médicos en el contexto de emergencias clínicas, etc.). Por otra parte, los laberintos, puzles, etc. representan los problemas semánticamente empobrecidos y que los sujetos típicos generalmente pueden resolver en un período corto (Gilhooly, 2005).

En resumen, los procesos involucrados en la planificación son: la etapa de producción o elaboración (desarrollo del plan), donde mentalmente se genera, representa, almacena, evalúa y selecciona la secuencia de posibles acciones para ser ejecutadas en una secuencia de eventos; y la etapa de ejecución del plan. Para ejecutar el plan, se recupera una secuencia de acciones de la memoria a largo plazo, se carga en la memoria de trabajo y se ejecuta (Gilhooly, 2005). Por lo tanto, la planificación requiere una operación concertada de varios componentes cognitivos de las funciones ejecutivas (p. ej., memoria de trabajo, control atencional, inhibición de la respuesta, flexibilidad cognitiva), lo que dificulta la manipulación experimental y el aislamiento de otras funciones ejecutivas para su medición (Hayes-Roth & Hayes-Roth, 1979; Tremblay et al., 1994). Es por esto que la evaluación clínica de la planificación representa un desafío para la neuropsicología clínica. En particular, desde esta disciplina se ha contribuido considerablemente al estudio de la planificación, específicamente en el diseño de paradigmas conductuales que permiten cuantificar y caracterizar el desempeño normal y deteriorado de la planificación en sujetos neurotípicos y con condiciones neuropsiquiátricas. Esto es relevante, dado que la planificación se ve comprometida en varios trastornos psiquiátricos y cognitivos como en el trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH) (Barkley, 2004; Gau y Shang, 2010), el trastorno depresivo mayor (Bora et al., 2013; Rive et al., 2016), trastorno bipolar (Rive et al., 2016), esquizofrenia (Holt et al., 2013), demencias frontotemporales (Lima-Silva et al., 2013), así como también en las lesiones frontales (Karnath et al., 1991). Incluso en personas que no tienen condiciones clínicamente definidas, las afectaciones de las funciones ejecutivas se manifiestan cuando las personas experimentan estrés, tristeza, soledad o problemas de salud (Diamond y Ling, 2016). Por lo tanto, la implementación de pruebas neuropsicológicas tanto en el ámbito clínico como en investigación es de alta relevancia para la detección de dificultades, el diseño de programas

de intervención, y para conocer más sobre los mecanismos neurocognitivos asociados. Además, las funciones ejecutivas, incluyendo la planificación, son esenciales para la salud mental y física (Will et al., 2011, Riggs et al., 2010), para tener éxito en la escuela y en la vida en general (Davis et al., 2010; Bailey et al., 2007). Son importantes para el desarrollo cognitivo, social y psicológico (Brown et al., 2010; Eakin et al., 2004), por lo que conocer más sobre ellas, desarrollar métodos de evaluación e intervención, es de alta relevancia.

Sin embargo, a pesar de lo esencial que es la planificación cognitiva, los mecanismos neurales subyacentes siguen siendo poco conocidos. Comprender estos mecanismos es crucial para dilucidar cómo somos capaces de tener un comportamiento dirigido a objetivos, por qué esta capacidad falla en determinadas circunstancias, y cómo trabajarla en el contexto de intervención clínica. Por lo tanto, nuestro objetivo es realizar un análisis sistemático de la evidencia disponible respecto de las bases neurobiológicas involucradas en la implementación de la función de planificación. Con esta revisión sistemática será posible esclarecer el estado del arte de la investigación clínica y básica de esta función cognitiva, y así contribuir con información integrada y ordenada para los clínicos e investigadores que se desempeñan en este campo.

1. Método

En este trabajo se realizó una revisión sistemática de la literatura científica publicada en el ámbito de la neuropsicología y las neurociencias en relación con las bases neurales de la capacidad cognitiva de planificación y que usen técnicas de neuroimagen no invasiva como la resonancia magnética funcional (fMRI), la tomografía por emisión de positrones (PET), tensor de imagen de difusión (DTI), la espectroscopia funcional de infrarrojo cercano (fNIRS), la electroencefalografía (EEG) y la magnetoencefalografía (MEG). Para ello, se siguieron las directrices de la declaración de elementos preferenciales para informar sobre revisiones sistemáticas y metanálisis (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: PRISMA*) (Moher et al., 2009; Urrútia y Bonfill, 2010) (Figura 1). Para la generación de imágenes ilustrativas del cerebro (Figura 5) se utilizó el software Brain-Pro® (<https://3d4medical.com/apps/brain-pro>)

1.1. Búsqueda sistemática

La búsqueda sistemática se realizó en octubre de 2022 en PubMed y ScienceDirect, considerando las publicaciones realizadas desde 1996 hasta la actualidad en idioma inglés.

Las palabras claves referidas a planificación, planificación cognitiva, bases neurales, bases neurobiológicas, correlatos neurales, y a las técnicas de neuroimagen: fMRI, PET, DTI, fNIRS, EEG o MEG (en Título, Abstract y Palabras Clave). En particular, utilizamos estas palabras en inglés: (((((((planning[Title/Abstract]) AND (neural basis[Title/Abstract])) OR (neural correlates[Title/Abstract])) OR (prefrontal cortex[Title/Abstract])) OR (fMRI[Title/Abstract])) OR (DTI[Title/Abstract]) OR (PET[Title/Abstract])) OR (EEG[Title/Abstract])) OR (MEG[Title/Abstract])).

Concretamente, se obtuvieron 282,232 resultados en PubMed y 141,149 en ScienceDirect. Antes de proceder a la selección de artículos, se definieron los criterios de inclusión y exclusión.

1.1.1. Criterios de inclusión y exclusión

- Investigaciones empíricas. Que no sean revisiones, estudios de caso único, o capítulos de libros.
- Que utilicen técnicas de neuroimagen no invasivas en humanos para evaluar regiones cerebrales implicadas en la planificación. Se excluyen aquellos que utilicen muestras de animales no humanos y aquellos que usen EEG o MEG sin realizar análisis de fuentes.
- Que se trate de la capacidad de planificación como una función ejecutiva. Se excluyen aquellos que tratan sobre planificación motora simple.
- Que en el diseño se utilice un paradigma conductual de evaluación de la planificación.
- Que la muestra incluya adultos controles sobre los 18 años. Se excluyen los estudios realizados en pacientes con diagnóstico, o de un solo caso.
- Que se hayan publicado entre 1996 y 2022, ambos inclusive.

1.2. Resultados de la búsqueda

La búsqueda inicial arrojó un total de 423,381 artículos. Tras la eliminación de los duplicados, quedaron 423,278, de los cuales se eliminaron 423,206 de acuerdo con los criterios de inclusión y de exclusión (a partir de la inspección del título). Adicionalmente se buscó manualmente en Google Scholar, quedando en un total de 80 artículos en la etapa de cribado. Luego de analizar los criterios de inclusión y exclusión de forma minuciosa, se obtuvo un total final de 14 artículos empíricos y evaluados a texto completo para la presentación de resultados (Figura 1).

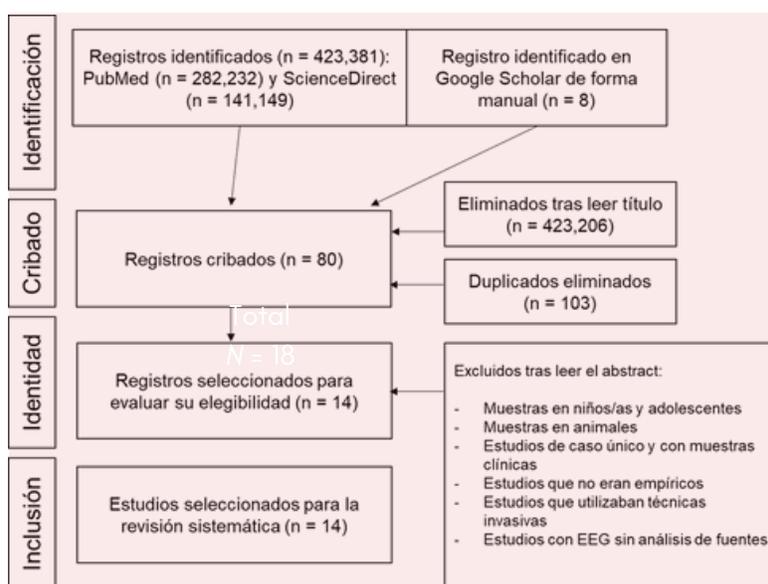


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA en cuatro niveles (Moher et al., 2009).

2. Resultados

2.1. Características de los estudios y resultados

Un resumen de los resultados de los estudios seleccionados puede consultarse en la tabla 1.

Tabla 1. *Estudios revisados*

Estudio	Muestra	Paradigma de evaluación	Técnica de neuroimagen	Resultados
Baker et al. (1996)	N = 6 (5 H y 1 M); edad: entre 18 y 55 años	Tarea de la Torre de Londres virtualizada	PET (rCBF)	Mayor activación en CPF, cingulada, premotora, parietal y occipital. Se interpretan estas áreas como implicadas en la selección y evaluación de la respuesta en planificación. Mayor actividad en CPF rostral se asoció con una mayor dificultad de la tarea.
Owen et al. (1996)	N = 12 (6 H y 6 M); edad: entre 21 y 34 años	Tarea de la Torre de Londres virtualizada	PET (rCBF)	Mayor activación en la CPF dorsolateral media izquierda. También se observaron cambios en la corteza frontopolar ventral bilateral. Los hallazgos implican también a los circuitos frontoestriales en la planificación de alto nivel.
Flitman et al. (1997)	N = 11 (5 H y 6 M); edad: entre 18 y 28 años	Adaptación del Laberinto de Porteus	[H(2)15O]-PET	Mayor activación de CPF durante la planificación en los laberintos, específicamente áreas de Brodmann 8 y 10 (corteza frontopolar), entre otras áreas. La recuperación de un plan cognitivo completo para resolver el laberinto requiere de la participación de la CPF.
Dagher et al. (1999)	N = 6 (2 H y 4 M); edad: entre 49 y 70 años	Tarea de la Torre de Londres virtualizada	PET (rCBF)	La corteza premotora lateral, CCA rostral, y CPF dorsolateral bilateralmente correlacionaron con la complejidad de la tarea. Las áreas CPF dorsolateral, premotora lateral, CCA y caudado forman una red para la planificación del movimiento que interactúa con las áreas del cerebro involucradas principalmente en el procesamiento visual y la ejecución del movimiento.
Lazeron et al. (2000)	N = 9 (5 H y 4 M); edad: entre 20 y 27 años	Tarea de la Torre de Londres virtualizada	fMRI (BOLD)	Se observó activación en la corteza CPF dorsolateral, la CCA, y el lóbulo parietal. Predominantemente mayor activación en CPF dorsolateral en todos los participantes.
Newman et al. (2003)	N = 16 adultos (12 H y 4 M); edad: no reportada	Tarea de la Torre de Londres virtualizada	fMRI - BOLD y conectividad	La CPF derecha podría estar más involucrada en la generación de un plan, mientras que CPF izquierda podría estar más involucrada en la ejecución del plan.
van den Heuvel et al. (2003)	N = 22 (11 H y 11 M); edad: entre 21 y 49 años	Tarea de la Torre de Londres virtualizada	fMRI - BOLD	La actividad de planificación se asoció con un aumento de la actividad en CPF dorsolateral. La carga de la tarea se asoció con una mayor actividad en esta región. El aumento de la complejidad de la tarea se asoció con la actividad en la corteza frontopolar anterior izquierda, una región que está específicamente involucrada en el funcionamiento cognitivo superior de tercer orden.

