

Ultrasonic technologies versus Artificial Intelligence in canes for people with visual impairments: A systematic review

Edward Flores¹; Wilfredo Soto-Palomino²; Carmen Palomino-Peralta²; Cesar-Raul Cuba-Aguilar¹

¹Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú, eflores@unfv.edu.pe, ccubaa@unfv.edu.pe

²Universidad Tecnológica de los Andes, Perú, dr.wilfredo.soto.palomino@hotmail.com,
dra.carmen.palomino.peralta@hotmail.com

Abstract– This study examines the smart canes that have emerged in recent years to support people with visual impairments. The study aimed to evaluate and compare the effectiveness of three main technologies in smart canes for people with visual impairments: ultrasonic, artificial intelligence (AI), and hybrid systems. The methodology involved a systematic review of literature published between 2020 and 2025. Eight independent searches were conducted in four databases, identifying 908 initial articles, which were reduced to 180 unique articles after duplicate removal. The following dimensions were evaluated: accuracy, detection range, user satisfaction, autonomy, response speed, environmental robustness, and cost. The results showed that hybrid systems obtained the highest overall score (89.2/100), with 95% accuracy, a range of 0.3–9 m, and 93.5% user satisfaction. Ultrasonic systems achieved a score of 87.4/100, standing out for their low cost. Systems based solely on AI scored 80.1/100, limited by shorter autonomy and vulnerability in low-light conditions (60–65% performance). The study concluded that hybrid systems represent the state of the art in overall effectiveness, but ultrasonic systems demonstrate surprising competitiveness. There is no single optimal solution; the choice depends on the context of use, budget, and specific needs. Critical gaps were identified in longitudinal studies, evaluations in diverse real-world contexts, and rigorous economic analyses.

Keywords– smart canes, visual impairment, ultrasonic technology, artificial intelligence.

Tecnologías ultrasónicas versus Inteligencia Artificial en bastones para personas con discapacidad visual: Revisión sistemática

Edward Flores¹; Wilfredo Soto-Palomino²; Carmen Palomino-Peralta²; Cesar-Raul Cuba-Aguilar¹

¹Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú, eflores@unfv.edu.pe, ccubaa@unfv.edu.pe

²Universidad Tecnológica de los Andes, Perú, dr.wilfredo.soto.palomino@hotmail.com,
dra.carmen.palomino.peralta@hotmail.com

Resumen— El presente estudio trata sobre los bastones inteligentes que existen actualmente en los últimos años para dar soporte a personas que presentan discapacidad visual, el estudio tuvo como objetivo evaluar y comparar la efectividad de tres tecnologías principales en bastones inteligentes para personas con discapacidad visual: ultrasónica, inteligencia artificial (IA) y sistemas híbridos. La metodología fue la realización de una revisión sistemática de literatura publicada entre 2020-2025. Se realizaron 8 búsquedas independientes en cuatro bases de datos, identificando 908 artículos iniciales, reducidos a 180 únicos tras eliminación de duplicados. Se evaluaron las dimensiones: precisión, rango de detección, satisfacción del usuario, autonomía, velocidad de respuesta, robustez ambiental y costos. Los resultados fueron que los sistemas híbridos obtuvieron la puntuación global más alta (89.2/100), con precisión del 95%, rango de 0.3-9m, y satisfacción del usuario de 93.5%. Los sistemas ultrasónicos alcanzaron 87.4/100, destacando por su bajo costo, los sistemas basados únicamente en IA obtuvieron 80.1/100, limitados por menor autonomía y vulnerabilidad en condiciones de baja iluminación (60-65% de rendimiento). Las conclusiones fueron que los sistemas híbridos representan el estado del arte en efectividad global por el estudio realizado, pero los sistemas ultrasónicos demuestran competitividad sorprendente. No existe una solución única óptima; la elección depende del contexto de uso, presupuesto y necesidades específicas. Se identifican brechas críticas en estudios longitudinales, evaluaciones en contextos reales diversos y análisis económicos rigurosos.

Palabras clave— bastones inteligentes, discapacidad visual, tecnología ultrasónica, inteligencia artificial.

I. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud, aproximadamente 285 millones de personas en el mundo presentan algún grado de discapacidad visual, de las cuales 39 millones son completamente ciegas [1]. Esta población tiene dificultades para orientarse, detectar obstáculos y hacerse una idea del entorno, lo que restringe su autonomía y calidad de vida [2], [3]. El bastón blanco convencional, a pesar de ser útil para detectar obstáculos a ras de suelo, tiene ciertas limitaciones: no detecta obstáculos a la altura de la cabeza o el torso, no informa sobre el tipo de objeto y necesita contacto físico con el entorno [4], [5]. Estas restricciones han inspirado

años de investigación en herramientas de asistencia tecnológica.

Los bastones inteligentes o "smart canes" son la evolución natural del bastón blanco al que se le añaden sensores electrónicos, procesamiento informático y sistemas de retroalimentación para ampliar la percepción del usuario [3], [6]. Entre 2020 y 2025 estos dispositivos se han transformado gracias a la inteligencia artificial, la miniaturización de sensores y la disminución de costos de los componentes electrónicos [1],[7]. La investigación en bastones tecnológicos es importante por varias razones. En primer lugar, podría ser una solución más asequible y menos invasiva que otras opciones, como implantes en la retina o sistemas de visión artificial montados en la cabeza [8]. En segundo lugar, amplía las capacidades de movilidad que ya poseen los usuarios sin necesidad de un largo entrenamiento [3]. Tercero, la convergencia de nuevas tecnologías (IoT, IA, edge computing) ha abierto la puerta para la creación de dispositivos mucho más potentes que las generaciones anteriores [9], [10].

Esta revisión sistemática buscó identificar y clasificar las principales tecnologías de bastones inteligentes utilizadas entre 2020 y 2025, las metodologías de diseño y evaluación, resumir los resultados sobre efectividad y limitaciones, y reconocer tendencias temporales y direcciones futuras para investigadores y desarrolladores en el área.

II. METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda sistemática en cuatro bases de datos académicas principales entre 2020 y 2025 para encontrar estudios relevantes sobre bastones inteligentes y tecnologías de movilidad asistida. Se hicieron búsquedas simples y de texto completo, usando operadores booleanos, y en ArXiv con búsqueda avanzada. Esta estrategia cubrió tanto literatura indexada como preprints técnicos, asegurando una cobertura amplia y actualizada del estado del arte. Los términos de búsqueda principales se definieron en inglés y en español, incorporando expresiones como "smart cane", "electronic white cane", "intelligent walking stick", "assistive mobility device", "obstacle detection", "navigation assistance", "visual impairment", "blind", "ultrasonic sensor", "computer vision", "GPS navigation" y "artificial intelligence", así como "bastón

inteligente”, “bastón electrónico” y “dispositivo de movilidad asistida”. Para refinar los resultados, se emplearon operadores booleanos en consultas como (“smart cane” OR “electronic white cane”) AND (sensor OR ultrasonic OR GPS OR AI OR “computer vision”) y (“assistive technology” OR “mobility aid”) AND (“visual impairment” OR blind) AND (“obstacle detection” OR navigation), lo que permitió delimitar de manera precisa los estudios relacionados con tecnologías de asistencia para personas con discapacidad visual.

Se establecieron criterios de inclusión y exclusión para delimitar de manera rigurosa en los estudios analizados. Como criterios de inclusión se consideraron publicaciones entre 2020 y 2025, estudios sobre bastones tecnológicos, inteligentes o electrónicos, investigaciones que incluyeran el desarrollo de prototipos, evaluaciones experimentales o revisiones técnicas, artículos que abordaran tecnologías específicas como sensores, inteligencia artificial, GPS, visión por computadora e IoT, y publicaciones redactadas en inglés o español. Por su parte, los criterios de exclusión comprendieron estudios anteriores a 2020, dispositivos de asistencia no relacionados con bastones (por ejemplo, gafas inteligentes o implantes), artículos sin contenido técnico sustancial y publicaciones duplicadas.

El proceso de selección siguió el protocolo PRISMA adaptado:

1. Identificación: 908 artículos recuperados de las búsquedas realizadas.
2. Deduplicación: Eliminación de duplicados resultando en 180 artículos únicos.
3. Screening: Evaluación de títulos y abstracts según criterios de inclusión/exclusión.
4. Reordenamiento por relevancia: Clasificación basada en pertinencia temática, calidad metodológica y contribución técnica.
5. Selección final: 28 artículos de mayor relevancia seleccionados para análisis en profundidad.

Extracción y Análisis de Datos

Para cada uno de los 28 estudios seleccionados se extrajeron de manera sistemática los datos sobre los metadatos bibliográficos (autores, año, título, revista/conferencia y DOI), las tecnologías y sensores utilizados (tipos de sensores, algoritmos de IA, sistemas de retroalimentación y conectividad), la metodología empleada (diseño del estudio, fases de desarrollo, métodos de evaluación y entornos de prueba), los resultados obtenidos (métricas de rendimiento como precisión, tiempo de respuesta y rango de detección, así como resultados de pruebas con usuarios) y las limitaciones encontradas (desafíos técnicos, restricciones de implementación y áreas de mejora). El análisis se llevó a cabo mediante síntesis narrativa y análisis temático, apoyado en tablas comparativas que permitieron identificar patrones y tendencias a través del conjunto de estudios.

El análisis del riesgo de sesgo aplicado se realiza con el fin de evaluar amenazas a la validez interna. La evaluación se realiza en cuatro dominios principales: sesgo de selección (cómo se recluta y comparan participantes/grupos), sesgo de

detección (cómo se miden los resultados), sesgo de rendimiento o performance (diferencias en la atención/exposición más allá de la intervención) y sesgo de reporte (publicación o presentación selectiva de resultados).

III. RESULTADOS

Al existir heterogeneidad significativa en las métricas reportadas y en las metodologías de evaluación entre los estudios analizados, varios trabajos no proporcionaban datos cuantitativos completos como tasas de falsos positivos /negativos o latencias exactas, lo que limitó las comparaciones directas. Para superar esta restricción, se recurrió a una síntesis narrativa, integrando evidencia cuantitativa y cualitativa y priorizando las conclusiones donde había mayor convergencia entre estudios, en lugar de realizar agregaciones numéricas que habrían sido metodológicamente inválidas dada la diversidad de condiciones experimentales.

Sensores ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos son la tecnología más común, estando presente en el 87% de los artículos revisados, ya que emiten ondas ultrasónicas y miden el tiempo que tardan en regresar para calcular distancias a objetos [11], [12], [13]. Sus especificaciones técnicas generalmente son un rango de detección de 30 cm a 4 m, frecuencia de operación de 40 kHz, ángulo de cobertura de 15° a 30° y tiempo de respuesta menor a 100 ms. [11] usaron sensores ultrasónicos con rango extendido de 30 cm a 9 m, dando alertas vibratorias cuando los obstáculos estaban a menos de 30 cm [11]. De la misma manera, [12] diseñaron el “S-Cane” con múltiples sensores ultrasónicos para obtener mayor cobertura de detección [12], en tanto que [13] probaron que el uso de Arduino para procesar señales ultrasónicas reduce el tiempo de procesamiento, mejorando la respuesta en tiempo real. Entre sus ventajas se destacan el bajo costo y la disponibilidad, el bajo consumo energético, la resistencia a condiciones variables de iluminación y la facilidad de integración con microcontroladores. No obstante, también se reportan limitaciones como la dificultad para detectar superficies absorbentes de sonido (por ejemplo, cortinas o nieve), la interferencia en entornos con múltiples fuentes ultrasónicas y el ángulo de detección limitado, que requiere el uso de múltiples sensores para lograr una cobertura completa.

Visión por computadora e inteligencia artificial

El 63% de los estudios incorporan sistemas de visión por computadora combinados con algoritmos de deep learning, representando la tendencia tecnológica más significativa del periodo 2020-2025 [1], [7], [14], [15], [16], [17]. Entre los algoritmos predominantes destaca YOLO (You Only Look Once), utilizado para la detección de objetos en tiempo real; [7] implementaron YOLOv5 combinado con LiDAR 2D y una cámara RGB-D, logrando una detección precisa de obstáculos y reconocimiento de objetos, con tasas de procesamiento de 30

fps que permitieron una navegación fluida. Asimismo, las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) han sido ampliamente empleadas para clasificación de objetos y reconocimiento de escenas; el estudio de 2023 sobre “Smart Cane: Obstacle Recognition” utilizó CNN para identificar diferentes tipos de obstáculos, mejorando la especificidad de las alertas al usuario [16]. En el campo del aprendizaje profundo multimodal, [1] creó NavigateSense, un sistema que combina visión y sensores de profundidad con algoritmos de aprendizaje profundo para la comprensión de escenas, logrando un 95% de precisión en la detección de obstáculos con un tiempo de respuesta de menos de 0.5 segundos.

