



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE MEDICINA

Máster en Rehabilitación Visual

MEMORIA TRABAJO FIN DE MÁSTER TITULADO

Revisión bibliográfica: neurociencia y cognición espacial
en personas con ceguera

Presentado por:
Isabel Cantalejo Bocanegra
Tutelado por:
Joaquín Herrera Medina

En Valladolid julio de 2022

ÍNDICE

1. Listado de abreviaturas	3
2. Introducción	3
3. Hipótesis y Objetivos	3
4. Materiales y métodos	4
5. Discusión	5
5.1. Impacto de la privación visual en la competencia espacial	5
5.2. Privación sensorial, plasticidad cerebral y cognición espacial en personas con ceguera	9
5.3. Navegación y su relación neuronal	11
5.4. Percepción de los obstáculos en personas con ceguera	16
5.5. Dispositivos de sustitución sensorial	19
6. Conclusiones	22
7. Bibliografía	23

1. Listado de abreviaturas

- CB: Ceguera congénita
- EB: Ceguera temprana
- HF: Hemisferio
- LB: Ceguera tardía
- PPA: Parahipocampal
- RSC: Retroesplenial
- SC: Videntes de un grupo control
- SSD: Dispositivo de sustitución sensorial

2. Introducción

Cuando aprendemos a desplazarnos y a navegar nos apoyamos de manera principal en la información que nuestro cuerpo recibe del sistema visual para procesos como la adaptación y la antelación que necesita nuestra estructura corporal. Las personas que nacen con ceguera no disponen de esta información por lo que su cuerpo se ve obligado a apoyarse en información proveniente de otros sistemas para progresar en las competencias espaciales. En esta revisión bibliográfica intentaremos conocer cuáles son los métodos que siguen las personas con ceguera para la creación de mapas mentales, orientación, memorización de una ruta o la detección de obstáculos. Además veremos las diferencias neuronales que se producen en este ámbito entre personas videntes y personas con ceguera.

3. Hipótesis y Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo revisar la bibliografía en cuanto a la neurociencia y la cognición espacial de personas con ceguera. Se pretende conocer:

- Los ajustes que sufren las personas con ceguera en cuanto a privación sensorial, plasticidad cerebral y cognición espacial
- La navegación y su relación neuronal
- La percepción de obstáculos en las personas con ceguera.

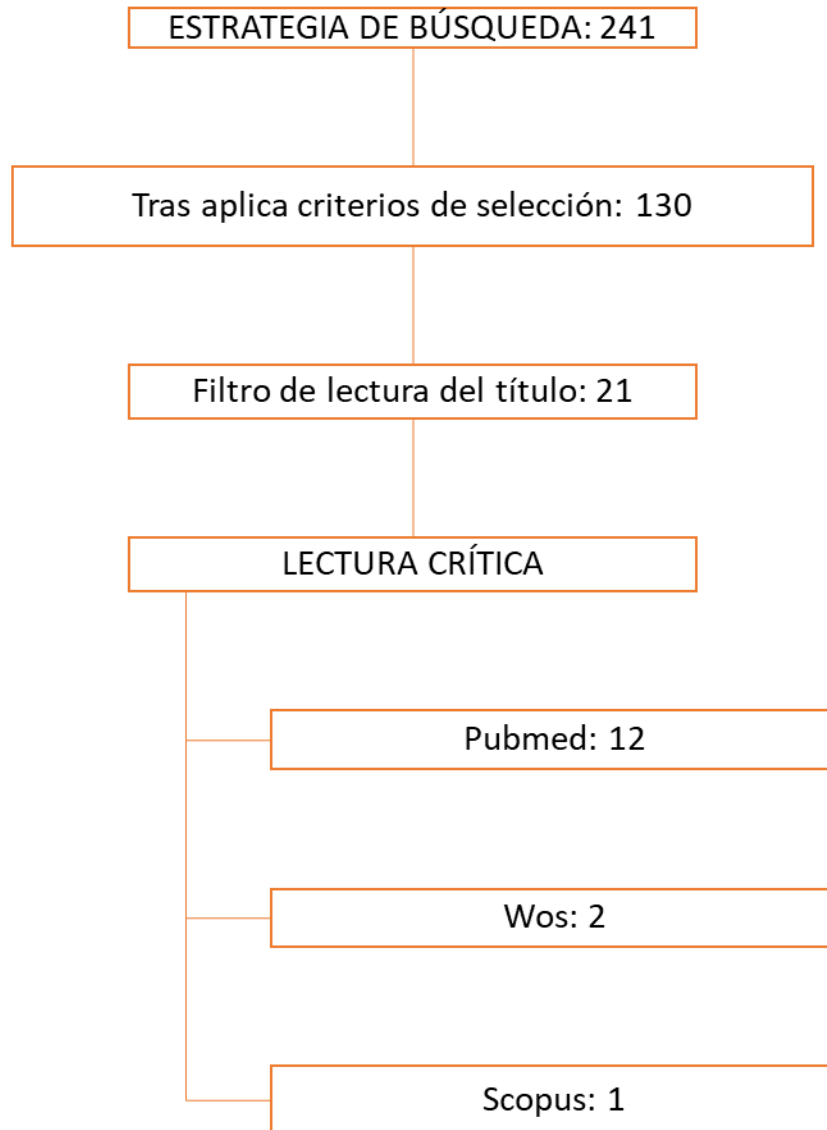
Estos conocimientos nos servirán de soporte para ayudar a desarrollar competencias espaciales a las personas con ceguera congénita o adquirida.

4. Materiales y métodos

Para conseguir la bibliografía presente en esta revisión bibliográfica se ha consultado en las siguientes bases de datos: Pubmed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri?zone=header&origin=sourceinfo>) y Web of Sience (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>).

Se realizó una búsqueda de los artículos en español e inglés, aunque en español no se obtuvieron resultados. Las palabras claves fueron *spatial cognition*, *blindness* y *neuroscience*. Pubmed fue la base de datos en la que encontramos la mayoría de los resultados y por lo tanto, el pilar fundamental de esta revisión bibliográfica. Para que los resultados fueran actuales filtramos los documentos y sólo escogimos los de los últimos 10 años. Realizamos un primer cribado mediante la lectura de los títulos, desechando así los que tenían otra temática o se centraban en otras disciplinas; posteriormente, se hizo una lectura crítica de los artículos seleccionados tras la que obtuvimos la selección final.