Kirsch et al. (2006)	N = 49 (27 H y 22 M); edad: entre 18 y 56 años	Laberinto de Porteus virtual	fMRI - BOLD	El rendimiento durante la tarea de resolución de laberintos fue acompañado de un aumento de la actividad de áreas bilaterales de la CPF, lo que indica su papel especial en los procesos de decisión y planificación.
Kaller et al. (2015)	N = 48 (26 H y 22 M); edad: 30.29 años (DE=9.68)	Tarea de la Torre de Londres virtualizada	DTI- Tractografía y Conectividad	La fuerza de la conectividad de la CPF dorsolateral es crítica para predecir las diferencias interindividuales en el desempeño de la planificación en las diferentes etapas de la edad adulta.
Balaguer et al. (2016)	N = 22 (12 H y 10 M); edad: 25.6 años.	Tarea de una Red de Metro virtual	fMRI - BOLD	Los seres humanos representan planes de manera jerárquica. La complejidad del plan jerárquico se codifica en la CPF caudal. La CPF ventromedial y el hipocampo codifican la proximidad a un estado objetivo.
Javadi et al. (2017)	N = 24 (13 H y 11 M); edad: entre 20 y 35 años	Tarea de navegación en una ciudad de Londres virtual	fMRI - BOLD	Cuando la tarea de navegación demanda a los participantes planificar rutas hacia una meta, participa activamente la CPF lateral inferior bilateral. Estos resultados ayudan a dar forma a modelos de cómo las regiones de la CPF respaldan la planificación durante la navegación espacial.
Korn et al. (2018)	N = 28 (15 H y 13 M); edad: 23.5 años (DE = 3.9)	Tarea secuencial de toma de decisiones que demandan planificación	fMRI - BOLD	La toma de decisiones secuenciales en humanos puede surgir de la integración entre políticas heurísticas y óptimas, implementadas por controladores en la CPF medial.
Milla et al. (2019)	N = 20 (10 H y 10 M); edad: 24.6 años (DE = 2.8)	Torre de Hanoi virtualizada	fNIRS - actividad hemodinámica	La CPF está asociada a la complejidad del movimiento y de la integración sensorial durante la planificación.
Domic-Siede et al. (2021)	27 participantes (14 H y 13 M); edad: entre 19 y 38 años	Adaptación virtualizada del Laberinto de Porteus y del Zoo Map Task	EEG - Análisis de fuentes oscilatorias	La actividad oscilatoria <i>theta</i> de la CCM derecha y la CCA izquierda reflejan la alta demanda cognitiva de la tarea de planificación. La actividad de la corteza frontopolar izquierda podría reflejar la participación de esta región en planes autogenerados con éxito.

CPF: Corteza prefrontal; CCA: Corteza Cingulada Anterior; CCM: Corteza Cingulada Media; PET: Tomografía por emisión de positrones; rCBF: Flujo sanguíneo cerebral regional; EEG: Electroencefalografía; fNIRS: Espectroscopia funcional del Infrarrojo Cercano; BOLD: imagen de contraste dependiente del nivel de oxígeno en la sangre; fMRI: Imagen de Resonancia Magnética Funcional; DTI: Tensor de imagen de difusión; H: Hombres; M: Mujeres.

El paradigma más tradicional utilizado en estos estudios para evaluar la planificación es la prueba de La Torre de Londres (Shallice, 1982; Unterrainer et al., 2004; Nitschke et al., 2017). Otros paradigmas encontrados fueron adaptaciones de los Laberintos de Porteus (Flitman et al., 1997; Kirsch et al., 2006; Domic-Siede et al., 2021) o de la prueba del Mapa del Zoológico (Domic-Siede et al., 2021), entre otros (Balaguer et al., 2016; Korn et al., 2018; Milla et al. 2019).

2.2. Paradigmas de evaluación utilizados

2.2.1. Prueba de La Torre de Londres

En particular, la tarea de La Torre de Londres fue adaptada de la Torre de Hanoi (Simon, 1975), y se utiliza en neuropsicología clínica para medir procesos como la organización, la memoria de trabajo, el control inhibitorio de posibles distractores y la flexibilidad cognitiva. La Torre de Londres (Figura 2) consiste en la presentación de tres esferas de diferentes colores cada una (rojo, azul y amarillo) insertadas en un dispositivo con tres varillas de diferentes tamaños: una grande que puede llevar tres esferas, una mediana que puede llevar dos y una que puede llevar solo una. Un segundo dispositivo con una distribución diferente de esferas en diferentes varillas se presenta al sujeto como modelo. Luego se le indica al sujeto que copie el modelo siguiendo algunas reglas. Aquí, los parámetros de rendimiento que se registran incluyen el tiempo de reacción, la cantidad de movimientos realizados y la precisión, los que reflejarán las habilidades de planificación del sujeto. Esta tarea ha demostrado que puede discriminar entre pacientes con lesiones frontales de los controles (Shallice, 1982; Carlin et al., 2000). Las versiones virtuales de esta prueba adaptadas para la investigación en neurociencia cognitiva (Campbell et al, 2009) han demostrado que el desempeño en esta tarea depende en gran medida del funcionamiento del lóbulo frontal (Colvin, Dunbar & Grafman, 2001; Owen et al., 1995) como analizamos en esta revisión.

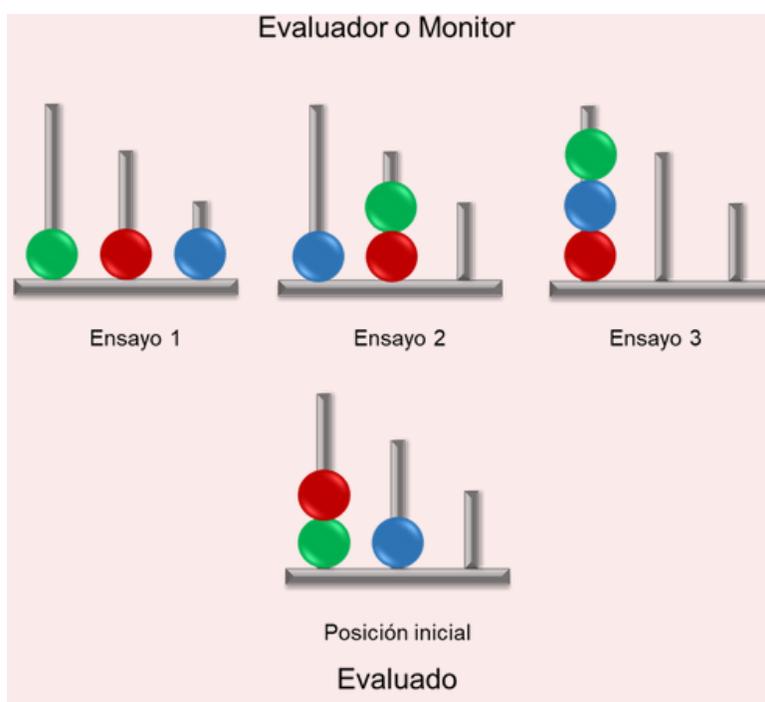


Figura 2. Representación de una tarea de la Torre de Londres. Arriba, se instruye al sujeto para que copie diferentes modelos siguiendo un conjunto de reglas: mover una esfera a la vez, con el menor número posible de movimientos y lo más rápido posible. Abajo, la posición inicial previa a la ejecución de los movimientos (modificado de Shallice, 1982).

2.2.2. Prueba del Laberinto de Porteus

En el caso del Laberinto de Porteus (Porteus, 1959), se ha utilizado ampliamente para estudiar las habilidades visuoespaciales y las funciones ejecutivas (Figura 3), como la resolución de problemas y la planificación en sujetos control y población neuropsiquiátrica (por ejemplo, esquizofrenia, demencias, alcoholismo, TDAH) en un contexto visuoespacial altamente dependiente de corteza prefrontal (CPF) (Krieger et al., 2001; Peters y Jones, 1951; Gallhofer et al., 1996; Tremblay et al., 1994; Lezak, 1995). Además, los pacientes neurológicos con lesiones fronto-mediales han mostrado deterioro en el desempeño de esta tarea con un mayor número de errores (entradas en callejones sin salida) (Karnath, et al., 1991). Originalmente, Laberintos de Porteus es una tarea de lápiz y papel que comienza con un simple análisis de estímulos visuales. El sujeto debe encontrar y trazar el camino correcto desde un punto de partida hasta la salida (entre varias opciones), siguiendo algunas reglas como evitar cruzar caminos cortados y callejones sin salida, y actuar lo más rápido posible (Porteus, 1959). Cada vez que aparece una bifurcación mientras se dibuja el camino, los sujetos toman decisiones para lograr la meta y evitar romper las reglas dadas (Lis et al., 2005).