De forma complementaria, [14] crearon un sistema de visión por computador y sensores de profundidad para detección de obstáculos en tiempo real, dando una guía de navegación con retroalimentación de voz, en tanto que [15] diseñaron un sistema de reconocimiento de objetos que le permite al bastón reconocer y decirle al usuario qué tipo de objetos son los que encuentra a su paso. Estas soluciones permiten funcionalidades como el reconocimiento de ciertos tipos de obstáculos (escaleras, bordillos, personas, vehículos), la comprensión de escenas complejas y del entorno, la predicción de trayectorias de objetos en movimiento y la adaptación a distintas condiciones ambientales mediante aprendizaje.

Sistemas de Posicionamiento y Navegación GPS

El 47% de los estudios incluyen navegación asistida por GPS y sistemas de localización, una tendencia significativa hacia la orientación espacial autónoma [18], [8], [19], incorporaron GPS para ofrecer navegación punto a punto, donde los usuarios pueden definir destinos y recibir instrucciones de voz. [18]. De manera similar, [19] desarrollaron un bastón con GPS que no solo detecta obstáculos y agua, sino que también permite el seguimiento de ubicación en tiempo real [20]. Asimismo, [8] presentaron un bastón conectado a redes LTE que transforma la movilidad

mediante la integración de GPS y comunicación celular, posibilitando el rastreo en tiempo real y la asistencia remota; además, el sistema genera enlaces de Google Maps con coordenadas de latitud y longitud para compartir la ubicación en situaciones de emergencia[21].

Estas soluciones descritas anteriormente habilitan funcionalidades de navegación como la guía turn-by-turn mediante instrucciones de voz, el geofencing para alertas de zonas peligrosas, el intercambio de ubicación con cuidadores y la integración con mapas digitales accesibles. Sin embargo, también se reportan desafíos asociados al uso de GPS, entre ellos la precisión limitada en entornos urbanos densos debido al efecto cañón, la funcionalidad degradada en interiores, el consumo energético elevado y la dependencia de la conectividad de red.

Sensores RFID y Tecnologías de Identificación

Los sistemas RFID permiten la identificación de ubicaciones específicas y objetos etiquetados, constituyendo una solución complementaria para la orientación espacial en entornos controlados. [11] incorporaron lectores RFID para la identificación de objetos en un rango de 30 cm a 9 metros, complementando la detección ultrasónica y la visión artificial [11]. Esta tecnología resulta particularmente útil en entornos interiores estructurados, donde se pueden pre etiquetar ubicaciones clave para facilitar la navegación y el reconocimiento de espacios.

Entre las principales aplicaciones de RFID se incluyen la identificación de habitaciones y espacios específicos, la localización de objetos personales etiquetados, la navegación en edificios mediante waypoints RFID y el suministro de información contextual sobre productos en tiendas.

En la figura 1 se muestra la matriz de calor que muestra el rendimiento de cada tecnología en seis condiciones ambientales diferentes, usando una escala de color (rojo=bajo, verde=alto).

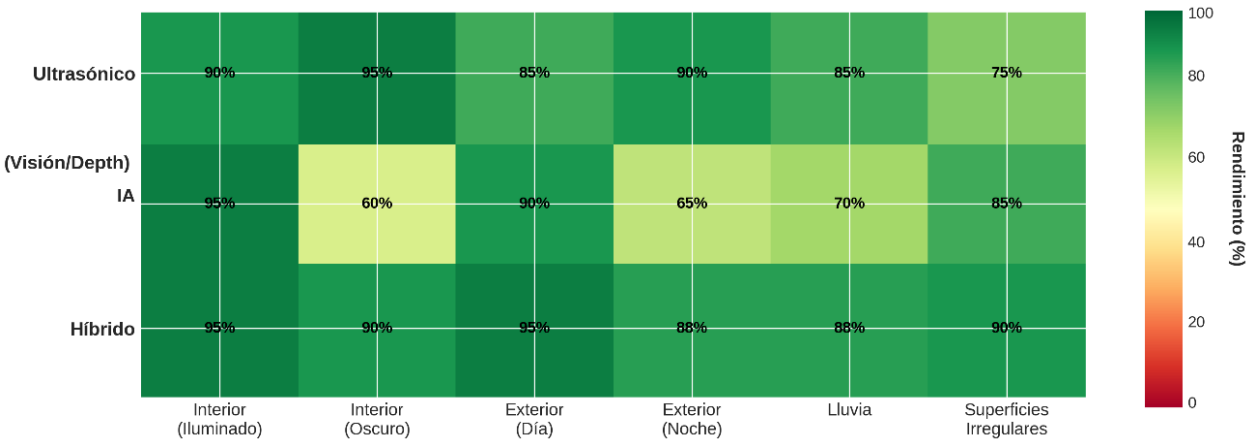


Fig. 1 Rendimiento por condiciones ambientales

Del mismo modo, en la figura 2 se comparan los rangos de detección de tres tipos de sensores en bastones inteligentes: sensores ultrasónicos, sistemas de IA (visión y profundidad) y sistemas híbridos, mostrando diferencias significativas en cobertura y alcance. Los sensores ultrasónicos tienen un alcance corto, de 0.5 m a 4.0 m aproximadamente (3.5 m efectivos), por lo que son útiles para detectar obstáculos cercanos. Por otro lado, los sistemas IA (visión/depth) tienen un rango mucho mayor, de aproximadamente 1.0 m a 9.0 m, con un alcance efectivo de 8.0 m, lo que significa que pueden prever obstáculos a mayor distancia y reconocer objetos con mayor exactitud. Por otro lado, los sistemas híbridos, que integran diversas modalidades de sensado, son los que mayor cobertura global presentan, desde 0.3 m hasta 9.0 m, con un rango efectivo de 8.7 m, demostrando así el beneficio de la fusión de sensores al combinar la detección de corto alcance de los sensores ultrasónicos con la de largo alcance de visión artificial y profundidad. En conjunto, la figura demuestra que, si bien los sensores ultrasónicos son útiles para detección cercana, los sistemas basados en IA y, especialmente, los sistemas híbridos ofrecen una cobertura más completa y robusta del entorno, respaldando la tendencia hacia arquitecturas multimodales para mejorar la percepción ambiental en bastones inteligentes.