El cribado y selección de documentos se realizó según el siguiente esquema:



5. Discusión

5.1. Impacto de la privación visual en la competencia espacial

¿Qué sucede cuando alguien es privado de la visión desde su nacimiento? Es más difícil recopilar información sensorial en ausencia de visión, y esa información es más difícil de interpretar, pero aún se pueden lograr representaciones y competencia espaciales. Si la información sensorial se sustituye

por una modalidad diferente, el modelo convergente sugiere que la competencia espacial se puede adquirir más rápido.⁸

Curiosamente, ya en 1779, Diderot apuntó en su carta sobre los ciegos, la capacidad de ciertas personas no videntes para orientarse en el espacio sin la ayuda de un bastón, y que tenían un cierto sentido innato para la percepción de los obstáculos. En 1944, estudios en la Universidad de Cornell demostraron que **las personas ciegas eran capaces de detectar obstáculos sólo cuando se les proporcionaba información auditiva**. La ausencia de información táctil no perturbó su sentido de detección de obstáculos, pero la ausencia de información auditiva fue perjudicial para su desempeño.⁴²

Esta hipótesis fue confirmada por Ammons et al. (1953), quienes demostraron que en las personas ciegas con la entrada auditiva bloqueada existía una incapacidad para percibir los obstáculos. Llegaron a la conclusión de que **la audición era un factor crucial para la navegación en la ceguera**. Este fenómeno se llama ecolocalización. Las personas ciegas todavía usan esta técnica golpeando su bastón en el suelo, aplaudiendo o haciendo chasquidos con la lengua para percibir ecos.² Kellogg (1962) fue el primero en cuantificar esta capacidad. Midió la sensibilidad de voluntarios ciegos y videntes a la variación de tamaño, distancia y textura de los objetos percibidos solo con ecos auditivos. Demostró que las personas ciegas tenían resultados significativamente superiores en comparación con los videntes en términos de su capacidad para detectar objetos, su textura y distancia (Kellogg, 1962).²³ Estos resultados se reprodujeron en el estudio de Strelow y Brabyn (1982), pero se demostró que, aunque el CB superaba a sus homólogos videntes con los ojos vendados, su capacidad estaba muy por debajo de la de los videntes que usaban la visión.⁴¹

Las teorías sobre la adquisición de la competencia espacial en la ceguera se pueden clasificar en tres categorías principales, acumulativas, persistentes o convergentes (Figura 1).

Es evidente que sin señales visuales, la adquisición del conocimiento espacial sobre un entorno y la eventual competencia espacial pueden verse afectadas, pero ¿en qué medida? El modelo acumulativo y los modelos persistentes sostienen que los errores cometidos al adquirir conocimiento espacial, y por lo tanto también competencia espacial en un entorno, conducen a más errores que son

persistentes o acumulativamente más alejados del desempeño de sus contrapartes videntes que han recibido la misma experiencia espacial en el mismo entorno.

El modelo convergente considera que aunque a las personas CB les puede tomar más tiempo obtener información espacial y competencia espacial, eventualmente esta convergerá con la de los videntes.

Durante mucho tiempo la literatura sobre el tema de la ceguera congénita ha abrigado la idea de que las personas ciegas de nacimiento eran deficientes o ineficaces en su capacidad para comprender el espacio. La teoría de la deficiencia propone (ver tanto el modelo acumulativo como el deficiente en la Figura 1) que las personas con ceguera congénita son incapaces o ineficientes en su capacidad para desarrollar representaciones mentales del espacio y del entorno. Según esta teoría, esta incapacidad para formar mapas cognitivos eficientes se debe al uso de señales táctiles, propioceptivas o auditivas que no son útiles para crear estos mapas. La ceguera conduce a una disminución de la autonomía por un déficit de orientación en el espacio y la movilidad. Es evidente que es más difícil navegar sin la información adecuada proporcionada por la visión. Esta incapacidad para navegar solo es, por supuesto, una desventaja importante para las personas ciegas, que tienen dificultad para comprender ciertos conceptos relacionados con el espacio y para hacer rotaciones mentales. Otra evidencia que parece apoyar este punto de vista proviene de estudios volumétricos del hipocampo en CB.⁸

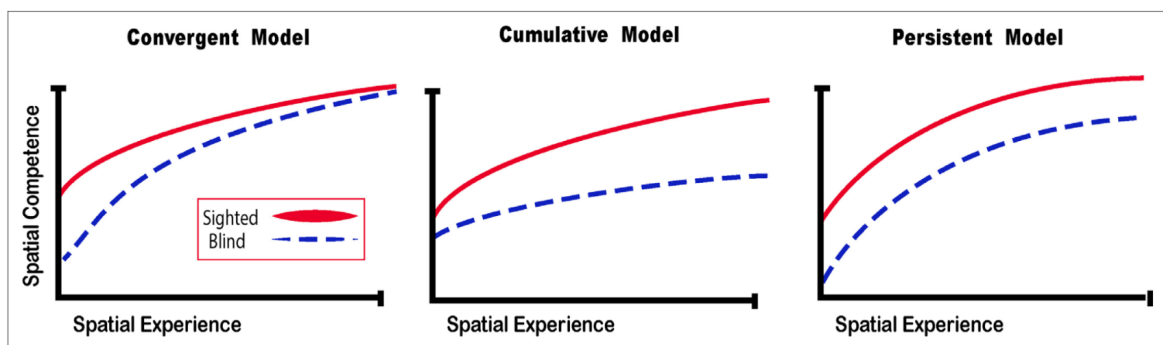


Figura 1. Modelos de Adquisición de Competencias Espaciales para Ciegos. El modelo convergente sostiene que la competencia espacial de CB en entornos novedosos eventualmente alcanza el nivel de los videntes con suficiente experiencia. El modelo acumulativo considera que los errores que cometen las personas ciegas al explorar el espacio son acumulativos, por lo que aun adquiriendo más experiencia espacial, su competencia espacial nunca podrá igualar a la de los videntes. El modelo persistente proyecta que los errores cometidos por los ciegos durante las exploraciones espaciales son persistentes y que su competencia espacial permanece por debajo de la de los videntes.⁸

El extremo posterior del hipocampo derecho está volumétricamente reducido en CB, precisamente en la misma zona que suele asociarse a la navegación en humanos según Duarte et al, y así se puede observar en la figura 2.⁹

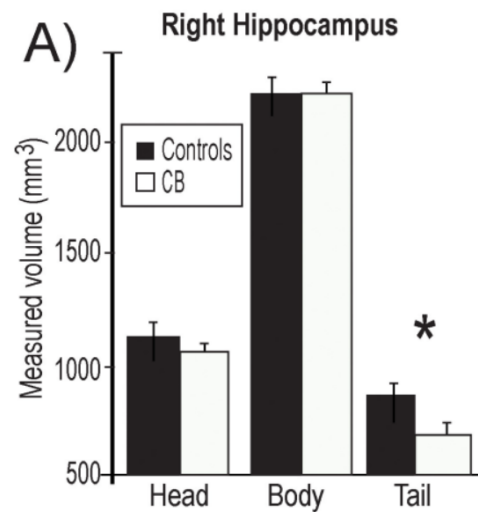


Figura 2. Resumen de los hallazgos sobre los correlatos neurales de la navegación en ciegos. Reducciones volumétricas en la cabeza del hipocampo de CB.⁸

El hipocampo está compuesto por muchas capas celulares distintas, y se desconoce cuáles impulsan las reducciones volumétricas en CB. A pesar de estos hallazgos conductuales y las diferencias volumétricas, las personas ciegas, incluso aquellas sin ninguna experiencia visual, pueden representar espacios familiares y tienen una buena comprensión general de los espacios grandes.