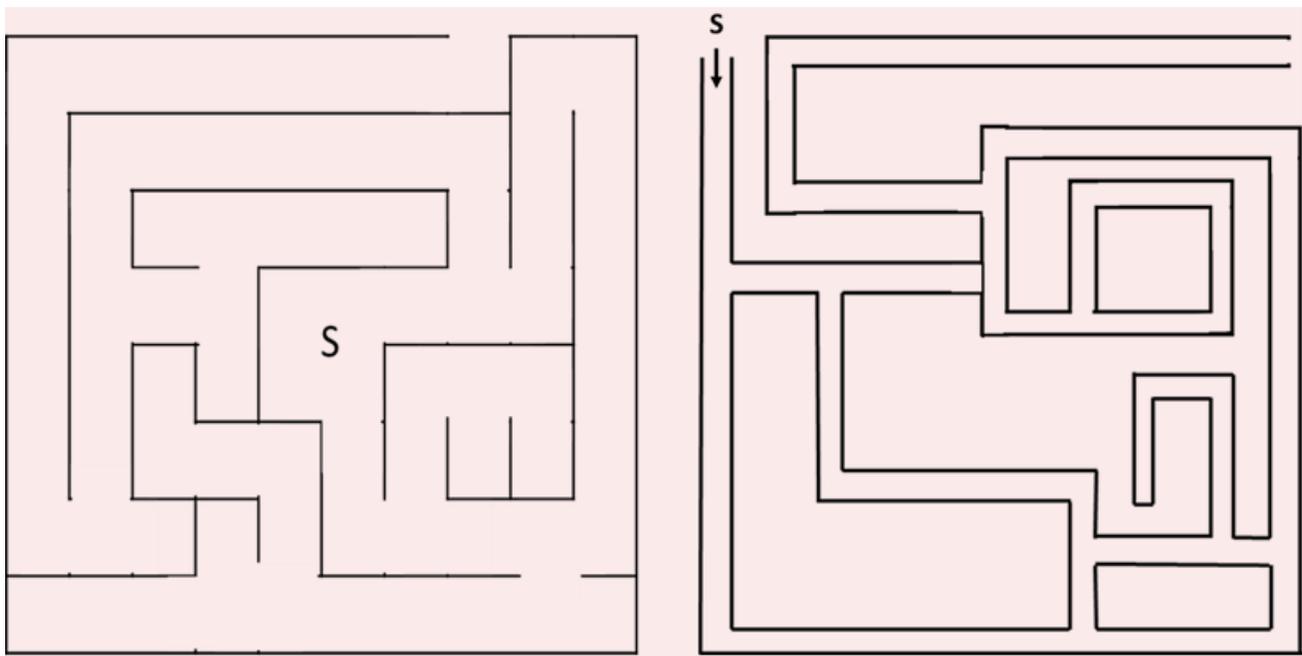


Figura 3. Representación de la tarea del Laberinto de Porteus. Se instruye a los sujetos para que encuentren una salida dibujando un camino que comience en "S" siguiendo un conjunto de reglas (Modificado de Porteus, 1959).

La recuperación de un plan cognitivo completo para resolver el laberinto requiere la participación de la corteza prefrontal (Flitman et al., 1997). Actualmente, el Laberinto de Porteus Maze se ha adaptado utilizando técnicas de neuroimagen (Tremblay et al., 1996; Kirsch et al. 2006). Kirsch et al. (2006) estudiaron los cambios cerebrales hemodinámicos durante la ejecución de la planificación utilizando esta tarea. Dado que la planificación involucra varios componentes cognitivos, el uso de condiciones control adecuadas es crucial en la evaluación cognitiva (Crowe et al., 2000; Krieger et al., 2001). Interesantemente, estos autores utilizaron

dos condiciones control para separar la planificación de otros componentes cognitivos: una condición de reposo, en la que se instruyó a los sujetos para que miraran pasivamente los estímulos que consistían en un patrón que no era un laberinto pero tenían una complejidad psicofísica comparable; y una condición de pseudo-laberinto, donde se instruyó a los sujetos para que encontraran una salida en los estímulos del pseudo-laberinto sin puntos de decisión (sin bifurcaciones ni caminos sin salida, por lo tanto carecían de la demanda del componente de planificación) (Kirsch et al., 2006), lo que permite identificar posteriormente regiones cerebrales que participan de la planificación versus aquellas que participan de otros aspectos como análisis visoespacial del estímulo.

2.2.3. Prueba del Mapa del Zoológico

Debido a la necesidad de contar con pruebas cognitivas con validez ecológica, Wilson et al. (1996) diseñaron la batería *Behavioral Assessment of the Dysexecutive Syndrome* para medir las funciones ejecutivas. Esta batería incluye una subprueba denominada Tarea del Mapa del Zoológico, o *Zoo Map Task* (Figura 4), que proporciona indicadores válidos de la capacidad de planificación y tiene la ventaja de permitir la medición de las habilidades de planificación y organización de manera más ecológica por su validez predictiva (Oosterman et al., 2013).

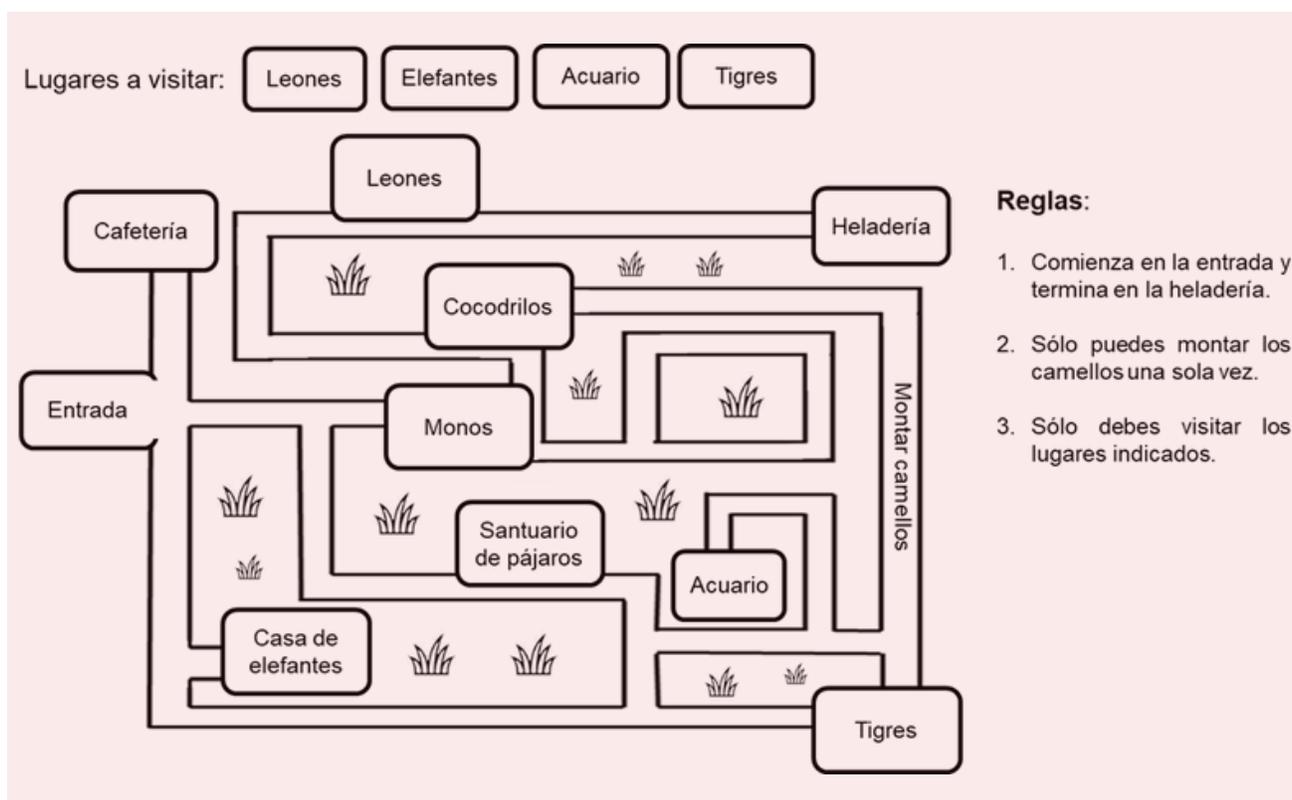


Figura 4. Representación de la tarea del Mapa del Zoológico. Se instruye a los sujetos a que visiten lugares específicos en el mapa siguiendo algunas reglas. Se registra el tiempo de planificación y de ejecución, así como también la comisión de errores (Modificado de Wilson et al., 1996).

La tarea del mapa del zoológico es una prueba de lápiz y papel que consiste en planificar una ruta para visitar 6 ubicaciones de un total de 12 en un estímulo que consiste en un mapa de un zoológico. Las diferentes ubicaciones son lugares comunes que es posible encontrar en un zoológico regular, por ejemplo, una casa de elefantes, una jaula de leones, un lugar de descanso, una cafetería, etc. Dos condiciones evalúan diferentes niveles de planificación: i) la condición de formulación en la que se instruye a los sujetos para que planifiquen una ruta para visitar seis lugares en el orden que prefieran, pero de acuerdo con un conjunto de reglas. Luego, ii) la condición de ejecución, donde se instruye a los sujetos para que visiten seis lugares en un orden específico dado y siguiendo un conjunto de reglas también. Estas dos condiciones proporcionan información sobre las habilidades de planificación en problemas pobremente estructurados (formulación) y bien estructurados (ejecución). La primera se ha presentado como una tarea cognitivamente más exigente en una situación abierta porque se requiere que los sujetos desarrollen una estrategia lógica para lograr el objetivo. Antes de trazar un camino, se debe elaborar una secuencia de operadores; de lo contrario, es muy probable que se cometan errores. Por otro lado, la condición de ejecución requiere una menor demanda cognitiva porque la resolución de una tarea que implica seguir una estrategia específica impuesta externamente solo requiere monitorear la implementación del plan formulado para lograr la meta (Wilson et al., 1996).

Los parámetros de desempeño en esta tarea son los siguientes: la puntuación obtenida al realizar correctamente la secuencia, la cantidad de errores (por ejemplo, caminos que se usan más de una vez, desviaciones, fallar en dibujar una línea continua y visitar lugares equivocados) y el tiempo utilizado para planificar (elaboración mental) y para dibujar las rutas planificadas (ejecución) (Allain et al., 2005). El desempeño obtenido de las dos condiciones permite evaluar la capacidad de planificación espontánea (condición de formulación) versus ejecutar una estrategia impuesta externamente cuando la estructura es alta (condición de ejecución).

El *Zoo Map Task* se ha utilizado para estudiar el rendimiento de la planificación en diferentes poblaciones. Por ejemplo, Allain et al. (2005) encontraron que los adultos mayores tenían más dificultades a nivel de formulación que los adultos jóvenes. Además, Boyer et al. (2014) encontraron que los niños con la presentación clínica inatento de TDAH mostraron una mayor latencia en el tiempo requerido para completar la tarea en comparación con los controles.