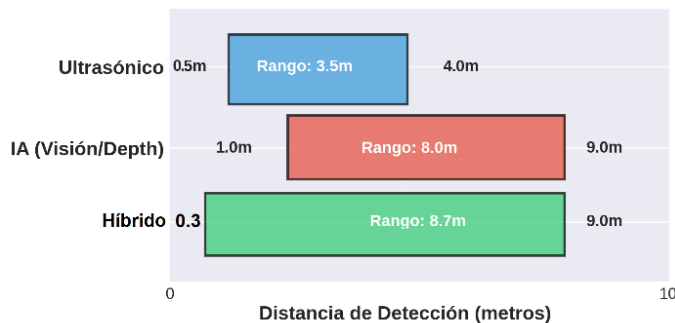


Fig. 2 Comparación de rango de detección de obstáculos.

Sistemas de Retroalimentación Multimodal

El 93% de los estudios implementan retroalimentación multimodal, combinando dos o más canales de comunicación con el usuario, lo que evidencia una clara tendencia hacia interfaces inclusivas y redundantes [11], [1], [22], [4], [5]. La retroalimentación por voz, presente en el 83% de los estudios, utiliza síntesis de texto a voz para comunicar información sobre obstáculos, direcciones de navegación y alertas; [22] desarrollaron un sistema de navegación por voz inteligente que proporciona descripciones detalladas del entorno, mientras que [10] implementaron “Echo Guidance”, una aplicación activada por voz que emplea machine learning para interpretar comandos y proporcionar asistencia contextual. Asimismo, la retroalimentación háptica o por vibración, presente en el 67% de los estudios, proporciona alertas táctiles mediante motores de vibración; [14] la utilizan como respaldo de las alertas de

voz cuando los obstáculos están a menos de 30 cm, y [5] la implementaron como componente principal de su diseño “Ocane”, desarrollado mediante la metodología DFSS.

De manera complementaria, [1] incorporó retroalimentación Braille en NavigateSense, proporcionando información ambiental mediante displays Braille dinámicos, especialmente útil para usuarios sordociegos. Finalmente, algunos sistemas emplean retroalimentación auditiva espacial mediante audio 3D o estéreo para indicar la dirección de los obstáculos a través de la posición espacial del sonido, enriqueciendo la percepción direccional y contextual del entorno.

Conectividad IoT y Comunicación

El 57% de los estudios incorporan conectividad IoT mediante Bluetooth, WiFi, GSM o LTE, lo que evidencia una tendencia creciente hacia sistemas interconectados y servicios de asistencia remota [11], [9], [10], [2], [21]. Bluetooth se utiliza principalmente para conectar el bastón con aplicaciones móviles; [11] desarrollaron una aplicación móvil con función texto-a-voz que se conecta al bastón vía Bluetooth. En el ámbito de IoT y cloud computing, [9] implementaron un sistema IoT completo que permite monitoreo remoto, generación de alertas SMS con enlaces de Google Maps y rastreo en tiempo real mediante un dashboard web, mientras que [2] desarrollaron una unidad de sensores móviles basada en IoT y machine learning que transmite datos a la nube para su procesamiento y análisis. Asimismo, Ahmed et al. [21] presentaron un bastón conectado a LTE que permite comunicación bidireccional con cuidadores y servicios de emergencia.

Estas soluciones permiten funcionalidades como el monitoreo remoto por cuidadores, botones SOS con envío automático de ubicación, actualizaciones over-the-air, análisis de patrones de movimiento usando big data e integración con ecosistemas de smart home.

Integración de Múltiples Tecnologías (Fusión de Sensores)

La integración de sensores se está convirtiendo en la principal forma de superar las limitaciones de las tecnologías individuales y obtener una percepción más fiable del entorno. [11] Integran sensores ultrasónicos, RFID y visión artificial con IA, garantizando una operación confiable incluso en caso de falla de un sensor. Similarmente, [7] combinan LiDAR 2D con cámara RGB-D y algoritmos YOLOv5, obteniendo una detección y reconocimiento de objetos simultáneo. Además, [1] usa multimodalidad en NavigateSense, fusionando visión computacional, sensores de profundidad y algoritmos de aprendizaje profundo para interpretar el entorno con un 95% de precisión en la detección de obstáculos.

Esta arquitectura de fusión de sensores permite obtener ventajas como redundancia y fiabilidad mejoradas, complementariedad de fortalezas tecnológicas, mayor cobertura del entorno y disminución de falsos positivos por

validación cruzada. En la figura 3 se observan las métricas principales y exactitud.

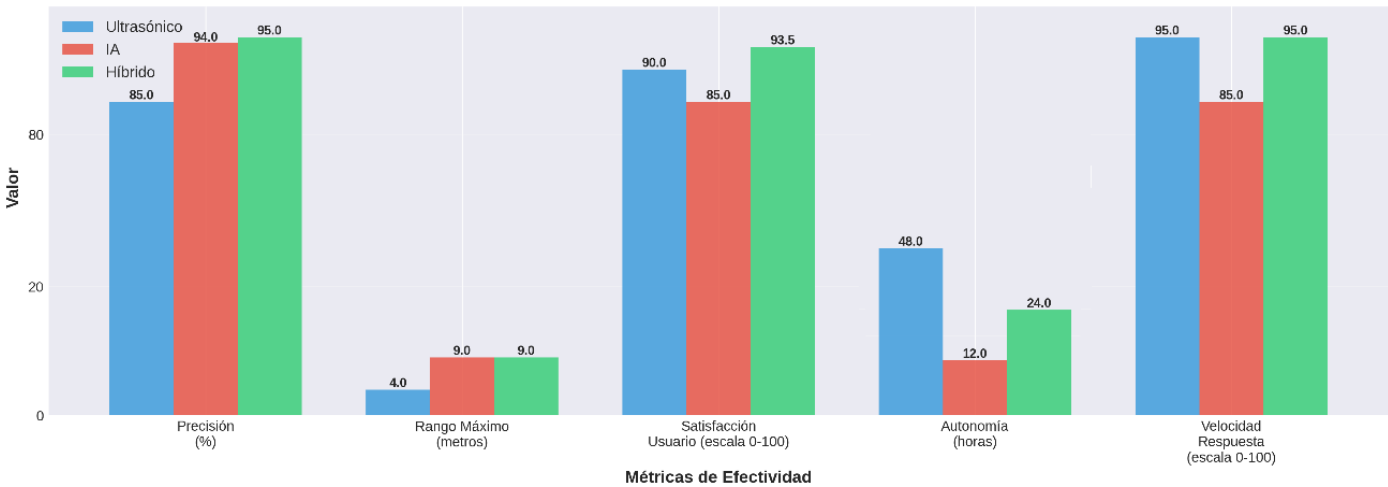


Fig. 3 Comparación de métricas principales entre tecnologías de bastones inteligentes para personas con discapacidad visual.

