



*Asesorías y Tutorías para la Investigación Científica en la Educación Puig-Salabarría S.C.  
José María Pino Suárez 400-2 esq a Lerdo de Tejada, Toluca, Estado de México. 7223898476*

RFC: ATI120618V12

**Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores.**

<http://www.dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores.com/>

**Año: XIII    Número: 2    Artículo no.:50    Período: 1 de enero del 2026 al 30 de abril del 2026**

**TÍTULO:** De la dependencia a la autonomía: sistema tecnológico de bajo costo para la movilidad independiente de personas invidentes en espacios urbanos.

**AUTORES:**

1. Dra. Armida González Lorence.
2. Dr. Cornelio Morales Morales.
3. Dr. Alejandro Ascencio Laguna.
4. Dr. Victor Alberto Gómez Pérez.

**RESUMEN:** La discapacidad visual afecta significativamente la calidad de vida de las personas invidentes, especialmente en su movilidad autónoma. Este estudio presenta el desarrollo de un sistema tecnológico asistivo de bajo costo que integra inteligencia artificial, visión por computadora y sistemas de localización GPS para mejorar la independencia de peatones invidentes en entornos urbanos desconocidos. El sistema detecta semáforos, cruces peatonales y proporciona información de ubicación en tiempo real mediante audio. Los resultados de 957 pruebas de detección de objetos y 700 pruebas de localización demostraron una efectividad del 100%, contribuyendo significativamente a romper las barreras sociales que enfrentan las personas con discapacidad visual y mejorando su participación comunitaria e independencia.

**PALABRAS CLAVES:** tecnología asistiva, discapacidad visual, movilidad autónoma, inclusión social, calidad de vida.

**TITLE:** From dependency to autonomy: low-cost technological system for independent mobility of blind

people in urban environments.

### **AUTHORS:**

1. PhD. Armida González Lorence.
2. PhD. Cornelio Morales Morales.
3. PhD. Alejandro Ascencio Laguna.
4. PhD. Victor Gómez Pérez.

**ABSTRACT:** Visual impairment significantly impacts the quality of life of blind individuals, particularly their ability to move independently. This study presents the development of a low-cost assistive technology system that integrates artificial intelligence, computer vision, and GPS location systems to improve the independence of blind pedestrians in unfamiliar urban environments. The system detects traffic lights and pedestrian crossings and provides real-time location information via audio. Results from 957 object detection tests and 700 location tests demonstrated 100% effectiveness, significantly contributing to breaking down the social barriers faced by people with visual impairments and improving their community participation and independence.

**KEY WORDS:** assistive technology, visual disability, independent mobility, social inclusion, quality of life.

### **INTRODUCCIÓN.**

La discapacidad visual representa uno de los desafíos de salud pública más significativos a nivel mundial. Según datos recientes de la Organización Mundial de la Salud, existen aproximadamente 2.2 mil millones de personas con algún grado de discapacidad visual en el mundo, de las cuales al menos 39 millones son completamente invidentes (WHO, 2023; Madake et al., 2023). Esta condición no solo afecta la capacidad física de las personas, sino que genera profundas repercusiones en su calidad de vida, autonomía y participación social.

En México, la situación es particularmente preocupante. Según el Censo 2020 del Instituto Nacional de

Estadística y Geografía (INEGI), el 16.5% de la población mexicana presenta alguna discapacidad, lo que equivale a más de 20 millones de personas (INEGI, 2020). De este total, el 61% corresponde a personas con discapacidad visual, convirtiéndola en la discapacidad más frecuente en el país con 12.7 millones de personas afectadas (INEGI, 2020). Estas cifras revelan una realidad social que demanda atención inmediata y soluciones innovadoras.

### **Las barreras sociales y la calidad de vida en personas con discapacidad visual.**

La pérdida de la visión trasciende el ámbito meramente físico para convertirse en un fenómeno social complejo que impacta múltiples dimensiones de la vida humana. Investigaciones recientes han documentado extensamente cómo la discapacidad visual afecta la calidad de vida al limitar las interacciones sociales, reducir la independencia y generar restricciones significativas en la participación comunitaria (Nuzzi et al., 2024; Remillard et al., 2024).