En oposición a las teorías de la deficiencia sobre la adquisición de competencias espaciales, también hay muchos estudios diferentes que parecen apoyar el modelo convergente de adquisición espacial. Por ejemplo, los CB procesan señales espectrales y sílabas auditivas de manera más eficiente que los videntes. Además, son mejores para localizar fuentes de sonido que los videntes y tienen una mejor discriminación de tono de sonido, sintonización espacial auditiva mejorada e incluso habilidades auditivas superiores a las normales en el espacio lejano. Posiblemente se deba al reclutamiento de mecanismos de plasticidad cerebral intermodal para procesar información auditiva. Además, es posible formar un diseño mental del espacio en una tarea virtual utilizando información ecoacústica. No se trata pues de un déficit a nivel de la representación mental del espacio. En un entorno que no permite las ventajas de la navegación visual (es decir, en un laberinto donde las paredes estaban a la distancia de un brazo, de

modo que los sujetos pudieran tocarlas), el desempeño de los sujetos ciegos fue igual o incluso superó al de los videntes.⁸ Lejos de ser deficientes en tareas espaciales, ni en la comprensión del espacio en general, **las personas ciegas pueden tener una comprensión diferente del espacio generada por otros sentidos y por lo tanto desarrollar otras estrategias para representar y configurar el espacio (Thinus-Blanc y Gaunet, 1997).**⁴⁴

5.2. Privación sensorial, plasticidad cerebral y cognición espacial en personas con ceguera

Los sujetos con ceguera congénita son capaces de formar mapas topográficos espaciales debido a una discriminación de tono auditivo superior y pueden mapear el entorno auditivo con mayor precisión. Se ha demostrado que las personas ciegas pueden determinar tanto la naturaleza de un estímulo sonoro (tono puro o sonido complejo) como la presencia o ausencia de su movimiento. Esta información resulta insuficiente en tareas de localización dinámica, produciendo alteraciones directas en la cognición del espacio auditivo en personas ciegas.¹³

En la macroescala, los investigadores han propuesto dos marcos para describir la adquisición de conocimiento espacial. El marco discreto (también conocido como "dominante") postula que **el conocimiento espacial se adquiere a través de tres etapas** cualitativamente distintas. Durante la primera etapa de "**punto de referencia**", las personas comienzan a aprender características sobresalientes del entorno que pueden usarse para establecer un marco de referencia. Durante la segunda etapa de "**ruta**", los hitos se conectan a través de rutas que progresan desde formatos topológicos a euclidianos. Estas rutas permiten la construcción de minimapas que son localmente, pero no globalmente, coherentes. En la última etapa de "**encuesta**", las personas integran estos minimapas utilizando un marco de referencia objetivo. Esta representación global a veces se conoce como un "mapa cognitivo".³⁹

El marco 'continuo' alternativo difiere del marco discreto en al menos dos formas. En primer lugar, se critica la separación estricta de las etapas de hitos, rutas y encuestas porque las personas son capaces de adquirir diferentes tipos de información espacial en paralelo, simultáneamente. De manera similar, Ishikawa y

Montello encontraron grandes diferencias individuales con respecto al momento de adquisición del conocimiento de la encuesta. En segundo lugar, el conocimiento espacial euclidiano se forma antes en el aprendizaje espacial de lo que sugiere el marco discreto.²⁰ Estos hallazgos respaldan las teorías de la integración bayesiana y la combinación adaptativa de diferentes fuentes de información espacial (p. ej., aprendizaje de lugar, aprendizaje de respuesta, aprendizaje de señales y navegación estimada). Estas teorías postulan que la confiabilidad de las señales espaciales en el entorno ayuda a determinar la medida en que se adquiere la información correspondiente.³⁹

Tina Iachini, Gennaro Ruggiero y Francesco Ruotolo hicieron dos experimentos de navegación y locomoción con personas ciegas congénitas, ciegas tardías y videntes. Tras dichos experimentos dedujeron que **las imágenes espaciales mentales de las personas ciegas congénitas y adventicias mantienen información métrica sobre las distancias entre las posiciones del mundo real exploradas a través de la locomoción**, al igual que las de los participantes videntes. Esta estructura espacial preservada es atestiguada por las funciones lineales significativas que relacionan el tiempo y la distancia en todos los grupos evaluados, aunque el componente lineal fue menor en las personas ciegas. Esto sugiere que la escala del espacio afecta la forma en que las personas ciegas procesan las imágenes espaciales mentales: los datos mostraron que más allá de un cierto umbral métrico (alrededor de 5 m) hay una disminución en la similitud de la información métrica incorporada en estas imágenes con las distancias externas.¹⁹

Otro experimento realizado por Merabet et al, en el que desarrollaron un simulador de un entorno virtual basado en audio para permitir la navegación y exploración simulada de un edificio que existía físicamente, demostró que los CB pudieron interactuar con un entorno virtual basado en audio para generar un mapa cognitivo espacial preciso que corresponde al diseño espacial de un edificio físico de destino. La precisión de este mapa mental fue confirmada por el hecho de que los participantes pudieron transferir la información espacial adquirida en un desempeño de navegación exitoso llevado a cabo en el edificio físico modelado en un entorno virtual correspondiente.²⁸

En otro experimento similar realizado por Sánchez y Rodríguez utilizan el videojuego MOVA3D con DCC y tareas cognitivas como una herramienta basada en audio que puede ser utilizada para la estimulación de habilidades de orientación

temporo-espacial en niños invidentes. Los niños que participaron en este estudio **podieron transferir lo aprendido del videojuego al realizar las mismas tareas en el mundo real**, logrando así una transferencia exitosa de conocimientos y habilidades. Este traslado no es fácil porque los niños se sienten incómodos al principio; con el tiempo, sin embargo, el juego se convierte en una herramienta importante para el entrenamiento.³⁸

5.3.Navegación y su relación neuronal

Todos los días, las personas ciegas navegan en ambientes interiores y exteriores que favorecen el sentido de la vista. Para llegar a un destino, deben planificar y ejecutar una serie de decisiones a través de estos entornos.³⁹

La navegación espacial es un proceso complejo que depende de la confluencia de diversa información circundante, incluidas señales visuales, auditivas y hápticas. El estudio de Ningning Pan et al aclaró la diferencia morfométrica entre las personas ciegas y los controles videntes en función de los métodos de análisis de volumen y forma. **Se observaron aumentos significativos de las colas del hipocampo para el hipocampo izquierdo y la cabeza del hipocampo para el hipocampo derecho en los individuos ciegos en comparación con el grupo de control.**³⁴

En humanos videntes, se han identificado cuatro estrategias principales de orientación usando el mismo paradigma (Kallai et al., 2005). Se caracterizan por un conjunto de comportamientos al buscar una plataforma en un espacio abierto:²²

1. Thigmotaxis (siguiendo la pared y acercándose a la plataforma)
2. Dar vueltas en círculos (deambular en círculos)
3. Exploraciones visuales (girando en el lugar para cambiar su punto de vista)
4. Enfilada (realizando un escaneo rápido y desplazándose directamente a la plataforma)

En ceguera, las investigaciones sobre orientación y movilidad han identificado una serie de estrategias utilizadas en la navegación y la exploración de entornos no familiares que recuerdan lo reportado en personas videntes. Hill et al.