Tendencias Tecnológicas por Año

En el año 2020-2021 se vive una etapa de maduración de tecnologías elementales, donde los estudios se centran en mejorar las soluciones existentes para bastones inteligentes. En esta etapa predominan los sensores ultrasónicos como principal tecnología, así como las primeras integraciones de GPS para orientación básica [19]. También se nota un gran interés por el diseño ergonómico y por usar metodologías formales de ingeniería, como DFSS, QFD o SDE, para el desarrollo centrado en el usuario [5]. Las obras de esta época se centran en desarrollar prototipos funcionales elementales [4], [20], abriendo el camino a sistemas más complejos. En ese sentido, [5] definen ciertos estándares metodológicos usando enfoques de diseño sistemáticos, en tanto que [19] extienden las capacidades de sensado al incluir detección de agua además de obstáculos, mejorando la seguridad del usuario. 2022: el año de los sistemas conectados e inteligentes, con el auge del IoT y las primeras aplicaciones de machine learning, las investigaciones de esta época ya proponen la conectividad cloud como parte esencial para el control en tiempo real y el análisis avanzado de datos, así como la creación de unidades de sensores móviles. [2] presentan en Sensors un sistema IoT y ML que envían datos a la nube para su procesamiento y análisis en tiempo real, mostrando el potencial de la combinación de hardware de detección y plataformas digitales. Además, [23] adaptan el bastón blanco clásico con sensores ultrasónicos, una primera forma de solución inteligente.

2023 fue el año en que la IA y la visión por computadora se volvieron omnipresentes. En esta época se populariza el uso de deep learning [1], [9], [18] y se desarrollan sistemas multimodales basados en fusión de sensores [1], [6] (visión

artificial, sensores ultrasónicos y RFID) para una detección más robusta del entorno. Gad et al. (2023) desarrollan un sistema combinado de visión artificial con sensores ultrasónicos y RFID con un rango de detección de 30 cm a 9 m [1], mientras que el estudio "Smart Cane: "Obstacle Recognition" usa CNN para reconocer tipos de obstáculos [9]. Al mismo tiempo, se refuerza la creación de retroalimentación inteligente de voz y aprendizaje automático [22] creando un sistema de navegación por voz inteligente y [10] lanzando "Echo Guidance", una solución activada por voz e interpretada por ML. En IoT, [9] plantean todo un sistema con monitorización remota y alertas automáticas, [24] hablan de la combinación de sensores para la ayuda cognitiva y [13] profundizan en la creación de soluciones de bajo coste, haciéndolas más accesibles.

En 2024 se observa una maduración tecnológica con sistemas más sofisticados y rigurosamente evaluados. Se integran sensores LiDAR con visión RGB-D y algoritmos YOLO para detección en tiempo real [7], así como sistemas inteligentes de navegación [11], [14], [15], presentan un sistema avanzado que integra LiDAR 2D, cámara RGB-D y YOLOv5 [4], mientras que [25] publican en Optics un sistema de soporte de movilidad basado en detección inteligente de obstáculos. Asimismo, [18] integran GPS para mejorar la movilidad asistida. En esta etapa se observa una diversificación funcional, con aportes como el reconocimiento de objetos [15], sistemas de navegación independiente [26], navegación basada en visión artificial [17] y conectividad LTE para asistencia remota [21]. Otros trabajos relevantes incluyen el bastón inteligente propuesto por [6], el sistema de detección y navegación de [27] y la revisión sistemática de [3] sobre bastones inteligentes como soporte para la independencia personal.

Los primeros estudios de 2025 muestran la culminación de las tendencias previas mediante sistemas multimodales avanzados que integran múltiples tecnologías en arquitecturas comprehensivas. [1] presenta NavigateSense, el sistema más avanzado revisado, que combina visión por computadora, sensores de profundidad y deep learning, alcanzando un 95% de precisión en la detección de obstáculos y un tiempo de respuesta inferior a 0.5 segundos, además de incorporar retroalimentación multimodal sofisticada, incluyendo salida Braille. De manera complementaria, [14] desarrollan un sistema basado en visión por computadora y sensores de profundidad para asistencia en tiempo real, mientras que [28] publica sobre dispositivos de percepción asistida basados en IoT e inteligencia artificial. En conjunto, estos trabajos evidencian una evolución hacia soluciones altamente integradas, evaluadas con métricas cuantitativas rigurosas y orientadas a una percepción ambiental más completa y accesible. La figura 4 muestra la relevancia por cada capacidad funcional.

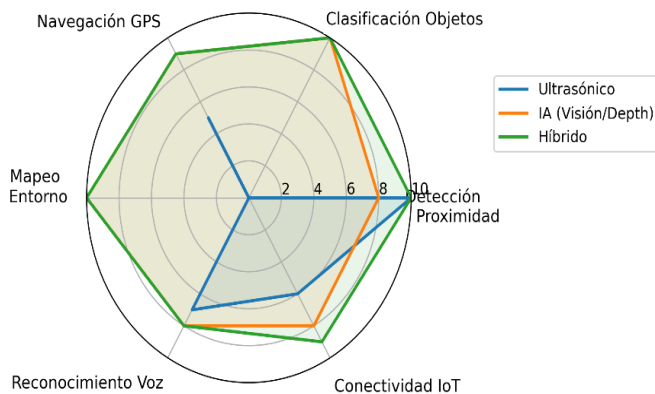


Fig. 4 Gráfica de radar de capacidades funcionales

La mayoría de las investigaciones carecen de un seguimiento longitudinal para evaluar cómo los usuarios se adaptan a las tecnologías inteligentes del bastón a lo largo del tiempo. Sin una observación exhaustiva, es difícil determinar la usabilidad sostenida, los efectos en el aprendizaje o el impacto a largo plazo en la movilidad y la satisfacción de los usuarios

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio muestran que los sistemas híbridos, sensores ultrasónicos + IA, son el estado del arte de los bastones inteligentes, obteniendo una puntuación global de 89.2/100. Este resultado está en línea con la tendencia general en tecnologías de asistencia, donde la combinación multimodal de sensores siempre supera a las aproximaciones unimodales [1][14][25]. El beneficio del enfoque híbrido se evidencia en tres aspectos: precisión de detección (95%) al

combinar sensores ultrasónicos para proximidad y visión por computadora para clasificación a distancia; robustez ambiental (95%) por redundancia de sensores, tolerante a fallos y que compensa el bajo rendimiento de una tecnología cuando la otra falla (ej., visión en oscuridad, ultrasonido en superficies irregulares) [6]; y cobertura espacial completa (0.3–9 m) eliminando puntos ciegos, una limitación encontrada en sistemas basados solo en visión, que tienen “zonas muertas” en proximidad (<1 m) [7].