Sin embargo, el desempeño adecuado en esta tarea no depende únicamente de las habilidades de planificación o de la función ejecutiva evaluada en particular, sino también de varias funciones cognitivas. Oosterman et al. (2013) examinaron si el dominio de la planificación predecía mejor esta tarea en particular en una muestra de pacientes neurológicos y psiquiátricos (p. ej., pacientes con lesiones cerebrales, y pacientes con trastornos afectivos), en comparación entre la planificación y otros dominios cognitivos (memoria episódica, velocidad de procesamiento y control inhibitorio) evaluados con diferentes pruebas neuropsicológicas. Estos investigadores descubrieron que la prueba del Mapa del Zoológico era el mejor predictor de la planificación en comparación con otras pruebas, y este es un indicador válido de la capacidad de planificación, especialmente al considerar la cantidad de errores (visitar lugares equivocados) (Oosterman et al., 2013).

2.2.4. Laberinto de Porteus y Mapa del Zoológico adaptado

Teniendo en cuenta las ventajas del Laberinto de Porteus y del *Zoo Map Task* en comparación a tareas como la Torre de Londres, Domic-Siede et al. (2021) diseñaron un paradigma de evaluación virtual basado en estas pruebas que permiten medir la función de planificación en un entorno de laboratorio controlado. Esta prueba está compuesta por una tarea de planificación que exige implementar esta función en cuatro diferentes períodos presentes en las fases de la planificación cognitiva: i) un período de planificación, donde se le pide a los sujetos que planifiquen rutas para visitar diferentes lugares en un mapa mientras monitorean si el plan que se está elaborando sigue un conjunto de reglas; ii) un período de mantenimiento, donde los sujetos tienen que almacenar la ruta planificada en su memoria de trabajo. A esto le sigue iii) el período de ejecución, donde los sujetos trazan el camino previamente planificado mientras monitorean y controlan su correcta ejecución. Finalmente, iv) un período de respuesta, donde los sujetos informan la secuencia de animales visitados de acuerdo con su ruta planificada. Este paradigma utiliza diferentes etapas para medir diferentes parámetros que dan cuenta de la capacidad de planificación, incluidos diferentes componentes involucrados (la memoria de trabajo, el control atencional, el análisis visoespacial, entre otros) de una manera moderadamente análoga a situaciones de la vida real. Además, para controlar los factores confundentes, el paradigma considera una tarea de control con la misma estructura y estímulos psicofísicos que la tarea de planificación, y exige la implementación de componentes cognitivos que también emergen durante la planificación cognitiva (memoria de trabajo, control atencional y análisis visoespacial). La única excepción aquí es la elaboración de un plan en sí. Esto permite un aislamiento del factor de planificación cognitiva para contrastar los parámetros tanto del rendimiento conductual como de las señales cerebrales que se adquieran mientras se realiza la prueba.

2.3. Resultados neuroimagen

Los estudios de neuroimagen han proporcionado evidencia valiosa sobre el papel crítico de la CPF en la planificación. Los diferentes paradigmas de evaluación de la planificación, especialmente La Torre de Londres (Shallice, 1982; Unterrainer et al., 2004) han demostrado la participación de la CPF dorsolateral (Nitschke et al., 2017), la corteza cingulada media (CCM), la corteza cingulada anterior (CCA) y el lóbulo parietal superior, entre otras regiones cerebrales (Kirsch et al., 2006; Newman et al., 2003; Owen et al., 1996).

La primera evidencia en la literatura se proporcionó en un conjunto de estudios que utilizaron PET y el paradigma de la Torre de Londres. Estos estudios mostraron que la CPF dorsolateral está involucrada, aumentando su actividad, durante la planificación (Owen et al., 1996; Baker et al., 1996; Dagher et al., 1999). Por ejemplo, Owen et al. (1996) evaluaron los cambios en el flujo sanguíneo cerebral regional (rCBF) asociados con la ejecución de una tarea de planificación mientras los sujetos realizaban la prueba Torre de Londres en diferentes niveles de complejidad. En el estudio, se observaron aumentos significativos en rCBF en la CPF dorsolateral media izquierda durante la condición de planificación.

Usando la misma técnica y paradigma conductual, Dagher et al. (1999) evaluaron los cambios relativos de rCFB asociados con las condiciones de planificación en diferentes niveles de complejidad y encontraron que solo la CPF dorsolateral, la CCA y el núcleo caudado covarían su rCBF de acuerdo con la complejidad de la tarea.

Otro conjunto de evidencia proviene de estudios que utilizan fMRI, que también encontraron un aumento en la señal hemodinámica dependiente del nivel de oxigenación en sangre (BOLD), principalmente en CPF dorsolateral mientras se realizaba la planificación en un paradigma de la Torre de Londres (Lazeron et al., 2000; Newman et al., 2003; van den Heuvel et al., 2003).

En particular, Lazeron et al. (2000) mostraron una activación bilateral en CPF dorsolateral, CCA y regiones parietales durante la planificación. Además, Newman et al. (2003) compararon la activación cerebral durante el desempeño en la tarea de la Torre de Londres con tres niveles de complejidad (fácil, moderado y difícil). La CPF dorsolateral bilateral y el lóbulo parietal superior exhibieron un aumento en la señal BOLD cuando aumentaba la complejidad de la tarea. Además, van den Heuvel et al. (2003) encontraron que la planificación se correlacionó con un aumento de la señal BOLD en las regiones parietal, estriado y CPF dorsolateral. Curiosamente, el aumento de la complejidad de la tarea se correlacionó sólo con la actividad en la corteza frontopolar izquierda. Este hallazgo es relevante, puesto que se ha demostrado que esta región está involucrada en el funcionamiento cognitivo superior de tercer orden: mantener temporalmente en mente una meta en curso mientras primero se completan tareas intermedias o submetas (Burguess et al., 2001; Baddeley, 1996).

Otros estudios que utilizan diferentes paradigmas de comportamiento también han demostrado la implicación de la CPF dorsolateral en la función de planificación. Por ejemplo, utilizando fMRI y un paradigma de Laberinto de Porteus, Kirsch et al. (2006), encontraron aumentos de la señal BOLD en CPF dorsolateral, CPF ventrolateral y la parte dorsal del lóbulo parietal. Sin embargo, determinar las contribuciones cognitivas relativas de estas diferentes regiones involucradas en la planificación ha sido durante mucho tiempo un tema de debate. Por ejemplo, se puede argumentar que la activación de la CPF dorsolateral podría reflejar actividad relacionada con la memoria de trabajo (Christoff y Gabrieli, 2001), la cual es altamente demandada durante la planificación.

Aunque varios estudios mencionados anteriormente se realizaron antes de la introducción de métodos de corrección (como las comparaciones múltiples, *double-dipping*, etc.) en la investigación de neuroimagen (Woo et al., 2014; Eklund et al., 2016), en los últimos años se ha proporcionado evidencia que respalda la participación de la CPF en la función de planificación, utilizando métodos actualizados de corrección por comparaciones múltiples, por ejemplo, *False Discovery Rate*, entre otros (Milla et al., 2019; Kaller et al., 2015; Korn y Bach, 2018; Javadi et al., 2017; Spires y Gilbert, 2015; Brown et al., 2016; Balaguer et al., 2016).

Por ejemplo, Balaguer et al. (2016) utilizando fMRI y una tarea donde los sujetos fueron instruidos a realizar viajes en un metro virtual y para esto debían planificar rutas, encontraron que los planes se representan jerárquicamente. Estos planes jerárquicos son codificados por la corteza prefrontal caudal (la región premotora anterior bilateral y la CPF dorsomedial) (Balaguer et al., 2016). Además, Milla et al. (2019), utilizando fNIRS, mostró asociaciones entre el rendimiento de la planificación y los cambios de hemoglobina oxigenada en CPF durante un paradigma de la Torre de Hanoi, la cual usa principios similares a la Torre de Londres. Además, Kaller et al. (2015) encontraron que la fuerza de la conectividad de la CPF dorsolateral media izquierda y derecha fue fundamental para predecir las diferencias interindividuales en el desempeño de la planificación en las diferentes etapas de la edad adulta. Además, Korn y Bach (2018) utilizando fMRI demostraron que la toma de decisiones secuenciales implementada por la planificación puede surgir de la integración entre políticas heurísticas y óptimas, implementadas por controladores en la corteza prefrontal medial.

Finalmente, Domic-Siede et al. (2021) utilizando una tarea virtual basada en Laberinto de Porteus y el Zoo Map Task mientras registraban la actividad electroencefalográfica, analizaron las fuentes cerebrales y encontraron que la actividad de la banda de frecuencia *theta* de la CCM y la CCA derechas correlacionaron con mayor tiempo requerido para elaborar planes, reflejando mayor demanda cognitiva. Además, la actividad *theta* de la corteza frontopolar izquierda mostró una asociación con la eficiencia y precisión en hacer un plan. En particular, menores tiempos de ejecución del plan correlacionaron con un aumento de la actividad *theta* frontopolar izquierda. A su vez, menores tiempos de ejecución correlacionaron positivamente con una mayor tasa de respuestas correctas.

En síntesis, regiones de la CPF juegan un rol relevante durante las tareas de planificación. Sin embargo, la contribución precisa de cada una de estas regiones en la implementación concertada de la planificación, que requiere de la puesta en marcha de funciones cognitivas de manera concertada y coordinada, aún queda por dilucidar.

3. Discusión y conclusiones

En esta revisión, nuestro objetivo fue analizar la evidencia disponible respecto de los estudios sobre las bases neurales que soportan la capacidad de planificación, junto con los distintos paradigmas utilizados para demandar su implementación.