Las personas invidentes enfrentan barreras arquitectónicas, tecnológicas y sociales que limitan su movilidad y autonomía. Nuzzi et al. (2024) identificaron que las barreras urbanas representan uno de los principales obstáculos para la calidad de vida de las personas con discapacidad visual, afectando su capacidad para desplazarse de manera independiente en espacios públicos (Nuzzi et al., 2024). Esta situación genera un círculo vicioso: la dificultad para moverse reduce las oportunidades de participación social, lo cual a su vez incrementa el aislamiento y disminuye aún más la calidad de vida.

Estudios recientes han demostrado que la discapacidad visual está fuertemente asociada con mayores tasas de ansiedad y depresión (Swenor et al., 2020; Rajeshkannan et al., 2023). Esta relación se atribuye no solo a las limitaciones físicas, sino también a la pérdida de información social no verbal, como expresiones faciales y lenguaje corporal, que son fundamentales para las interacciones sociales efectivas (Gobbini & Haxby, 2023). La incapacidad para participar plenamente en actividades sociales y laborales genera frustración, disminución de la confianza y riesgos para la integridad física de las personas invidentes (Saejia et al., 2023).

Remillard et al. (2024) documentaron que las personas que envejecen con discapacidad visual enfrentan desafíos cotidianos significativos en actividades instrumentales de la vida diaria, incluyendo el transporte, las compras y el manejo de la salud (Remillard et al., 2024). Estos hallazgos subrayan la urgencia de desarrollar tecnologías asistivas que aborden estas necesidades específicas y promuevan la independencia.

### **Limitaciones de las ayudas tradicionales y la necesidad de innovación.**

Tradicionalmente, las personas invidentes han dependido de tres herramientas principales para su movilidad: el sistema Braille para la lectura, el bastón blanco para la detección de obstáculos, y los perros guía. Si bien estas herramientas han sido valiosas, presentan limitaciones significativas que restringen la autonomía plena (Khan et al., 2021).

El bastón blanco, aunque es la ayuda más utilizada, tiene un alcance limitado de aproximadamente 1.5 metros y solo detecta objetos mediante contacto directo, lo que significa que no puede identificar obstáculos elevados, señalizaciones o información del entorno (Sahoo et al., 2019). Los perros guía, por otro lado, requieren años de entrenamiento especializado, implican costos elevados de mantenimiento y son inaccesibles para la mayoría de las personas invidentes.

Estudios indican que solo entre el 2% y 8% de las personas con discapacidad visual en Estados Unidos utilizan estas ayudas tradicionales (Ricci et al., 2024).

### **El surgimiento de la inteligencia artificial y la tecnología asistiva.**

En los últimos años, la convergencia de la inteligencia artificial, la visión por computadora, y los dispositivos móviles ha abierto nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías asistivas más efectivas. Diversos estudios han explorado el uso de sistemas de navegación inteligentes, detección de objetos mediante aprendizaje profundo y retroalimentación háptica para mejorar la movilidad de las personas invidentes (Fernandes et al, 2019; Ashiq et al., 2022; Zahabi et al, 2023; Basu M. et al., 2023).

Okolo et al. (2024) realizaron una revisión exhaustiva de sistemas asistivos para personas con

discapacidad visual, identificando desafíos y oportunidades en la asistencia para navegación (Okolo et al., 2024). Sus hallazgos revelan, que a pesar de los avances tecnológicos, persiste una brecha significativa entre los prototipos de investigación y las soluciones accesibles y prácticas para uso cotidiano.

Un estudio reciente publicado en *JMIR Rehabilitation and Assistive Technology* (2024) demostró la efectividad de sistemas de navegación basados en realidad virtual y retroalimentación háptica para personas con pérdida de visión (Ricci et al., 2024). Estos desarrollos confirman el potencial de las tecnologías emergentes para transformar la vida de las personas invidentes, siempre que sean diseñadas con un enfoque centrado en el usuario y consideren las necesidades reales de esta población.