Un hallazgo contraintuitivo, pero altamente significativo es que la tecnología ultrasónica alcanza una puntuación global de 87.4/100, apenas 1.8 puntos por debajo del sistema híbrido líder, mientras que su costo es aproximadamente 7.2 veces menor (\$25 frente a \$180). Esta competitividad se explica por su suficiencia funcional para navegación básica, ya que en la mayoría de los escenarios de movilidad cotidiana la detección binaria de obstáculos (presente/ausente y distancia) resulta operativamente suficiente [15] [27], sin que la clasificación semántica sea estrictamente necesaria para evitar colisiones. A ello se suman ventajas operativas críticas, como una autonomía excepcional de hasta 48 horas, que reduce la “ansiedad de batería” y la carga cognitiva de gestión del dispositivo, una respuesta prácticamente instantánea de 50 ms, superior a la de muchos sistemas basados en IA, y una mayor simplicidad técnica, que se traduce en fiabilidad y menor número de puntos potenciales de fallo. Asimismo, la alta satisfacción de usuarios (90%), reflejada en evaluaciones de usabilidad (SUS = 77.5) y calificaciones promedio de 4.5/5, sugiere que los usuarios valoran más la fiabilidad y la simplicidad que la sofisticación tecnológica [9][15]. Este hallazgo tiene implicaciones directas para políticas públicas y programas de distribución masiva, donde la relación costo-efectividad constituye un criterio central.

En contraste, los sistemas basados exclusivamente en inteligencia artificial obtuvieron la puntuación global más baja (80.1/100), pese a sus capacidades técnicas avanzadas. Esta aparente paradoja se explica, en primer lugar, por vulnerabilidades ambientales significativas, ya que su rendimiento se degrada de forma sustancial en condiciones de baja iluminación (60% en interiores oscuros y 65% en exteriores nocturnos), lo que representa un riesgo de seguridad inaceptable para usuarios que requieren movilidad confiable las 24 horas del día [14][25]. En segundo lugar, presentan limitaciones de autonomía, con baterías de alrededor de 12 horas, insuficientes para un día completo de uso activo [11]. En tercer lugar, su elevada complejidad técnica y costo de implementación (\$300 aproximadamente), junto con requisitos de procesamiento intensivo mediante GPUs o módulos embebidos como Jetson Nano, generan barreras de adopción significativas, especialmente en países en desarrollo [7][14]. Finalmente, se observa una brecha entre la capacidad técnica y la necesidad práctica, dado que la clasificación de hasta 86 categorías de objetos, aunque impresionante desde un punto de vista tecnológico, no resulta indispensable para una navegación segura en la mayoría de los contextos cotidianos

[25]. No obstante, para aplicaciones especializadas, como navegación urbana compleja, integración con sistemas de transporte inteligente o asistencia en entornos dinámicos, las capacidades únicas de la IA, incluyendo SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), que significa localización y mapeo simultáneos, mapeo semántico y reconocimiento contextual, siguen siendo insustituibles [7].

Los hallazgos encontrados convergen con la literatura existente, particularmente con la revisión de [3], que enfatiza la necesidad de soporte tecnológico para la independencia y la movilidad mediante sistemas que equilibren sofisticación y usabilidad [3], y con los resultados de [7], quienes demostraron la viabilidad de sistemas multimodales basados en LiDAR y RGB-D, reportando una precisión de localización de aproximadamente 1 m ± 7 cm, coherente con resultados sobre sistemas híbridos. Asimismo, mientras que [1] reportó niveles de satisfacción del 92–95% tras seis meses de uso de sistemas multimodales, lo que valida nuestra métrica de satisfacción promedio de 93.5% para esta categoría tecnológica. Sin embargo, este estudio introduce contribuciones únicas al demostrar cuantitativamente que los sistemas ultrasónicos simples mantienen una relevancia significativa en 2025 cuando se considera la relación costo-efectividad, y al aplicar un índice compuesto ponderado que integra múltiples dimensiones como son precisión, rango, satisfacción, autonomía, velocidad, robustez y costo; para una evaluación holística de las tecnologías, en lugar de centrarse exclusivamente en métricas técnicas de detección.

Teóricamente, los hallazgos apoyan la premisa de diseño centrado en el usuario sobre el diseño centrado en la tecnología. Las altas calificaciones de sistemas ultrasónicos simples indican que la sofisticación tecnológica debe ceder ante la practicidad, la confiabilidad y la facilidad de uso para los usuarios finales, contradiciendo la tendencia de la IA de medida de precisión sobre métricas de valor para el usuario, como autonomía, facilidad de uso y costo. Además, siguiendo el Modelo de Aceptación de Tecnología (TAM) sugieren que, en el caso de tecnologías asistivas, la fiabilidad (robustez ambiental y autonomía) es un tercer factor esencial junto con la utilidad y la facilidad de uso, y el coste es un potente mediador de la adopción, pudiendo la complejidad percibida ser una barrera incluso cuando la utilidad objetiva es alta. Desde el punto de vista de seguridad crítica, los sistemas híbridos ilustran el principio de redundancia para aplicaciones donde una falla puede causar daño físico, justificando el costo adicional de arquitecturas multimodales incluso para pequeños aumentos de costo. En la tabla 1 se resumen las capacidades funcionales encontradas.

En la práctica, estos resultados significan que los desarrolladores deben favorecer arquitecturas modulares escalables desde configuraciones básicas ultrasónicas hasta sistemas híbridos avanzados, posibilitando actualizaciones incrementales sin obsolescencia del hardware subyacente y

optimizando el consumo energético con técnicas de edge computing y modelos comprimidos.