Numerosos estudios tanto en población control utilizando neuroimagen funcional como también estudios de lesiones han sugerido que la CPF, y en particular la frontopolar, la parte más anterior de los lóbulos frontales está involucrada en procesos cognitivos complejos que subyacen al razonamiento, la planificación y la memoria de trabajo, formando así el vértice del sistema ejecutivo (Koechlin y Hyafil, 2007). La participación de la corteza frontopolar se ha demostrado durante varias tareas que demandan funciones ejecutivas. Esto incluye la tarea de la Torre de Londres que mide la función de planificación (Baker et al., 1996); el Test de Matrices Progresivas de Raven, que proporciona una estimación no verbal de la inteligencia

fluida (Prabhakaran et al., 1997); la prueba de clasificación de tarjetas de Wisconsin, que mide la flexibilidad cognitiva (Berman et al., 1995; Goldberg et al., 1998; Nagahama et al., 1996); así como tareas de razonamiento inductivo y probabilístico (Goel et al., 1997; Osherson et al., 1998); y tareas con ramificación cognitiva/multitarea donde lograr objetivos en muchas tareas en el que se requiere mantener información sobre una tarea pendiente en la memoria a corto plazo mientras se completan subtareas alternativas (Dreher et al., 2008). Los pacientes con lesiones en la corteza frontopolar no muestran alteraciones significativas en las pruebas neuropsicológicas formales de percepción, lenguaje e inteligencia. Sin embargo, parecen marcadamente deteriorados en la ramificación cognitiva/multitarea (Dreher et al., 2008) y la toma de decisiones en situaciones abiertas y mal estructuradas, que a menudo ocurren en la vida cotidiana (Burgess et al., 2007). Por lo general, estos eventos se caracterizan por: i) no especificar de forma precisa cuál es la forma correcta de comportarse; ii) hay muchos cursos de acción posibles, y iii) las conductas que conllevan a comportarse adecuadamente o de forma exitosa deben ser autodeterminadas (Burgess, 2000; Burgess et al., 2000; Goldstein, 1993). En otras palabras, los pacientes con lesiones en CPF rinden peor en situaciones de la vida cotidiana donde la planificación debe ser realizada sobre la base de dar solución a problemas poco estructurados (*"ill-structured problems"*). Esto se contrapone a la propuesta de la mayoría de las pruebas neuropsicológicas, como la Torre de Londres, las cuales presentan problemas muy bien definidos (*"well-defined problems"*) (Spector y Grafman, 1994).

Adicionalmente, es relevante el considerar la investigación en humanos y animales no humanos utilizando métodos de registros con mayor resolución espacial y temporal. Una cohorte de estudios que evaluó la función de la corteza frontopolar medial en monos ha demostrado su papel en el seguimiento de la relevancia de los objetivos actuales y alternativos. Durante la recepción de recompensas después de una respuesta exitosa autogenerada, la corteza frontopolar en monos mostró una mayor actividad (electrofisiológica) en comparación con otras áreas de la CPF (Tsujimoto y Genovesio, 2017; Tsujimoto et al., 2010). Además, Mansouri et al. (2015) estudiaron los efectos de las lesiones bilaterales en la corteza frontopolar de monos sobre su capacidad para realizar una versión adaptada de la Prueba de clasificación de tarjetas de Wisconsin (WCST), un test que evalúa flexibilidad cognitiva, en diferentes condiciones (Miles et al., 2021). Se encontró que las lesiones de la corteza frontopolar no causan deterioro en las medidas de comportamiento relacionadas con la memoria de trabajo de las reglas, la atención selectiva a la regla actual, la inhibición de una regla previamente relevante o la evaluación del resultado del comportamiento para cambiar entre reglas abstractas. Por otro lado, las lesiones aumentaron la capacidad de recordar reglas relevantes después de distracciones significativas (presentación de recompensas en momentos aleatorios) o la necesidad de ejecutar una tarea secundaria. Estos resultados apuntan al papel especializado de la corteza frontopolar en desconectar el control ejecutivo de la tarea actual y redirigir la atención a potenciales nuevas fuentes de recompensa para explorar nuevas oportunidades/objetivos. Esto, a su vez, también apunta a una disociación funcional entre la corteza frontopolar y otras áreas prefrontales (Mansouri et al., 2015).

Además, los resultados obtenidos bajo la condición WCST que presentaba una tarea que involucra ramificaciones cognitivas, sugieren que los monos no lesionados son incapaces de

retener información relevante. Ellos simplemente reinician la tarea anterior después de completar o explorar otras opciones o fuentes de recompensas. Por el contrario, la ramificación cognitiva es un aspecto inherente del comportamiento dirigido a objetivos para la cognición humana (Mansouri et al., 2017). Los seres humanos con lesiones laterales de la corteza frontopolar exhiben un rendimiento deficiente en tareas que exigen ramificación cognitiva. Esto sugiere que la integridad la corteza frontopolar lateral, una región que parece no tener una homóloga en el cerebro del mono (Neubert et al., 2014), es necesaria para realizar tareas que requieren mantener un objetivo principal en mente mientras se procesan metas secundarias.

Teniendo en cuenta los estudios mencionados anteriormente, Mansouri et al. (2017) propusieron un modelo funcional de la corteza frontopolar en monos. El modelo establece que la CPF participa en un modo de comportamiento de explotación, que consiste en maximizar el valor que se puede obtener de una tarea u objetivo en curso (Boschin et al., 2015; Mansouri et al., 2015). Por ejemplo, un mono dedicado a acicalar a un compañero durante mucho tiempo con la finalidad de obtener futuras recompensas sociales. En el caso de los humanos, podemos imaginarnos estar contratado en un trabajo específico en un entorno bien estructurado, asignando nuestros recursos cognitivos para resolver desafíos predeterminados para lograr una meta y beneficiándonos de esta fuente conocida de recompensa. En tal escenario, la corteza frontopolar puede participar en un modo de exploración del comportamiento, monitoreando el entorno en busca de objetivos alternativos y su potencial como una nueva fuente de recompensa, facilitando la desvinculación del comportamiento en curso para asignar los recursos cognitivos a una de las tareas alternativas (Boschin et al., 2015; Mansouri et al., 2015). Siguiendo el ejemplo, en el caso de un mono que se dedica a acicalar a un compañero, es fundamental reasignar los recursos cognitivos a otras tareas potencialmente relevantes, por ejemplo, a señales de un depredador, fuentes de alimento u otras oportunidades sociales (Mansouri et al., 2015). En el caso de los humanos, si se ofrece una promoción durante el trabajo actual, podríamos monitorear y evaluar esta nueva fuente potencial y ventajosa de recompensa antes de tomar una decisión.

La idea de la función de la corteza frontopolar en la distribución de los recursos de atención y ejecutivos hacia otras opciones de conducta distinta del comportamiento predeterminado en curso, puede explicar la participación crítica de la corteza frontopolar humana en una variedad de funciones cognitivas, por ejemplo: la divagación mental (*mind-wandering*), la planificación, el razonamiento abstracto, la multitarea y la ramificación cognitiva, ya que estos requieren cambiar de una opción de comportamiento en curso a otra, considerando múltiples opciones de comportamiento aprendidas o explorando otras nuevas.

Se han realizado estudios que combinan modelamiento computacional, pruebas conductuales y evidencia utilizando fMRI para proponer un nuevo modelo que explique los procesos de arbitraje cognitivo entre los modos de comportamiento de explotación y exploración. De acuerdo con este modelo, existe un sistema básico (mediado por la corteza frontopolar medial) que monitorea la relevancia del comportamiento en curso en línea y activa la exploración no dirigida cuando este comportamiento en curso se considera irrelevante. La

relevancia del comportamiento en curso se basa en los posibles resultados posteriores y la presencia de claves contextuales que se han construido y almacenado previamente en la memoria a largo plazo. El segundo (mediado por la corteza frontopolar lateral) es un sistema que monitorea la relevancia de diferentes comportamientos alternativos en línea.

Estos comportamientos se aprendieron previamente cuando el sistema básico los consideró relevantes mientras los usaba como comportamiento continuo, pero posteriormente se consideraron irrelevantes. Este sistema permite reemplazar el comportamiento en curso por uno de estos comportamientos alternativos cuando el primero ya no es considerado relevante por el sistema básico. Este modelo integra los dos sistemas llevados a cabo por la corteza frontopolar medial y lateral, dando cuenta de las elecciones secuenciales humanas en entornos inciertos, cambiantes, recurrentes o abiertos (Koechlin, 2011; Koechlin et al., 1999; Donoso et al., 2014; Koechlin, 2014; Wan et al., 2016).

Además, los estudios de fMRI en humanos muestran que monitorear la relevancia de los comportamientos en función de los resultados esperados se asocia con activaciones prefrontales anteriores: la CPF medial ha mostrado un rol en monitorear el comportamiento en curso y la CPF lateral en monitorear comportamientos alternativos (Koechlin, 2011; Koechlin et al., 1999; Donoso et al., 2014). Este último rol se ha visto en la región frontopolar previamente identificada como auxiliar de la ramificación cognitiva (Koechlin, 2011; Koechlin et al., 1999; Donoso et al., 2014), y puede no tener homólogo en primates no humanos (Neubert et al., 2014).

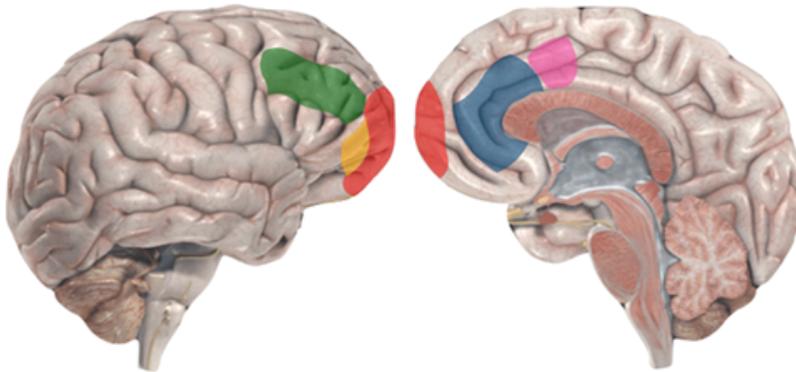
En el contexto de la planificación en humanos, la corteza frontopolar medial puede activarse mientras se monitorea la pertinencia de elaborar una determinada secuencia de pasos para lograr una meta (exploración no dirigida). Alternativamente, la corteza frontopolar lateral podría activarse cuando la corteza frontopolar medial considere que el plan realizado es irrelevante, y se está evaluando algunas estrategias, comportamientos y subplanes alternativos para reemplazar el subplan en curso (exploración dirigida).

Tomando los antecedentes empíricos expuestos en su conjunto, varias regiones centrales de la CPF podrían estar involucradas en diferentes procesos cognitivos durante la planificación. Primero, se genera un paso secuenciado de subobjetivos para lograr un objetivo (Unterrainer y Owen, 2006). Para lograr esto, la CPF dorsolateral participa en el mantenimiento y representación de la meta junto con la manipulación de la información generada externamente, contribución con carga de memoria de trabajo (Christoff y Gabrieli, 2000). Mientras se elabora el plan, la CCA monitorea el comportamiento y el desempeño en curso para ajustarse en caso de errores (Quilodran et al., 2008). Mientras que la CCM contribuye en aumentar la atención a los estímulos relevantes (Orr y Weissman, 2009). Además, la corteza frontopolar puede estar involucrada en la distribución de recursos ejecutivos fuera del comportamiento en curso para explorar diferentes subobjetivos alternativos para lograr el objetivo principal del plan (realizar funciones de ramificación y multitarea) (Mansouri et al., 2017). Entonces, la corteza frontopolar medial evalúa la relevancia del comportamiento en curso, mientras que la corteza frontopolar lateral está involucrada en el seguimiento y la

manipulación de los planes autogenerados junto con la redirección de los recursos cognitivos a fuentes novedosas de subobjetivos para lograr el objetivo planificado que se mantiene y representa en la memoria de trabajo (Christoff y Gabrieli, 2000; Mansouri et al., 2017) (Figura 5).