(1993) pidió a los participantes ciegos y con baja visión que exploraran un espacio abierto, encontraran cuatro objetos y recordaran su ubicación. El movimiento de los participantes fue registrado, cuantificado y categorizado en diferentes estrategias. Algunas de estas estrategias se aplican específicamente a personas con baja visión y otras a personas ciegas. Las estrategias se asignaron a cinco categorías para participantes ciegos:¹⁸

- 1. Perimetría (búsqueda de objetos moviéndose a lo largo de las paredes o el perímetro de la habitación)**
- 2. Perimetría hacia el centro (movimiento en círculos concéntricos desde la periferia hacia el centro de la habitación)**
- 3. Cuadrícula (exploración del espacio de forma sistemática similar a una cuadrícula)**
- 4. Cíclico (moviéndose directamente de un objeto al siguiente)**
- 5. Perimetría al objeto (movimiento desde la periferia hacia el objeto)**

La única diferencia notable es que las personas ciegas no pueden realizar escaneos visuales para encontrar sus objetivos, deben confiar en la codificación de estímulos utilizando coordenadas egocéntricas en lugar de alocéntricas (Röder et al, 2008).³⁷ Las dos últimas estrategias, cíclica y perimétrica al objeto, que requieren una representación alocéntrica, sólo pueden ser utilizadas por personas invidentes una vez que se han familiarizado con el entorno utilizando las otras estrategias.⁸

En cuanto a la utilización de coordenadas alocéntricas y egocéntricas por parte de las personas con ceguera no hay acuerdo, por eso hemos recogido en la siguiente tabla la opinión de varios profesionales:

Egocéntricas	Alocéntricas
---------------------	---------------------

<p>Duarte et al. (2014)</p>	<p>Una posible explicación, que está de acuerdo con nuestras observaciones anteriores, es que una velocidad de caminata más lenta podría facilitar la percepción espacial en un marco de referencia aloctrico, donde la información espacio-temporal debe integrarse para comprender el camino global producido. Por el contrario, una velocidad de marcha más rápida, observada en individuos videntes y ciegos tardíos, podría reflejar un marco de referencia más egocentrico en el que la información global no está integrada en el espacio y el tiempo.</p> <p>Finalmente, podemos especular que la compresión de la forma alrededor de la región del cuerpo observada en los ciegos congénitos puede reflejar de manera similar un marco de referencia más egocentrico que atrae la navegación hacia la posición inicial del cuerpo, lo que hace que se comprime alrededor del mismo. Serán necesarios más estudios para esclarecer este aspecto.</p>		
<p>Thinus-Blanc y Gaunet (1997)</p>	<p>La navegación espacial se puede diferenciar a la de ruta en que se refiere a coordenadas egocentricas, y a la navegación inferencial en que se basa en coordenadas aloctricas</p>		
<p>Röder et al. (2008)</p>	<p>La única diferencia notable es que las personas ciegas no pueden realizar escaneos visuales para encontrar sus objetivos, deben confiar en la codificación de estímulos utilizando coordenadas egocentricas en lugar de aloctricas</p>	<p>Montello (2005)</p>	<p>Durante la orientación, las personas también pueden adoptar marcos de referencia distintos a los experimentados directamente (es decir, aloctrico).</p>
<p>Pasqualotto et al. (2013).</p>	<p>Las estrategias de exploración utilizadas por las personas con ceguera fomentan una representación egocentrica del espacio y la experiencia visual facilita las representaciones aloctricas; también es posible lograr una representación aloctrica del espacio sin visión.</p>	<p>Packard et al., 1996</p>	<p>Los estudios de lesiones confirman aún más el papel del hipocampo para codificar ubicaciones en un marco de referencia aloctrico</p>
<p>Montello (2005)</p>	<p>La locomoción implica respuestas inmediatas a las características ambientales, estas respuestas son invariablemente egocentricas porque la información ambiental se adquiere con referencia al cuerpo del observador.</p>		

<p>Valko et al., (2012)</p>	<p>Algunos estudios apoyan este punto de vista, mostrando que las personas ciegas confían más en la navegación de rutas que se basa en estrategias cinemáticas con referencias egocéntricas.</p>		
------------------------------------	--	--	--

Los estudios en los que los participantes ciegos usaron modalidades auditivas o táctiles han resaltado la capacidad de sus cerebros tanto intramodal (p. ej., cambios en áreas funcionales resultantes de la privación visual correspondiente a la misma modalidad) como transmodal (p. ej., cambios en áreas funcionales resultantes de la privación visual correspondiente a una modalidad diferente), aunque estos dos fenómenos no son mutuamente excluyentes. De hecho, la corteza occipital (incluidas las áreas asociativas) se puede reclutar durante tareas tanto auditivas como táctiles. Además, los estudios de imágenes estructurales han encontrado un volumen reducido en la corteza occipital de los participantes ciegos en relación con los participantes videntes. Un estudio de morfometría basado en la deformación también encontró que, mientras que la corteza occipital temprana se reduce en las personas ciegas en comparación con las personas videntes, la corteza occipital asociativa es relativamente grande (Yang et al., 2014).⁴⁸ Aunque el papel de la corteza occipital es diferente para ciegos y videntes.³⁹

Otras áreas pueden estar relacionadas con la navegación de personas ciegas, pero se necesita más investigación antes de que puedan vincularse a construcciones de conocimiento espacial específicas (precúneo y giro fusiforme; unión parietal temporal; y giro temporal superior).

El reclutamiento de estas áreas por diferentes modalidades (p. ej., auditivo y táctil) puede sugerir la **reorganización funcional de las áreas corticales para apoyar la navegación**. Esto es confirmado con los resultados de Wolbers y colegas, en los que el análisis de conectividad funcional indicó la falta de conexiones significativas entre el parahipocampo occipital y posterior para la tarea de discriminación háptica.⁴⁷ En conjunto, **estos resultados pueden respaldar las teorías de la representación espacial amodal (en lugar de la grabación visual) en los cerebros de los participantes ciegos.**³⁹

El estudio de Gori et al informa sobre los resultados de las habilidades de navegación de personas ciegas tempranas, ciegas tardías y videntes en la reproducción de formas mediante audio y en el alcance de sonidos estáticos. Los resultados sugieren que los ciegos tempranos muestran algunas deficiencias en la navegación en comparación con los ciegos tardíos y videntes cuando tienen que reproducir una forma previamente escuchada, pero no cuando tienen que alcanzar un sonido estático. Además, el error de localización para cerrar la forma (es decir, al llegar al punto de partida inicial) fue mayor para todas las formas en los ciegos tempranos que en los videntes y ciegos tardíos. Este error representa la dificultad de localizar el punto de partida inicial.⁹