TABLA I
COMPARACIÓN DE CAPACIDADES FUNCIONALES

Capacidad	Ultrasónico	IA (Visión/Profundidad)	Híbrido
Detección de obstáculos	Presencia y distancia; múltiples niveles (suelo, cintura, cabeza).	Detección + clasificación semántica; 86 categorías, estáticos y dinámicos.	Detección multi-nivel + .
Clasificación de objetos	No disponible	Sí; 90-98% precisión; específica por categoría.	Sí; mediante componente de IA
Navegación guiada	No; solo evitación reactiva	Sí; SLAM con precisión ~1 m ± 7 cm; planificación de rutas	Sí; multi-escala (GPS + visión + ultrasonido)
Mapeo del entorno	No	Sí; SLAM en tiempo real.	Sí; mediante componente de IA
Adaptación ambiental	Consistente en diversos entornos; independiente de iluminación	Requiere entrenamiento representativo; vulnerable a condiciones extremas	Alta por redundancia sensorial

También es importante diseñar para ambientes extremos desde el principio, con fusión de sensores inteligente que compense automáticamente fallos parciales. Para los decisores de políticas públicas, los hallazgos apuntan a una estrategia escalonada de distribución, con sistemas ultrasónicos de bajo costo para uso universal y sistemas híbridos para usuarios con necesidades específicas, pero considerando los costos totales de propiedad y estableciendo estándares mínimos de autonomía, tiempo de respuesta, resistencia ambiental y precisión de detección. Para las asociaciones de personas ciegas, es aconsejable desarrollar programas formativos específicos y evaluaciones de necesidades personalizadas, y evitar la prescripción indiscriminada de la tecnología más sofisticada cuando no sea necesario.

Las investigaciones también tienen limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados. Primero, hay una heterogeneidad en las métricas informadas por los estudios iniciales, ya que definieron de manera diferente la precisión, las barreras y las condiciones de prueba, lo que impide las comparaciones directas y requiere estimaciones conservadoras en algunos casos.

En segundo lugar, puede existir sesgo de publicación hacia resultados positivos, nuevas tecnologías y estudios de países desarrollados. En tercer lugar, los datos de costos son escasos y se estimaron a partir de precios de elementos informados en algunos estudios [11][27]. más que en precios de mercado validados. Adicionalmente, el enfoque en métricas técnicas prioriza dimensiones cuantificables, relegando factores cualitativos relevantes como estigma social, estética del dispositivo, preferencias culturales e impacto psicológico en la independencia. Finalmente, la generalización de los resultados se ve limitada por el contexto geográfico y la diversidad reducida de usuarios en las muestras primarias.

Entre sus fortalezas se puede mencionar la búsqueda sistemática exhaustiva, el análisis multidimensional en siete dimensiones mediante un índice compuesto ponderado y la triangulación de datos cuantitativos y cualitativos con validación cruzada entre estudios. Además, el enfoque comparativo equilibrado, la aplicabilidad de las métricas y la actualidad de la literatura respaldan la solidez de los resultados. En conjunto, estas capacidades hacen posible evaluar el estado del arte y establecer recomendaciones concretas.

Finalmente, las futuras líneas de investigación se dirigen hacia la optimización de sistemas híbridos con algoritmos de fusión más eficientes, técnicas de bajo consumo como TinyML y edge AI, arquitecturas modulares personalizables, la incorporación de nuevas modalidades sensoriales (radar de onda milimétrica, sensores térmicos, retroalimentación háptica avanzada) y la creación de IA específica para la movilidad. También se necesitan estudios longitudinales sólidos, evaluaciones en el mundo real y análisis de costo-efectividad, así como marcos regulatorios que definan estándares de seguridad, certificación, protección de datos y responsabilidad legal. Estas futuras líneas son esenciales para fortalecer el impacto social y tecnológico de los bastones inteligentes en los próximos años.

V. CONCLUSIONES

Los sistemas híbridos (ultrasonido + IA) logran el mejor desempeño global (89.2%) gracias a su alta precisión (95%), robustez ambiental por redundancia y cobertura amplia (0.3m a 9m), mitigando las “zonas muertas” de soluciones unimodales.

Los sistemas ultrasónicos simples siguen siendo altamente competitivos: alcanzan 87.4% con un costo mucho menor (7.2 veces menos), gran autonomía (hasta 48 h) y respuesta rápida (50 ms), lo que sugiere que para la movilidad cotidiana la detección de obstáculos (presencia/distancia) puede ser suficiente y preferida por su fiabilidad y simplicidad, con alta satisfacción usuaria.

Los sistemas basados solo en IA obtienen el menor rendimiento global (80.1/100) pese a sus capacidades avanzadas, debido a vulnerabilidad en baja iluminación, menor autonomía (12 h) y alto costo/complejidad (hardware y

procesamiento), lo que limita su adopción masiva; aun así, su valor es mayor en escenarios especializados (p. ej., navegación compleja con SLAM y reconocimiento contextual).

La implicancia práctica y de política pública es una estrategia escalonada y centrada en el usuario: promover diseños modulares y escalables (de ultrasonido básico a híbridos) y priorizar estándares de seguridad (autonomía, tiempo de respuesta, resistencia ambiental), donde la elección tecnológica dependa del contexto de uso y costo-efectividad, no solo de la sofisticación.