■ CPF Dorsolateral

Mantenimiento de la representación de objetivos y contribuye a procesos de control que ocurren en regiones cerebrales posteriores (Miller y Cohen, 2001); memoria de trabajo/complejidad del plan (Owen et al., 1996; Newman, 2003); monitoreo y manipulación de información externamente generada (Christoff y Gabrieli, 2000).



■ Corteza Frontopolar Lateral

Mantener temporalmente en mente una meta en curso mientras se completan submetas (Burgess et al., 2001; Baddeley, 1996; Dreher et al., 2008); monitoreo y manipulación de planes/decisiones autogeneradas internamente (Christoff y Gabrieli, 2000; Burgess et al., 2000; Goldstein, 1993); desconectar el control ejecutivo de la tarea actual y redirigir la atención a nuevas fuentes de recompensa para explorar nuevas oportunidades/objetivos (Mansouri et al., 2015).

■ Corteza Cingulada Anterior

Participa en acciones de seguimiento y detecciones de conflictos que demandan ajuste conductual, reevaluación de acciones (Quilodran et al., 2008); predicción de errores (Brown, 2017).

■ Corteza Cingulada Media

Control atencional; aumentar la atención hacia los estímulos relevantes se correlaciona con los tiempos de reacción al orientar la atención hacia estos estímulos (Orr y Weissman, 2009).

■ Corteza Frontopolar Medial

Exploración no dirigida: supervisa la relevancia del comportamiento en curso en línea para posiblemente redistribuir los recursos de control cognitivo a otros objetivos potenciales (Mansouri et al., 2015).

Figura 5. Rol putativo funcional de las regiones de CPF durante la planificación.

Adicionalmente, durante las funciones de control cognitivo, se ha establecido que las oscilaciones *theta* de CPF actúan como un candidato biofísico que refleja una firma para la implementación del control cognitivo, que establece comunicación y coordinación en fase *theta* a través de otras regiones del cerebro (Cavanagh y Frank, 2014). En este sentido, Domic-Siede et al. (2021) encontraron que la implementación de la planificación cognitiva induce una actividad *theta* frontal que se origina en las regiones de CPF (como la corteza frontopolar, CCA, CCM), y se asocia a diversos aspectos del rendimiento cognitivo en planificación. Por lo tanto, la actividad *theta* frontal podría ser un mecanismo fisiológico de la dinámica temporal, reflejando procesos de planificación cognitiva a nivel de amplitud y fase (Buzsáki y Draguhn, 2004).

Nosotros planteamos, por medio de esta revisión sistemática una: i) integración de resultados empíricos sobre la implicación de la CPF en la capacidad de planificación, ii) proveyendo de una integración teórica respecto del rol que tiene la CPF y en particular la corteza frontopolar, iii) junto con una discusión en relación con los métodos de evaluación cognitiva disponibles. Esto representa información sintetizada e integrada valiosa para, no solamente los investigadores en el campo de la neurociencia cognitiva, sino que también para los

neuropsicólogos y los psicólogos clínicos. Nosotros proponemos que una teoría cognitiva y explicaciones teóricas sobre la conducta y la cognición pueden beneficiarse de la información disponible que existe sobre el funcionamiento del cerebro y así avanzar en diseños de evaluación e intervención que consideren aspectos multidisciplinarios.

Principales Hallazgos: En esta revisión sistemática encontramos que los principales métodos de evaluación de la capacidad de planificación durante el registro de actividad cerebral se tratan de pruebas adaptadas para su uso computarizado. Estas pruebas son: La Torre de Londres y Laberinto de Porteus. Además, consistentemente, los estudios muestran la implicancia de la corteza prefrontal en el rendimiento en planificación, en particular el área dorsolateral de la CPF, corteza cingulada anterior y frontopolar. Se discute el rol de estas áreas en la conducta y en la cognición, así como implicancias relevantes a la hora de diseñar métodos de evaluación e intervención en clínica.

Referencias

- Alchihabi, A., Ekmekci, O., Kivilcim, B. B., Newman, S. D., & Yarman Vural, F. T. (2021). Analyzing Complex Problem Solving by Dynamic Brain Networks. *Frontiers in neuroinformatics*, *15*, 670052. <https://doi.org/10.3389/fninf.2021.670052>
- Allain, P., Nicoleau, S., Pinon, K., Etcharry-Bouyx, F., Barré, J., Berrut, G., Dubas, F., & Le Gall, D. (2005). Executive functioning in normal aging: a study of action planning using the Zoo Map Test. *Brain and cognition*, *57*(1), 4-7. <https://doi.org/bx4fqp>
- Anderson, J. R. (2000). *Cognitive psychology and its implications* (5a ed). Worth.
- Baddeley A. D. (2021). Developing the Concept of Working Memory: The Role of Neuropsychology. *Archives of clinical neuropsychology (Online)*, *36*(6), 861-873. <https://doi.org/gp2rg9>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1994). Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology*, *8*(4), 485-493. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.8.4.485>
- Baddeley, A. (1996). Exploring the Central Executive. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *49*(1), 5-28. <https://doi.org/10.1080/713755608>
- Bailey C. E. (2007). Cognitive accuracy and intelligent executive function in the brain and in business. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1118*(1), 122-141. <https://doi.org/cpqvqw>
- Baker, S. C., Rogers, R. D., Owen, A. M., Frith, C. D., Dolan, R. J., Frackowiak, R. S. J., & Robbins, T. W. (1996). Neural systems engaged by planning: A PET study of the tower of London task. *Neuropsychologia*, *34*(6), 515-526. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00133-6](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00133-6)
- Balaguer, J., Spiers, H., Hassabis, D., & Summerfield, C. (2016). Neural Mechanisms of Hierarchical Planning in a Virtual Subway Network. *Neuron*, *20*(4), 893-903. <https://doi.org/gffg4j>

- Barkley, R. A. (2004). Adolescents with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: An Overview of Empirically Based Treatments. *Journal of Psychiatric Practice, 10*(1), 39-56. <https://doi.org/10.1097/00131746-200401000-00005>
- Benson, D. F. (1993). Prefrontal abilities. *Behavioural Neurology, 6*(2), 75-81. <https://doi.org/gcd8gk>
- Berman, K. F., Ostrem, J. L., Randolph, C., Gold, J., Goldberg, T. E., Coppola, R., Carson, R. E., Herscovitch, P., & Weinberger, D. R. (1995). Physiological activation of a cortical network during performance of the Wisconsin Card Sorting Test: a positron emission tomography study. *Neuropsychologia, 33*(8), 1027-1046. <https://doi.org/d37rrc>
- Bora, E., Harrison, B. J., Yücel, M., & Pantelis, C. (2013). Cognitive impairment in euthymic major depressive disorder: A meta-analysis. *Psychological Medicine, 43*(10), 2017-2026. <https://doi.org/f49qq2>
- Boschin, E. A., & Buckley, M. J. (2015). Differential contributions of dorsolateral and frontopolar cortices to working memory processes in the primate. *Frontiers in Systems Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00144>
- Boyer, B. E., Geurts, H. M., & Van der Oord, S. (2018). Planning Skills of Adolescents With ADHD. *Journal of Attention Disorders, 22*(1), 46-57. <https://doi.org/10.1177/1087054714538658>
- Brown, T. E., & Landgraf, J. M. (2010). Improvements in executive function correlate with enhanced performance and functioning and health-related quality of life: evidence from 2 large, double-blind, randomized, placebo-controlled trials in ADHD. *Postgraduate medicine, 122*(5), 42-51. <https://doi.org/10.3810/pgm.2010.09.2200>
- Brown, J. W. (2017). Models of Anterior Cingulate Cortex Function in Cognitive Control. En T. Egner (Ed.), *The Wiley Handbook of Cognitive Control* (pp. 259-273). Wiley <https://doi.org/10.1002/9781118920497.ch15>
- Brown, T. I., Carr, V. A., LaRocque, K. F., Favila, S. E., Gordon, A. M., Bowles, B., Bailenson, J. N., & Wagner, A. D. (2016). Prospective representation of navigational goals in the human hippocampus. *Science, 352*(6291), 1323-1326. <https://doi.org/f8rt2n>
- Burgess, P. W., Dumontheil, I., & Gilbert, S. J. (2007). The gateway hypothesis of rostral prefrontal cortex (area 10) function. *Trends in Cognitive Sciences, 11*(7), 290-298. <https://doi.org/b7j9b7>
- Burgess, P. W., Quayle, A., & Frith, C. D. (2001). Brain regions involved in prospective memory as determined by positron emission tomography. *Neuropsychologia, 39*(6), 545-555. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(00\)00149-4](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(00)00149-4)
- Burgess, P. W., Veitch, E., De Lacy Costello, A., & Shallice, T. (2000). The cognitive and neuroanatomical correlates of multitasking. *Neuropsychologia, 38*(6), 848-863. <https://doi.org/dz8pbn>

- Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. *Science*, *304*(5659), 1926-1929. <https://doi.org/10.1126/science.1099745>
- Campbell, Z., Zakzanis, K. K., Jovanovski, D., Joordens, S., Mraz, R., & Graham, S. J. (2009). Utilizing virtual reality to improve the ecological validity of clinical neuropsychology: an fMRI case study elucidating the neural basis of planning by comparing the Tower of London with a three-dimensional navigation task. *Applied Neuropsychology*, *16*(4), 295-306. <https://doi.org/10.1080/09084280903297891>
- Carlin, D., Bonerba, J., Phipps, M., Alexander, G., Shapiro, M., & Grafman, J. (2000). Planning impairments in frontal lobe dementia and frontal lobe lesion patients. *Neuropsychologia*, *38*(5), 655-665. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(99\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(99)00102-5)
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(8), 414-421. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Christoff, K., & Gabrieli, J. D. E. (2000). The frontopolar cortex and human cognition: Evidence for a rostrocaudal hierarchical organization within the human prefrontal cortex. *Psychobiology*, *28*(2), 168-186. <https://doi.org/10.3758/BF03331976>
- Cohen, J. D. (2017). The basics of cognitive control: Core constructs and current considerations. En T. Egner (Ed.), *The Wiley Handbook of Cognitive Control* (pp. 1-28). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118920497.ch1>
- Collins, A., & Koechlin, E. (2012). Reasoning, learning, and creativity: frontal lobe function and human decision-making. *PLoS biology*, *10*(3), e1001293. <https://doi.org/gfkbkb>
- Colvin, M. K., Dunbar, K., & Grafman, J. (2001). The effects of frontal lobe lesions on goal achievement in the Water Jug task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(8), 1129-1147. <https://doi.org/dtvd9j>
- Crowe, D. A., Averbeck, B. B., Chafee, M. V., Anderson, J. H., & Georgopoulos, A. P. (2000). Mental maze solving. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*(5), 813-827. <https://doi.org/dw6c6f>
- Dagher, A., Owen, A. M., Boecker, H., & Brooks, D. J. (1999). Mapping the network for planning: A correlational PET activation study with the Tower of London task. *Brain*, *122*(10), 1973-1987. <https://doi.org/10.1093/brain/122.10.1973>
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, *44*(11), 2037-2078. <https://doi.org/bfs49w>
- Davis, J. C., Marra, C. A., Najafzadeh, M., & Liu-Ambrose, T. (2010). The independent contribution of executive functions to health related quality of life in older women. *BMC geriatrics*, *10*; 16. <https://doi.org/10.1186/1471-2318-10-16>

- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168. <https://doi.org/b2m2>
- Diamond, A., & Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental cognitive neuroscience*, 18, 34-48. <https://doi.org/gftdón>
- Donoso, M., Collins, A. G. E., & Koechlin, E. (2014). Foundations of human reasoning in the prefrontal cortex. *Science*, 344(6191), 1481-1486. <https://doi.org/10.1126/science.1252254>
- Domic-Siede M., Irani M., Valdés J., Perrone-Bertolotti M., Ossandón T. (2021). Theta activity from frontopolar cortex, mid-cingulate cortex and anterior cingulate cortex shows different roles in cognitive planning performance. *NeuroImage*, 226;117557. <https://doi.org/gk32f4>
- Dreher, J. C., Koechlin, E., Tierney, M., & Grafman, J. (2008). Damage to the fronto-polar cortex is associated with impaired multitasking. *PLoS ONE*, 3(9), e3227. <https://doi.org/brjm7t>
- Dreher, M., & Oerter, R. (1987). Action planning competencies during adolescence and early adulthood. adulthood. En S. L. Friedman, E. K. Scholnick, & R. R. Cocking (Eds.), *Blueprints for thinking: The role of planning in cognitive development* (pp. 321-355). Cambridge University.
- Eakin, L., Minde, K., Hechtman, L., Ochs, E., Krane, E., Bouffard, R., Greenfield, B., & Looer, K. (2004). The marital and family functioning of adults with ADHD and their spouses. *Journal of attention disorders*, 8(1), 1-10. <https://doi.org/10.1177/108705470400800101>
- Evans, J. S. B. T., Over, D. E., & Manktelow, K. I. (1993). Reasoning, decision making and rationality. *Cognition*, 49(1-2), 165-187. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(93\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0010-0277(93)90039-X)
- Ferrer, E., Shaywitz, B. A., Holahan, J. M., Marchione, K., & Shaywitz, S. E. (2010). Uncoupling of reading and IQ over time: empirical evidence for a definition of dyslexia. *Psychological science*, 21(1), 93-101. <https://doi.org/10.1177/0956797609354084>
- Flitman, S., O'Grady, J., Cooper, V., & Grafman, J. (1997). PET imaging of maze processing. *Neuropsychologia*, 35(4), 409-420. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(96\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(96)00086-3)
- Gallhofer, B., Bauer, U., Lis, S., Krieger, S., & Gruppe, H. (1996). Cognitive dysfunction in schizophrenia: comparison of treatment with atypical antipsychotic agents and conventional neuroleptic drugs. *European Neuropsychopharmacology*, 6(S. 2), 13-20. <https://doi.org/bcmfcq>
- Gau, S. S. F., & Shang, C. Y. (2010). Executive functions as endophenotypes in ADHD: Evidence from the Cambridge Neuropsychological Test Battery (CANTAB). *The Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 51(7), 838-849. <https://doi.org/baq6p4r>
- Gilhooly, K.J. (2005). Working memory and planning. En R. Morris & G. Ward (Eds.), *The cognitive psychology of planning* (pp. 71-88). Psychology Press.

- Goel, V., Grafman, J., Tajik, J., Gana, S., & Danto, D. (1997). A study of the performance of patients with frontal lobe lesions in a financial planning task. *Brain*, *120*(10), 1805-1822. <https://doi.org/10.1093/brain/120.10.1805>
- Goldberg, T. E., Berman, K. F., Fleming, K., Ostrem, J., Van Horn, J. D., Esposito, G., Mattay, V. S., Gold, J. M., & Weinberger, D. R. (1998). Uncoupling cognitive workload and prefrontal cortical physiology: a PET rCBF study. *NeuroImage*, *7*(4), 296-303. <https://doi.org/fnf76z>
- Goldstein, L. H., Bernard, S., Fenwick, P. B. C., Burgess, P. W., & McNeil, J. (1993). Unilateral frontal lobectomy can produce strategy application disorder. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry*, *56*, 274-276. <https://doi.org/10.1136/jnnp.56.3.274>
- Grafman, J., Spector, L., & Rattermann, M. J. (2005). Planning and the brain. En R. Morris & G. Ward (Ed.), *The Cognitive Psychology of Planning* (pp. 181-198). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9780203493564>
- Hayes-Roth, B., & Hayes-Roth, F. (1979). A cognitive model of planning. *Cognitive Science*, *3*(4), 275-310. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0304_1
- Holt, D. V., Wolf, J., Funke, J., Weisbrod, M., & Kaiser, S. (2013). Planning impairments in schizophrenia: Specificity, task independence and functional relevance. *Schizophrenia Research*, *149*(1-3), 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2013.06.018>
- Javadi, A. H., Emo, B., Howard, L. R., Zisch, F. E., Yu, Y., Knight, R., Pinelo Silva, J., & Spiers, H. J. (2017). Hippocampal and prefrontal processing of network topology to simulate the future. *Nature communications*, *8*: 14652. <https://doi.org/10.1038/ncomms14652>
- Kaller, C. P., Reiser, M., Katzev, M., Umarova, R., Mader, I., Hennig, J., Weiller, C., & Köstering, L. (2015). Predicting planning performance from structural connectivity between left and right mid-dorsolateral prefrontal cortex: moderating effects of age during postadolescence and midadulthood. *Cerebral cortex*, *25*(4), 869-883. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht276>
- Karnath, H. O., Wallesch, C. W., & Zimmermann, P. (1991). Mental planning and anticipatory processes with acute and chronic frontal lobe lesions: A comparison of maze performance in routine and non-routine situations. *Neuropsychologia*, *29*(4), 271-290. <https://doi.org/ftpdd9>
- Kent, P. (2017). Fluid intelligence: A brief history. *Applied neuropsychology. Child*, *6*(3), 193-203. <https://doi.org/10.1080/21622965.2017.1317480>
- Kirsch, P., Lis, S., Esslinger, C., Gruppe, H., Danos, P., Broll, J., Wiltink, J., & Gallhofer, B. (2006). Brain activation during mental maze solving. *Neuropsychobiology*, *54*(1), 51-58. <https://doi.org/10.1159/000095742>
- Koechlin, E. (2011). Frontal pole function: What is specifically human? *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(6), 241. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.04.005>

- Koechlin, E. (2014). An evolutionary computational theory of prefrontal executive function in decision-making. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1655): 20130474. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0474>
- Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, 399, 148-151. <https://doi.org/10.1038/20178>
- Koechlin, E., & Hyafil, A. (2007). Anterior prefrontal function and the limits of human decision-making. *Science*, 318(5850), 594-598. <https://doi.org/10.1126/science.1142995>
- Korn, C. W., & Bach, D. R. (2018). Heuristic and optimal policy computations in the human brain during sequential decision-making. *Nature Communications*, 9, 325. <https://doi.org/gcw4px>
- Krieger, S., Lis, S., & Gallhofer, B. (2001). Cognitive subprocesses and schizophrenia. B. Maze tasks. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 104(s408), 28-41. <https://doi.org/dprpxn>
- Lazeron, R. H. C., Rombouts, S. A. R. B., Machielsen, W. C. M., Scheltens, P., Witter, M. P., Uylings, H. B. M., & Barkhof, F. (2000). Visualizing brain activation during planning: The Tower of London test adapted for functional MR imaging. *American Journal of Neuroradiology*, 21(8), 1407-1414. <https://tinyurl.com/3y75dkhs>
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L., & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59-80. <https://doi.org/10.1348/026151003321164627>
- Lezak, M. D. (1995). *Neuropsychological assessment* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Lima-Silva, T. B., Bahia, V. S., Carvalho, V. A., Guimarães, H., Caramelli, P., Damasceno, B., Bottino, C. M., Brucki, D., Nitrini, R. & Yassuda, M. S. (2013). Functional profile of patients with behavioral variant frontotemporal dementia (bvFTD) compared to patients with Alzheimer's disease and normal controls. *Dementia & Neuropsychologia*, 7(1), 96-103. <https://doi.org/10.1590/S1980-57642013DN70100015>
- Lis, S., Krieger, S., Wilhelm, J., & Gallhofer, B. (2005). Feedback about previous action improves executive functioning in schizophrenia: An analysis of maze solving behaviour. *Schizophrenia Research*, 78(2-3), 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2005.02.008>
- López-Villalobos, J. A., Serrano-Pintado, I., Andrés-De Llano, J. M., Sánchez-Mateos, J. D., Alberola-López, S., & Sánchez-Azón, M. I. (2010). Utilidad del test de Stroop en el trastorno por déficit de atención/hiperactividad. *Revista de neurología*, 50(6), 333-340. <https://doi.org/10.33588/rn.5006.2009418>
- Lunt, L., Bramham, J., Morris, R. G., Bullock, P. R., Selway, R. P., Xenitidis, K., & David, A. S. (2012). Prefrontal cortex dysfunction and "Jumping to Conclusions": Bias or deficit? *Journal of Neuropsychology*, 6(1), 65-78. <https://doi.org/10.1111/j.1748-6653.2011.02005.x>