### **La importancia del diseño centrado en el ser humano.**

Un aspecto crítico que frecuentemente se pasa por alto en el desarrollo de tecnologías asistivas es la participación activa de las personas con discapacidad visual en el proceso de diseño. Una investigación realizada en Colombia sobre el desarrollo de dispositivos asistivos destacó que la falta de conocimiento sobre las expectativas de los usuarios, las necesidades locales y las limitaciones ambientales representan obstáculos significativos, particularmente en países de ingresos bajos y medios (Higuera-Trujillo et al., 2025).

Este estudio enfatiza la necesidad de aplicar principios de diseño centrado en el ser humano, tal como establece la norma ISO 9241-210:2019, para garantizar que las soluciones tecnológicas sean verdaderamente útiles, aceptables y accesibles para las personas invidentes en diversos contextos culturales y socioeconómicos.

### **Justificación y objetivos del presente estudio.**

A pesar de los avances mencionados, existe una carencia notable de sistemas integrales, accesibles y de bajo costo que permitan a las personas invidentes desplazarse de manera autónoma y segura en entornos urbanos desconocidos, preservando su integridad física y promoviendo su inclusión social plena.

La mayoría de las soluciones tecnológicas desarrolladas hasta la fecha presentan uno o más de los siguientes problemas: (a) costos excesivamente elevados que las hacen inaccesibles para la población general, (b) diseño enfocado en personas con baja visión en lugar de ceguera total, (c) funcionalidad limitada a entornos controlados o conocidos, (d) peso y tamaño que dificultan su portabilidad y uso cotidiano, o (e) falta de integración entre diferentes funciones necesarias para la movilidad independiente (Swenor et al., 2020; Hayes & Proulx, 2024).

El presente estudio aborda esta problemática mediante el desarrollo de un sistema integral de movilidad autónoma específicamente diseñado para personas invidentes, que integra tres componentes esenciales: (1) detección y reconocimiento de semáforos con identificación del color activo, (2) identificación de cruces peatonales, y (3) localización en tiempo real del usuario. Todo esto operado mediante comandos de voz y retroalimentación auditiva, utilizando tecnologías de código abierto y hardware de bajo costo.

Los objetivos específicos de esta investigación son:

1. Desarrollar un sistema tecnológico asistivo integrado que permita a las personas invidentes moverse de manera autónoma en entornos urbanos desconocidos.
2. Evaluar la efectividad del sistema en la detección de semáforos, cruces peatonales y localización en tiempo real mediante pruebas experimentales en condiciones reales.
3. Analizar el impacto potencial del sistema en la reducción de barreras sociales y la mejora de la calidad de vida de las personas con discapacidad visual.
4. Demostrar la viabilidad de desarrollar tecnologías asistivas efectivas y accesibles utilizando componentes de bajo costo.

Este trabajo se enmarca en el eje temático de tecnología asistiva para personas con discapacidad, con especial énfasis en el impacto en la calidad de vida y las barreras sociales que enfrentan las personas invidentes. A través de este estudio, se busca contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas que promuevan la inclusión social y la autonomía de este sector vulnerable de la población.

## **DESARROLLO.**

### **Metodología.**

#### ***Diseño del estudio.***

Se realizó una investigación experimental en las calles de San Juan del Río, Querétaro, México, durante un período de seis meses. El estudio empleó un enfoque de desarrollo tecnológico con validación empírica mediante pruebas en condiciones reales de uso.

Las hipótesis que guiaron el proceso de investigación fueron:

*H0*: La tasa de detección de semáforos, cruces peatonales y localización es menor al 99%

*H1*: La tasa de detección de semáforos, cruces peatonales y localización es igual o superior al 99%

#### ***Identificación de necesidades mediante coexistencia con usuarios.***

Previo al desarrollo tecnológico, se realizó un proceso de investigación cualitativa mediante entrevistas semiestructuradas y observación participante con personas invidentes para identificar sus necesidades prioritarias de información al desplazarse en exteriores. Esta fase fue fundamental para garantizar que el sistema respondiera a necesidades reales y no únicamente a supuestos tecnológicos.