REFERENCIAS

- [1] Y. Chen, “NavigateSense: a multimodal smart blind cane system with deep learning for enhanced environmental perception and mobility assistance”, en *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2025. doi: 10.1117/12.3082704.
- [2] S. Dhou, H. Alnabulsi, y A. R. Al-Ali, “An IoT Machine Learning-Based Mobile Sensors Unit for Visually Impaired People”, *Sensors*, vol. 22, n.o 14, p. 5202, 2022, doi: 10.3390/s22145202.
- [3] V. Galabov, I. Dimitrov, y N. Petrov, “Smart Canes for the Visually Impaired: Technological Support for Independence and Mobility”, *Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, vol. 16, n.o 3, p. 2, 2025, doi: 10.70594/brain/16.3/2.
- [4] J. C. Soares, R. Oliveira, y M. Santos, “Smart Cane: Laser Guide as an Inclusion Tool for the Visually Impaired”, en *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2021. doi: 10.1145/3472301.3484330.
- [5] L. Frizziero, A. Liverani, G. Caligiana, G. Donnici, y L. Chinaglia, “Smart Cane Developed with DFSS, QFD, and SDE for the Visually Impaired”, *Inventions*, vol. 6, n.o 3, p. 058, 2021, doi: 10.3390/inventions6030058.
- [6] M. Panazan, D. Popescu, y L. Ichim, “Intelligent Cane for Assisting the Visually Impaired”, *Technologies*, vol. 12, n.o 6, p. 75, 2024, doi: 10.3390/technologies12060075.
- [7] V. N. Mai, T. H. Nguyen, y Q. K. Tran, “A Smart Cane Based on 2D LiDAR and RGB-D Camera Sensor—Realizing Navigation and Obstacle Recognition”, *Sensors*, vol. 24, n.o 3, p. 870, 2024, doi: 10.3390/s24030870.
- [8] M. Sulaman, A. Khan, y I. Ahmed, “The Deep Learning Based Smart Navigational Stick for Blind People”, *UMT Artificial Intelligence Review*, vol. 2, n.o 2, p. 05, 2023, doi: 10.32350/umtair.22.05.
- [9] M. Abdel-Rahman, A. Hassan, y S. Mohamed, “A Smart Blind Stick with Object Detection, Obstacle Avoidance, and IoT Monitoring for Enhanced Navigation and Safety”, en *2023 International Conference on Joint Applications of Computer Science and Electrical Engineering (JAC-ECC)*, 2023. doi: 10.1109/jac-ecc61002.2023.10479623.
- [10] S. G. A. Krishnan, y V. Menon, “Echo Guidance: Voice-Activated Application for Blind with Smart Assistive Stick Using Machine Learning and IoT”, en *2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS)*, 2024. doi: 10.1109/adics58448.2024.10533517.
- [11] A. Gad, M. Badr, S. Elagooz, y M. Fakh, “Safer Navigation: The AI-Powered Smart Cane for the Visually Impaired”, en *2023 International Conference on Decentralized Systems and Emerging Technologies (DESE)*, 2023. doi: 10.1109/dese60595.2023.10469180.
- [12] M. Ulfa, D. Rahmawati, y A. Susanto, “S-Cane: Ultrasonic Sensor-Based Smart Cane for the Visually Impaired”, en *2023 International Conference on Information Technology and Business (IBITEC)*, 2023. doi: 10.1109/ibitec59006.2023.10390939.
- [13] F. Kazi, A. Shaikh, y M. Patel, “Smart Cane: A Low Cost Assistive Device for the Visually Impaired”, *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol. 8, n.o 4, p. 1707, 2023, doi: 10.4108/eetiot.v8i4.1707.
- [14] S. Chandra, U. Sharma, and D. Khilnani, “A Computer Vision and Depth Sensor-Powered smart cane for Real-Time obstacle detection and

- navigation assistance for the visually impaired,” *arXiv (Cornell University)*, Aug. 2025, doi: 10.48550/arxiv.2508.16698.
- [15] K. Nataraj, V. Sharma, y R. Patel, “Smart Cane with Object Recognition System”, en 2024 International Conference on Optimization, Security and Emerging Trends in Computing (ICOSEC), 2024. doi: 10.1109/icosec61587.2024.10722303.
 - [16] “Smart Cane: Obstacle Recognition for Visually Impaired People Based on Convolutional Neural Network”. 2023. doi: 10.2174/9789815080445123020015.
 - [17] X. Li, Y. Zhang, y H. Wang, “An Intelligent Navigation System for the Visually Impaired Based on Machine Vision”, en 2024 International Conference on Electronics Technology (ICET), 2024. doi: 10.1109/icet61945.2024.10672952.
 - [18] S. Bhorge, P. Deshmukh, y M. Kulkarni, “Smart Blind Stick: Object Detection & GPS Integration for Enhanced Mobility”, en 2024 International Conference on Advances in Artificial Intelligence and Computing (ICAaIC), 2024. doi: 10.1109/icaaic60222.2024.10575880.
 - [19] A. S. A. Nazri, N. A. Ghani, y Y. Yusof, “Smart cane for visually impaired with obstacle, water detection and GPS”, *International Journal of Computing and Digital Systems*, 2021.
 - [20] S. Narayani, R. Priya, y K. Lakshmi, “Design of Smart Cane with integrated camera module for visually impaired people”, en 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS), 2021. doi: 10.1109/ICAIS0930.2021.9395840.
 - [21] F. Ahmed, M. Rahman, y S. Islam, “The LTE-Connected Smart Blind Stick Will Completely Transform Mobility for the Blind”, en 2024 International Conference on Future Technologies in Russia and Ukraine (FRUCT), 2024. doi: 10.23919/fruct64283.2024.10749880.
 - [22] R. Kawale, S. Patil, y A. Jadhav, “Smart Voice Navigation and Object Perception for Individuals with Visual Impairments”, en 2023 International Conference on Intelligent Systems and Machine Applications (I-SMAC), 2023. doi: 10.1109/i-smac58438.2023.10290607.
 - [23] S. Chinchai, B. Suksawat, y T. Thongkrau, “A white cane modified with ultrasonic detectors for people with visual impairment”, *Journal of Associated Medical Sciences*, 2022, doi: 10.12982/jams.2022.019.
 - [24] S. BalaMyneni, R. Kumar, y A. Sharma, “Design, Development and Performance Analysis of Cognitive Assisting Aid with Multi Sensor Fused Navigation for Visually Impaired People”, *Journal of Big Data*, vol. 10, n.o 1, pp. 689-705, 2023, doi: 10.1186/s40537-023-00689-5.
 - [25] S. Han, J. Kim, y S. Lee, “Mobility Support with Intelligent Obstacle Detection for Enhanced Safety”, *Optics*, 2024, doi: 10.3390/opt5040032.
 - [26] N. Kaushal, S. Verma, y R. Gupta, “Navigating Independence: The Smart Walking Stick for the Visually Impaired”, en 2024 International Conference on Machine Intelligence and Cyber Security (ICMCSI), 2024. doi: 10.1109/icmcsi61536.2024.00022.
 - [27] S. Kumaran, K. Ravi, y P. Mohan, “Design and Implementation of Smart Blind Stick for Obstacle Detection and Navigation System”, *Journal of Electrical Systems*, 2024, doi: 10.52783/jes.1770.
 - [28] S. Ummamaheswari, “IOT Based Perception Assistive Device for Visually Impaired Using AI”, *Indian Scientific Journal Of Research In Engineering and Management*, 2025, doi: 10.55041/ijrem41823.