- Luria, A. R. (1973). *The working brain: An introduction to neuropsychology*. Basic books.
- Mansouri, F. A., Egner, T., & Buckley, M. J. (2017). Monitoring Demands for Executive Control: Shared Functions between Human and Nonhuman Primates. *Trends in Neurosciences*, 40(1), 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.11.001>
- Mansouri, F. A., Rosa, M. G. P., & Atapour, N. (2015). Working memory in the service of executive control functions. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 166. <https://doi.org/gccxkj>
- Miles, S., Howlett, C.A., Berryman, C., Nedeljkovic, M., Moseley, G. L., & Phillipou, A. (2021). Considerations for using the Wisconsin Card Sorting Test to assess cognitive flexibility. *Behavior research methods*, 53(5), 2083–2091. <https://doi.org/jrwd>
- Milla, K., Bakhshipour, E., Bodt, B., & Getchell, N. (2019). Does movement matter? Prefrontal cortex activity during 2D vs. 3D performance of the tower of Hanoi puzzle. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13(156). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00156>
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24, 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & PRISMA Group (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS medicine*, 6(7): e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Nagahama, Y., Fukuyama, H., Yamauchi, H., Matsuzaki, S., Konishi, J., Shibasaki, H., & Kimura, J. (1996). Cerebral activation during performance of a card sorting test. *Brain*, 119(5), 1667–1675. <https://doi.org/10.1093/brain/119.5.1667>
- Neubert, F. X., Mars, R. B., Thomas, A. G., Sallet, J., & Rushworth, M. F. S. (2014). Comparison of Human Ventral Frontal Cortex Areas for Cognitive Control and Language with Areas in Monkey Frontal Cortex. *Neuron*, 81(3), 700–713. <https://doi.org/f5r9db>
- Newman, S. D., Carpenter, P. A., Varma, S., & Just, M. A. (2003). Frontal and parietal participation in problem solving in the Tower of London: fMRI and computational modeling of planning and high-level perception. *Neuropsychologia*, 41(12), 1668–1682. <https://doi.org/b3db53>
- Nitschke, K., Köstering, L., Finkel, L., Weiller, C., & Kaller, C. P. (2017). A Meta-analysis on the neural basis of planning: Activation likelihood estimation of functional brain imaging results in the Tower of London task. *Human Brain Mapping*, 38(1), 396–413. <https://doi.org/jrwk>
- Oosterman, J. M., Wijers, M., & Kessels, R. P. C. (2013). Planning or something else? Examining neuropsychological predictors of zoo map performance. *Applied Neuropsychology*, 20(2), 103–109. <https://doi.org/10.1080/09084282.2012.670150>

- Orr, J. M., & Weissman, D. H. (2009). Anterior cingulate cortex makes 2 contributions to minimizing distraction. *Cerebral Cortex*, *19*(3), 703-711. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn119>
- Osherson, D., Perani, D., Cappa, S., Schnur, T., Grassi, F., & Fazio, F. (1998). Distinct brain loci in deductive versus probabilistic reasoning. *Neuropsychologia*, *36*(4), 369-376. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00099-7)
- Owen, A. M., Doyon, J., Petrides, M., & Evans, A. C. (1996). Planning and Spatial Working Memory: a Positron Emission Tomography Study in Humans. *European Journal of Neuroscience*, *8*(2), 353-364. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.1996.tb01219.x>
- Owen, A. M., Sahakian, B. J., Semple, J., Polkey, C. E., & Robbins, T. W. (1995). Visuo-spatial short-term recognition memory and learning after temporal lobe excisions, frontal lobe excisions or amygdalo hippocampectomy in man. *Neuropsychologia*, *33*(1), 1-24. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)00098-A](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)00098-A)
- Pascual-Leone, A., Grafman, J., Clark, K., Stewart, M., Massaquoi, S., Lou, J. -S, & Hallett, M. (1993). Procedural learning in Parkinson's disease and cerebellar degeneration. *Annals of Neurology*, *34*(4), 594-602. <https://doi.org/10.1002/ana.410340414>
- Peters, H. N., & Jones, F. D. (1951). Evaluation of group psychotherapy by means of performance tests. *Journal of Consulting Psychology*, *15*(5), 363-367. <https://doi.org/fdphbc>
- Porteus, S.D. (1959). *The Maze Test and Clinical Psychology*. Pacific.
- Posner, M. I. & DiGirolamo G. J. (1998). Executive attention: conflict, target detection, and cognitive control. En R. Parasuraman (Ed.), *The Attentive Brain* (pp. 401-23). MIT.
- Prabhakaran, V., Smith, J. A. L., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. E. (1997). Neural substrates of fluid reasoning: An fMRI study of neocortical activation during performance of the Raven's Progressive Matrices Test. *Cognitive Psychology*, *33*(1), 43-63. <https://doi.org/10.1006/cogp.1997.0659>
- Quilodran, R., Rothé, M., & Procyk, E. (2008). Behavioral shifts and action valuation in the anterior cingulate cortex. *Neuron*, *57*(2), 314-325. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.11.031>
- Riggs, N. R., Spruijt-Metz, D., Sakuma, K. L., Chou, C. P., & Pentz, M. A. (2010). Executive cognitive function and food intake in children. *Journal of nutrition education and behavior*, *42*(6), 398-403. <https://doi.org/10.1016/j.jneb.2009.11.003>
- Rive, M. M., Koeter, M. W. J., Veltman, D. J., Schene, A. H., & Ruhé, H. G. (2016). Visuospatial planning in unmedicated major depressive disorder and bipolar disorder: Distinct and common neural correlates. *Psychological Medicine*, *46*(11), 2313-2328. <https://doi.org/f8zz6k>

- Schwartz, M. F., Reed, E. S., Montgomery, M., Palmer, C., & Mayer, N. H. (1991). The quantitative description of action disorganisation after brain damage: A case study. *Cognitive Neuropsychology*, 8(5), 381-414. <https://doi.org/10.1080/02643299108253379>
- Shallice, T. (1982). Specific Impairments of Planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 298(1089), 199-209. <https://doi.org/cgxv89>
- Simon, H. A. (1975). The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive Psychology*, 7(2), 268-288. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90012-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90012-2)
- Sira, C. S., & Mateer, C. A. (2014). Executive Function. En M. J. Aminoff y R. B. Daroff (Eds.), *Encyclopedia of the Neurological Sciences* (pp. 239-242). <https://doi.org/jrw5>
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283(5408), 1657-1661. <https://doi.org/10.1126/science.283.5408.1657>
- Spector, L., & Grafman, J. (1994). Planning, neuropsychology, and artificial intelligence: Cross fertilization. En F. Boller & J. Grafman (Eds.), *Handbook of neuropsychology* (Vol. 9, pp. 377-392). Elsevier Science.
- Spellman, T., Svei, M., Kaminsky, J., Manzano-Nieves, G., & Liston, C. (2021). Prefrontal deep projection neurons enable cognitive flexibility via persistent feedback monitoring. *Cell*, 184(10), 2750-2766. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.03.047>
- Sternberg, R. J., & Ben-Zeev, T. (2001). *Complex cognition: The psychology of human thought*. Oxford University.
- Suchman, L. (1987). *Plans and Situated Actions*. Cambridge University. <https://doi.org/cbjdxm>
- Theeuwes J. (1991). Exogenous and endogenous control of attention: the effect of visual onsets and offsets. *Perception & psychophysics*, 49(1), 83-90. <https://doi.org/10.3758/bf03211619>
- Tsujimoto, S., & Genovesio, A. (2017). Firing variability of frontal pole neurons during a cued strategy task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 29(1), 25-36. <https://doi.org/jrw7>
- Tsujimoto, S., Genovesio, A., & Wise, S. P. (2010). Evaluating self-generated decisions in frontal pole cortex of monkeys. *Nature Neuroscience*, 13, 120-126. <https://doi.org/10.1038/nn.2453>
- Tremblay, M., Lacroix, D., Chaput, Y., Fraïle, V., Lamer, R., & Albert, J.-M. (1994). Brain activation with a maze test: An EEG coherence analysis study in healthy subjects. *NeuroReport*, 5(18), 2449-2453. <https://doi.org/bjzr9n>
- Unterrainer, J. M., Rahm, B., Kaller, C. P., Leonhart, R., Quiske, K., Hoppe-Seyler, K., Meier, C., Müller, C., & Halsband, U. (2004). Planning abilities and the Tower of London: is this task measuring a discrete cognitive function? *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 26(6), 846-856. <https://doi.org/10.1080/13803390490509574>

- Urrútia, G., & Bonfill, X. (2013). La declaración PRISMA: un paso adelante en la mejora de las publicaciones de la Revista Española de Salud Pública. *Revista española de salud pública*, 87(2), 99-102. <https://doi.org/10.4321/S1135-57272013000200001>
- van den Heuvel, O. A., Groenewegen, H. J., Barkhof, F., Lazeron, R. H., van Dyck, R., & Veltman, D. J. (2003). Frontostriatal system in planning complexity: a parametric functional magnetic resonance version of Tower of London task. *NeuroImage*, 18(2), 367-374. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(02)00010-1)
- Wan, X., Cheng, K., & Tanaka, K. (2016). The neural system of postdecision evaluation in rostral frontal cortex during problem-solving tasks. *ENeuro*, 3(4), <https://doi.org/ggmcmn>
- Ward, G. & Morris, R. G. (2005). Introduction to the psychology of planning. En R. Morris & G. Ward (Eds.), *The cognitive psychology of planning* (pp. 1-34). Psychology Press.
- Will Crescioni, A., Ehrlinger, J., Alquist, J. L., Conlon, K. E., Baumeister, R. F., Schatschneider, C., & Dutton, G. R. (2011). High trait self-control predicts positive health behaviors and success in weight loss. *Journal of health psychology*, 16(5), 750-759. <https://doi.org/crcstc>
- Wilson, B. A., Alderman, N., Burgess, P. W., Emslie, H. & Evans, J. J. (1996). *Behavioural assessment of the dysexecutive syndrome*. Thames Valley Test Company.
- Wong, A. L., Haith, A. M., & Krakauer, J. W. (2015). Motor planning. *Neuroscientist*, 21(4), 385-398. <https://doi.org/10.1177/1073858414541484>

Para citar en APA

Domic-Siede, M., Irani, M., Ramos-Henderson, M., Calderón, C., Ossandón, T., & Perrone-Bertolotti, M. (2022). La planificación cognitiva en el contexto de la evaluación neuropsicológica e investigación en neurociencia cognitiva: una revisión sistemática. *Terapia Psicológica (En línea)*, 40(3), 367-395. <https://doi.org/10.4067/S0718-48082022000300367>