En este estudio también observamos un patrón de navegación diferente en los ciegos tempranos:

1. Comprimen las formas que se reproducirán durante la navegación.

2. Tienden a reproducir caminos más circulares.

3. Tienden a moverse más rápido.

Pensamos que todos estos aspectos pueden estar asociados a un marco de referencia egocéntrico adoptado por los invidentes durante la navegación. La navegación espacial se puede diferenciar a la de ruta en que se refiere a coordenadas egocéntricas, y a la navegación inferencial en que se basa en coordenadas alocéntricas (Thinus-Blanc y Gaunet, 1997).⁴⁴

El uso de una estrategia de navegación de ruta también está respaldado por la diferente velocidad de marcha que observamos en las personas ciegas tempranas en comparación con las personas ciegas tardías y videntes. Las personas ciegas tempranas caminan más rápido que los otros dos grupos. En las personas videntes, la velocidad de caminata más lenta podría estar asociada con una tarea de alta complejidad, requisitos de energía y demandas de equilibrio en una tarea de navegación no visual inusual. Siguiendo la misma línea, la mayor velocidad en los ciegos tempranos puede atribuirse a la familiaridad con tareas no visuales.

Por otro lado, el hecho de que los individuos con ceguera tardía también muestren una velocidad de marcha más lenta en comparación con los participantes con ceguera temprana, sugiere que el patrón de marcha podría estar asociado con la experiencia visual temprana más que con la confianza en la tarea.⁹

5.4. Percepción de los obstáculos en personas con ceguera

La detección y evitación de obstáculos en el contexto de la visión normal es un proceso automático que aún se conserva en ausencia de la corteza visual o la conciencia visual. Se cree que este proceso inconsciente requiere una entrada visual subcortical. Entonces, si la corteza visual no es necesaria para evitar obstáculos, ¿qué áreas corticales son cruciales para la detección y evitación de obstáculos en CB? La evitación de obstáculos se basa en un sistema de evitación complejo y sofisticado que es sensible y conservador para ajustar el movimiento de acuerdo con los obstáculos potenciales en el camino (Chapman et., al 2008).⁵

Esta compleja red de regiones incluye el hipocampo y la corriente dorsal visual. En un experimento realizado por Chebat et al en 2019, **el aprendizaje de detección de obstáculos se correlacionó con regiones del lóbulo temporal medial** para personas control con los ojos vendados o SC (hipocampo y corteza entorrinal). En los participantes con ceguera congénita existió una reorganización anatómica a gran escala de casi todas las regiones cerebrales y más concretamente del **hipocampo, que presenta alteraciones volumétricas**. Informaron que, además del hipocampo, CB recluta una red sensoriomotora cuando aprende la tarea de detección. Es bien sabido que el volumen cerebral puede estar asociado con la conducta de aprendizaje (Sormani et al., 2019).⁴⁰

Un estudio reciente también muestra que las diferencias volumétricas del hipocampo y entorrinal median el aprendizaje espacial, lo que da más apoyo a la idea de que el hipocampo, la corteza entorrinal y el tálamo son estructuras importantes para la navegación. Asimismo, en la tarea de atención guiada por la memoria, el volumen del hipocampo se relacionó con la capacidad de aprender implícitamente información contextual, y el estilo de mapeo cognitivo está mediado por la proporción de volumen hipocampal antero-posterior (Brunec et al., 2019).⁴ Además, los resultados de Chebat et al están en línea con la idea de que la corteza sensoriomotora es importante para la plasticidad del aprendizaje sensorial asociativo.⁷

Un experimento reciente de resonancia magnética funcional también respalda este punto de vista al mostrar que esta misma red se recluta durante el comportamiento espacial guiado visualmente (Gorbet et al., 2019).¹⁵ Además, varios estudios recientes han relacionado las diferencias volumétricas del hipocampo en poblaciones sanas y clínicas con la capacidad de aprender. Un estudio reciente también demostró rastros de aprendizaje en circuitos tálamocorticales y el impacto de las redes sensoriomotoras en la orientación de la conducta de aprendizaje (Huda et al., 2019).¹⁸

Se sabe que un mejor desempeño en la detección del aprendizaje se correlacionó con un hipocampo más grande en el estudio de Chebat et al. Además, hay un aprendizaje deficiente de la ubicación de objetos (como obstáculos en un pasillo) en pacientes humanos con daño en el hipocampo. La memoria espacial depende de la plasticidad sináptica del hipocampo, y la memoria espacial de mayor duración se asocia con un hipocampo más grande (Milner, 1997).²⁹ Por ejemplo, el segmento posterior del hipocampo se realza volumétricamente en seres humanos con un amplio entrenamiento de navegación. Cuando los participantes con CB fueron evaluados para el reconocimiento de rutas en un escáner de resonancia magnética funcional utilizando un dispositivo de sustitución sensorial, reclutaron regiones adyacentes al hipocampo y el área del lugar parahipocampal (Kupers et al., 2010).¹⁰

La corriente dorsal visual es importante para controlar las acciones guiadas visualmente y seleccionar un camino a través de un entorno desordenado guiado por la visión (Fajen et al., 2003).¹² Por ejemplo, **el flujo óptico que se procesa en el área HF temporal y es una parte integral del flujo dorsal visual, que proporciona información sobre la dirección del movimiento automático y es muy importante para la detección y evitación de obstáculos.** Las lesiones de la corriente dorsal interrumpen gravemente la capacidad de evitar obstáculos, pero no las lesiones de la corriente ventral (Rice, 2006).⁴⁴

La corteza parietal posterior, que también forma parte de la corriente visual dorsal, está involucrada en el procesamiento de información cognitivo-espacial de orden superior. Se cree que el lóbulo parietal registra información espacial en interacción con el hipocampo y juega un papel fundamental en la toma de decisiones de ruta. La corteza parietal posterior también participa en la toma de decisiones visuo-espacial mediada por integraciones sensoriales motoras

(como cuando se apunta a un objetivo) y **la guía visual de los movimientos para evitar obstáculos es una función de la vía occipito-parietal**. Encontramos correlaciones con el área parietal 7 M. Se ha encontrado que esta área es sensible a los lugares dependientes del contexto en el macaco, y se activa en el humano durante la ejecución y observación de una acción (Evangelidou et al., 2009).¹¹ La tarea de señalar un obstáculo y luego evitarlo requiere mucha planificación. Después de haber señalado el obstáculo, hay que tener en cuenta dónde se encuentra el obstáculo en el espacio y planificar una respuesta adecuada al llegar cerca de él (McFadyen et al., 2007).²⁷ Además, aunque hay una reducción volumétrica de casi todas las estructuras corticales y subcorticales en CB, encontramos que se conservó el volumen de las estructuras de la corriente dorsal. **Sugerimos que a través de mecanismos de plasticidad cerebral, las áreas visuales del cerebro pueden ser reclutadas para realizar tareas visuo-espaciales (tal como lo harían en el SC) utilizando la información visuo-táctil proporcionada por el dispositivo de sustitución sensorial en lugar de la visión.**⁷

5.5 Dispositivos de sustitución sensorial

Una gran parte del manto cortical se dedica a la visión. En el macaco, alrededor del 55% de toda la corteza responde de alguna manera a la información visual, y en los humanos es alrededor del 35%. Este espacio cortical no se desperdicia de ninguna manera para las personas ciegas de nacimiento y puede ser reclutado en una variedad de tareas cognitivas y espaciales utilizando los sentidos intactos restantes. De hecho, el reclutamiento de áreas visuales primarias por otras modalidades sensoriales se conoce desde hace bastante tiempo en ciegos congénitos (Kupers y Ptito, 2014).²⁵ **Este proceso, conocido como amodalidad permite el reclutamiento de áreas cerebrales en una tarea específica e independiente de los sentidos.**

El reclutamiento de nodos cerebrales específicos de tareas para formas, movimiento, formas numéricas, formas corporales, colores, formas de palabras,

rostros, la ecolocalización y la navegación táctil representan mecanismos de plasticidad cerebral para el reclutamiento amodal específico.

El reclutamiento de las áreas del cerebro a través de SSD no solo muestra que es posible complementar la información visual faltante, sino que el cerebro trata la información SSD como si fuera una visión real, en el sentido de que intenta extraer la información sensorial relevante para cada tarea específica que estamos tratando de lograr (es decir: movimiento, colores, navegación y otras tareas). Algunos de estos SSD aparecen en la figura 3. ¿Cómo influyen la plasticidad cerebral y la amodalidad en la percepción espacial en personas ciegas de nacimiento? Dado que la visión es bastante importante para la navegación, ¿cómo de esencial es para el desarrollo de las habilidades espaciales y las redes neuronales que respaldan estas habilidades?(Jeamwattthanachai et al., 2019).²¹



FIGURA 3. Dispositivos de sustitución sensorial (SSD). Ejemplos de la configuración experimental para varios dispositivos de sustitución sensorial diferentes. (A–C) La unidad de visualización de la lengua (TDU). (A) La cámara montada en un par de anteojos con los ojos vendados. (B) La configuración completa con cámara, caja convertidora de imágenes y cuadrícula de lengua. La caja, que se lleva en el pecho, controla la intensidad de la estimulación electrotáctil. (C) La rejilla de la lengua. Aplicado en la lengua, proporciona una sensación de hormigueo a través de los electrodos. (D) Un participante que sostiene el EyeCane que emite vibraciones y sonidos para indicar la distancia a un objeto. (E) Los sensores del EyeCane y del dispositivo. (F) La configuración experimental de EyeMusic con auriculares y cámara. (G) La cámara montada en la cabeza del EyeMusic. (H) EyeMusic convierte los colores en diferentes sonidos, lo que permite reconocer la manzana roja entre las verdes. (I) aparato de voz. Convierte imágenes visuales en paisajes sonoros (Meijer, 1992).⁸

Los animales pueden usar señales visuales, táctiles, olfativas, vestibulares o auditivas para navegar (Rauschecker, 1995).³⁶ De hecho, la discapacidad visual prolongada mejora la agudeza espacial auditiva en los hurones. Los seres humanos, por otro lado, se han basado principalmente en el sentido visual para navegar, y la visión se considera la modalidad sensorial espacio-cognitiva más adaptada (Foulke, 1982).¹⁴

La visión es una herramienta capital para formar mapas cognitivos. Cuanto más se destacan estas señales en términos de color o forma, más fácil se recuerdan y más precisa es nuestra representación del entorno (Appleyard, 1970).³ Por lo tanto, la visión es útil para las representaciones espaciales y también para evitar obstáculos. Cuando nos acercamos a un obstáculo, las señales visuales guían la colocación de los pies actualizando constantemente nuestra distancia con el obstáculo y adaptando nuestro comportamiento locomotor de acuerdo con la circunstancia. Ciertas habilidades espaciales auditivas y táctiles también se ven comprometidas por la falta de experiencia visual.¹⁶ Por ejemplo, los individuos con ceguera congénita muestran deficiencias espaciales auditivas y propioceptivas, déficits en las localizaciones espaciales auditivas y en la codificación del movimiento espacial. Es la falta de información visual lo que conduce a las diferencias en el desarrollo normal y la alineación de los mapas espaciales corticales y subcorticales, así como la integración adecuada de la entrada de las modalidades sensoriales restantes (Gori et al., 2014).¹⁶ Además, la mayoría de las redes neuronales responsables de las tareas espaciales están volumétricamente reducidas en comparación con los videntes, incluida la porción posterior del hipocampo, que sugiere que las exigentes demandas de aprender a navegar sin visión impulsan la plasticidad del hipocampo y los cambios volumétricos en ciegos congénitos. También hay una cascada de modificaciones que involucran a otras estructuras cerebrales no visuales que sufren cambios anatómicos, morfológicos, morfométricos, y alteraciones de la conectividad funcional (Aguirre et al., 2016;).¹

A pesar de estos cambios anatómicos, la experiencia visual no es necesaria para el desarrollo de mapas del rostro organizados topográficamente en la corteza intraparietal, ni para la capacidad de representar el espacio de trabajo. Las personas con ceguera congénita pueden formar representaciones mentales del espacio de trabajo a través de información

háptica tan eficientemente como las personas videntes, lo que indica que esta capacidad no depende de la experiencia visual (Nelson et al., 2018).³¹ Las personas con ceguera congénita son capaces de evitar obstáculos, integrar caminos, recordar ubicaciones y generar habilidades cognitivas como representaciones del espacio (Thinus-Blanc y Gaunet, 1997).⁴⁴ **Como consecuencia, los ciegos congénitos mantienen la capacidad de reconocer una ruta familiar y representar información espacial. Además, pueden incluso desenvolverse mejor que sus contrapartes videntes con los ojos vendados en ciertas tareas espaciales y navegar sustituyendo visión con ecolocalización, información táctil, o incluso información propioceptiva** (Kupers et al., 2010).²⁴ Curiosamente, la privación visual neonatal no afecta la representación cognitiva del espacio. En cambio, al sustituir la información visual por la modalidad táctil o auditiva a través de dispositivos de sustitución sensorial, se observan rendimientos similares en CB en comparación con los participantes videntes. Por lo tanto, los CB pueden navegar de manera eficiente utilizando la audición o el tacto. Pueden localizar objetos, navegar alrededor de ellos e incluso desenvolverse tan bien o mejor que los demás videntes en ciertas tareas espaciales (Chebat et al., 2017).⁶ Estas habilidades se pueden mejorar aún más con entrenamiento. Por ejemplo, **las personas CB pueden adquirir conocimiento espacial mediante el uso de señales de sonido mientras juegan videojuegos y transferirlo al mundo real.** Usando EyeCane (Figuras 1D, E), los participantes con ceguera congénita pueden aprender laberintos de Hebb-Williams reales y virtuales, así como sus contrapartes videntes usando la visión. Al aprender un entorno en lo virtual los participantes con CB pueden crear un mapa mental de este entorno que les permite resolver el laberinto en el mundo real de manera más eficiente, y viceversa. Además, **pueden transferir el conocimiento espacial adquirido de laberintos reales a virtuales (y viceversa) de la misma manera que los videntes.**⁷

En conjunto, estos resultados indican que incluso si ciertas habilidades espaciales específicas son deficientes en el caso de la ceguera congénita, el déficit resultante en la navegación sigue siendo puramente perceptivo, y no como previamente se sugirió, un déficit cognitivo (Vecchi et al., 2004).⁴⁶

6. Conclusiones

- Es evidente que es más difícil navegar sin la información que proporciona la visión pero aún no tenemos claro de si con más esfuerzo y tiempo las personas ciegas pueden adquirir la misma competencia espacial que las personas videntes como afirma el modelo convergente, o en contraposición, nunca se podría equiparar como afirman los modelos acumulativo y persistente.
- Las personas con ceguera son competentes en tareas espaciales y en su comprensión del espacio en general, simplemente tiene una comprensión del espacio diferente generada por los sentidos y, por lo tanto desarrollan otras estrategias para representar y configurar el espacio. Para esto es esencial el uso de otras señales como las auditivas, táctiles o hápticas. De hecho, las personas con ceguera tienen mayor facilidad para discriminar los tonos del sonido y para localizar las fuentes de sonido. Además la ecolocalización es clave para la evitación de obstáculos en personas con ceguera, aunque esto no sirve para sonidos dinámicos o en movimiento.
- Los investigadores han propuesto dos marcos distintos para describir la adquisición del conocimiento espacial en personas con ceguera; ambos coinciden en las etapas: punto de referencia, ruta y encuesta aunque difieren en que en el marco continuo las etapas se llevan a cabo en orden secuencial y en el discreto la etapa de ruta y la de encuesta se desarrollan de forma paralela, además también difieren en el momento del desarrollo del aprendizaje visual euclidiano. Para asegurarnos de que marco es el que siguen realmente es necesario más investigación sobre el tema.
- En cuanto a la relación neuronal podemos afirmar que los individuos ciegos tienen aumentos significativos de la cola del hipocampo izquierdo y la cabeza del hipocampo derecho en comparación con los videntes. También existe una disminución de la corteza occipital.
- Las señales auditivas y hápticas sustituyen en las personas con ceguera la función de la corriente dorsal visual, que es importante para controlar las acciones guiadas visualmente y para seleccionar un camino a través de un entorno desordenado guiado por la visión y las funciones del flujo óptico que proporciona información sobre la dirección del movimiento automático y es

muy importante para la evitación y detección de obstáculos. El lóbulo parietal posterior también juega un papel fundamental en las personas videntes en la toma de decisiones visuo-espaciales, y también es sustituido en los videntes por estos mecanismos sensoriales.

- Las estrategias de navegación son distintas para personas con ceguera que para los videntes debido a la privación visual. Según algunos estudios esta puede ser la razón de que las personas con ceguera sigan coordenadas alocéntricas para el desplazamiento, aunque hay otros estudios que afirman que al igual que los videntes, siguen coordenadas egocéntricas. Será necesario más ensayos para entender el desplazamiento.
- Por otro lado, el reclutamiento de las áreas del cerebro a través de SSD no sólo muestra que es posible complementar la información visual restante, sino que el cerebro trata dicha información SSD como si fuera una visión real. También hay que mencionar el futuro esperanzador que presentan los videojuegos con señales auditivas como posible estimulación para las habilidades temporo-espaciales de las personas con ceguera.

7. Bibliografía

1. Aguirre, G. K., Datta, R., Benson, N. C., Prasad, S., Jacobson, S. G., Cideciyan, A. V., et al. (2016). Patterns of individual variation in visual pathway structure and function in the sighted and blind. *PLoS One* 11:e0164677. doi:10.1371/journal.pone.0164677
2. Ammons, C. H., Worchel, P., and Dallenbach, K. M. (1953). "Facial vision": the perception of obstacles out of doors by blindfolded and blindfolded-deafened subjects. *Am. J. Psychol.* 66, 519–553.
3. Appleyard, D. (1970). Styles and methods of structuring a city. *Environ. Behav.* 2, 100–117. doi: 10.1177/001391657000200106
4. Brunec, I. K. et al. Cognitive mapping style relates to posterior–anterior hippocampal volume ratio. *Hippocampus*, <https://doi.org/10.1002/hipo.23072> (2019).
5. Chapman, C. S. & Goodale, M. A. Missing in action: The effect of obstacle position and size on avoidance while reaching. *Exp. Brain Res.*, <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1499-1> (2008).
6. Chebat, D. R., Maidenbaum, S., and Amedi, A. (2017). "The transfer of non-visual spatial knowledge between real and virtual mazes via sensory substitution," in *Proceedings of the 2017 International Conference on Virtual Rehabilitation, ICVR*, (Montreal, QC: IEEE). doi: 10.1371/journal.pone.0126307

7. Chebat DR, Schneider FC, Ptito M. Neural Networks Mediating Perceptual Learning in Congenital Blindness. *Sci Rep.* 2020 Jan 16;10(1):495. doi: 10.1038/s41598-019-57217-w. PMID: 31949207; PMCID: PMC6965659.
8. Chebat DR, Schneider FC, Ptito M. Spatial Competence and Brain Plasticity in Congenital Blindness via Sensory Substitution Devices. *Front Neurosci.* 2020 Jul 30;14:815. doi: 10.3389/fnins.2020.00815. PMID: 32848575; PMCID: PMC7406645.
9. Duarte, I. C., Ferreira, C., Marques, J., and Castelo-Branco, M. (2014). Anterior/posterior competitive deactivation/activation dichotomy in the human hippocampus as revealed by a 3D navigation task. *PLoS One* 9:e86213. doi: 10.1371/journal.pone.0086213
10. Epstein R, Kanwisher N. A cortical representation of the local visual environment. *Nature* 1998, 392:598–601.
11. Evangelidou, M. N., Raos, V., Galletti, C. & Savaki, H. E. Functional imaging of the parietal cortex during action execution and observation. *Cereb. Cortex*, <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn116> (2009).
12. Fajen, B. R. & Warren, W. H. Behavioral Dynamics of Steering, Obstacle Avoidance, and Route Selection. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.2.343> (2003).
13. Finocchietti S, Cappagli G, Gori M. Encoding audio motion: spatial impairment in early blind individuals. *Front Psychol.* 2015 Sep 7;6:1357. doi: 10.3389/fpsyg.2015.01357. PMID: 26441733; PMCID: PMC4561343.
14. Fortin M, Voss P, Lord C, Lassonde M, Pruessner J, Saint-Amour D, Rainville C, Lepore F. Wayfinding in the blind: larger hippocampal volume and supranormal spatial navigation. *Brain* 2008, 131(Pt 11):2995–3005.
15. Gorbet, D. J. & Sergio, L. E. Looking up while reaching out: the neural correlates of making eye and arm movements in different spatial planes. *Exp. Brain Res.*, <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5395-z> (2019).
16. Gori, M., Sandini, G., Martinoli, C., and Burr, D. C. (2014). Impairment of auditory spatial localization in congenitally blind human subjects. *Brain* 137, 288–293. doi: 10.1093/brain/awt311
17. Hill, E. W., Rieser, J. J., Hill, M.-M., Hill, M., Halpin, J., and Halpin, R. (1993). How persons with visual impairments explore novel spaces: strategies of good and poor performers. *J. Vis. Impair. Blind.* 87, 295–301. doi: 10.1177/0145482x9308700805
18. Huda, R., Goard, M. J., Pho, G. N. & Sur, M. Neural mechanisms of sensorimotor transformation and action selection. *European Journal of Neuroscience*, <https://doi.org/10.1111/ejn.14069> (2019).
19. Iachini, T., Ruggiero, G., & Ruotolo, F. Blind people's mental spatial maps.
20. Ishikawa T, Montello RD. Adquisición de conocimiento espacial a partir de la experiencia directa en el entorno: diferencias individuales en el desarrollo del conocimiento métrico y la integración de lugares aprendidos por separado. *Cog Psychol* 2006, 52:93–129.
21. Jeamwattthanachai, W., Wald, M., and Wills, G. (2019). Indoor navigation by blind people: Behaviors and challenges in unfamiliar spaces and buildings. *Br. J. Vis. Impair.* 37, 140–153. doi: 10.1177/0264619619833723.

22. Kallai, J., Makany, T., Karadi, K., and Jacobs, W. J. (2005). Spatial orientation strategies in Morris-type virtual water task for humans. *Behav. Brain Res.* 159, 187–196. doi: 10.1016/j.bbr.2004.10.015
23. Kellogg, W. N. (1962). Sonar system of the blind. *Science* 137, 399–404.
24. Kupers R, Chebat DR, Madsen KH, Paulson OB, Ptito M. Neural correlates of virtual route recognition in congenital blindness. *Proc Natl Acad Sci USA* 2010, 107:12716–12721.
25. Kupers, R., and Ptito, M. (2014). Compensatory plasticity and cross-modal reorganization following early visual deprivation. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 41, 36–52. doi: 10.1016/j.neubiorev.2013.08.001
26. Leporé N, Shi Y, Lepore F, Fortin M, Voss P, Chou Y-Y, Lord C, Lassonde M, Dinov I, Toga AW, et al. Patterns of hippocampal shape and volume differences in blind subjects. *Neuroimage* 2009, 46:949–957.
27. McFadyen, B. J., Bouyer, L., Bent, L. R. & Inglis, J. T. Visual-vestibular influences on locomotor adjustments for stepping over an obstacle. *Exp. Brain Res.*, <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0784-0> (2007) .
28. Merabet, L. B., Connors, E. C., Halko, M. A., & Sánchez, J. (2012). Teaching the blind to find their way by playing video games.
29. Milner, B. Right medial temporal-lobe contribution to object-location memory. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, <https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0133> (1997).
30. Montello DR. Navigation. In: Shah P, Miyake A, eds. *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking*. New York: Cambridge University Press; 2005.
31. Nelson, J. S., Kuling, I. A., Gori, M., Postma, A., Brenner, E., and Smeets, J. B. (2018). Spatial representation of the workspace in blind, low vision, and sighted human participants. *I-Perception* 9:2041669518781877.
32. O’Keefe J, Nadel L. *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford: Clarendon Press; 1978.
33. Packard MG, McGaugh JL. Inactivation of hippo-campus or caudate nucleus with lidocaine differentially affects expression of place and response learning. *Neurobiol Learn Mem* 1996, 65:65–72.
34. Pan N, Zheng K, Zhao Y, Zhang D, Dong C, Xu J, Li X, Zheng Y. Morphometry Difference of the Hippocampal Formation Between Blind and Sighted Individuals. *Front Neurosci.* 2021 Nov 4;15:715749. doi: 10.3389/fnins.2021.715749. PMID: 34803579; PMCID: PMC8601390.
35. Pasqualotto, A., Spiller, M. J., Jansari, A., and Proulx, M. J. (2013). Visual experience facilitates allocentric spatial representation. *Behav. Brain Res.* 236, 175–179. doi: 10.1016/j.bbr.2012.08.042
36. Rauschecker, J. P. (1995). Compensatory plasticity and sensory substitution in the cerebral cortex. *Trends Neurosci.* 18, 36–43. doi: 10.1016/0166-2236(95)93948-w
37. Röder, B., Föcker, J., Hötting, K., and Spence, C. (2008). Spatial coordinate systems for tactile spatial attention depend on developmental vision: evidence from event-related potentials in sighted and congenitally blind adult humans. *Eur. J. Neurosci.* 28, 475–483. doi: 10.1111/j.1460-9568.2008.06352.
38. Sánchez, J., & Rodríguez, J. P. (2010). Videogame for improving orientation and mobility in blind children. In *8th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies*.

39. Schinazi VR, Thrash T, Chebat DR. Spatial navigation by congenitally blind individuals. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*. 2016 Jan-Feb;7(1):37-58. doi: 10.1002/wcs.1375. Epub 2015 Dec 18. PMID: 26683114; PMCID: PMC4737291.
40. Sormani, M. P. et al. Learning ability correlates with brain atrophy and disability progression in RRMS. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, <https://doi.org/10.1136/jnnp-2018-319129> (2019).
41. Strelow, E. R., and Brabyn, J. A. (1982). Locomotion of the blind controlled by natural sound cues. *Perception* 11, 635–640. doi: 10.1068/p110635
42. Supa, M., Cotzin, M., and Dallenbach, K. M. (1944). “ Facial vision”: the perception of obstacles by the blind. *Am. J. Psychol.* 57, 133–183.
43. Taube JS, Valerio S, Yoder RM. Is navigation in virtual reality with FMRI really navigation? *J Cogn Neurosci* 2013, 25:1008–1019.
44. Thinus-Blanc, C., and Gaunet, F. (1997). Representation of space in blind persons: vision as a spatial sense? *Psychol. Bull.* 121, 20–42. doi: 10.1037/0033-2909.121. 1.20
45. Valko, Y., Lewis, R. F., Priesol, A. J., and Merfeld, D. M. (2012). Vestibular labyrinth contributions to human whole-body motion discrimination. *J. Neurosci.* 32, 13537–13542. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2157-12.2012.
46. Vecchi, T., Tinti, C., and Cornoldi, C. (2004). Spatial memory and integration processes in congenital blindness. *Neuroreport* 15, 2787–2790.
47. Wolbers T, Wiener JM. Challenges for identifying the neural mechanisms that support spatial navigation: the impact of spatial scale. *Front Hum Neurosci* 2014, 8:571.
48. Yang C, Wu S, Lu W, Bai Y, Gao H. Anatomic differences in early blindness: a deformation-based morphometry MRI study. *J Neuroimaging* 2014, 24:68–73.