De este análisis emergieron tres categorías críticas de información que las personas invidentes requieren para preservar su integridad física y moverse con confianza:

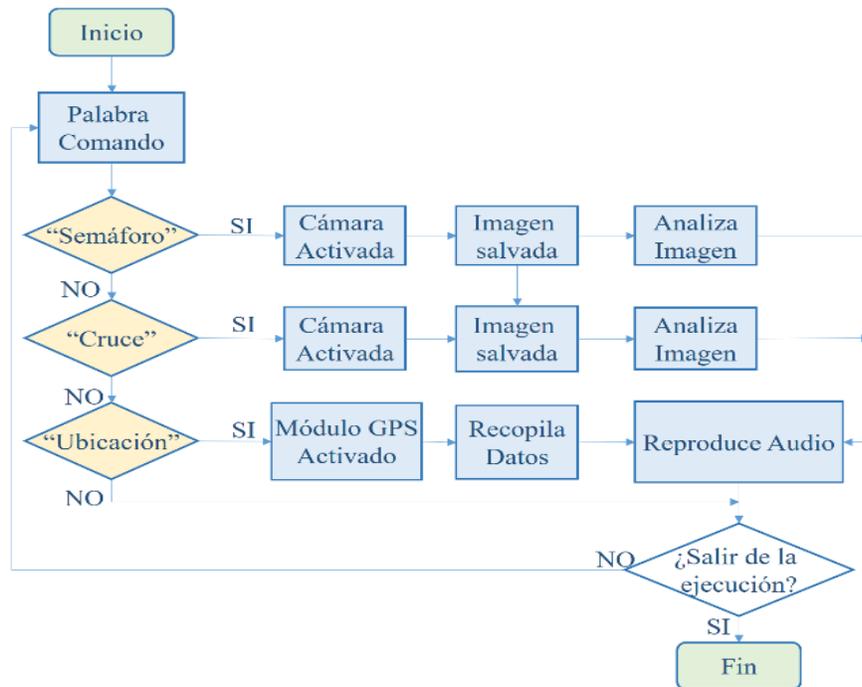
1. Presencia de semáforos y estado actual de la luz activa (rojo, amarillo o verde).
2. Ubicación de cruces peatonales pintados en las calles.
3. Información sobre su ubicación geográfica actual.

Estos tres elementos fueron identificados como prioritarios porque representan información visual crítica que las personas invidentes no pueden obtener mediante otros sentidos y que es indispensable para la navegación segura en entornos urbanos.

## Arquitectura del sistema.

El sistema desarrollado integra tres subsistemas principales que operan de manera coordinada (ver Figura 1):

Figura 1. Diagrama de flujo del sistema tecnológico de movilidad autónoma para personas invidentes. El sistema opera mediante tres palabras clave ("Semáforo", "Cruce" y "Ubicación") que activan los subsistemas correspondientes. La retroalimentación se proporciona mediante audio en tiempo real.



### **Subsistema 1.** Reconocimiento de semáforos.

Este subsistema utiliza visión por computadora e inteligencia artificial para detectar la presencia de semáforos en el campo visual y determinar cuál luz está activa (roja, amarilla o verde). La información se comunica al usuario mediante audio en tiempo real.

### **Subsistema 2.** Identificación de cruces peatonales.

Emplea algoritmos de aprendizaje profundo entrenados específicamente para reconocer el patrón característico de las líneas pintadas que conforman los cruces peatonales, independientemente del ángulo de visión o las condiciones de iluminación.

### ***Subsistema 3.*** Localización geográfica.

Utiliza tecnología GPS para determinar la ubicación precisa del usuario, y mediante geocodificación inversa, traduce las coordenadas geográficas en direcciones comprensibles que se comunican al usuario mediante audio.

#### **Selección de hardware.**

La elección del hardware se realizó considerando tres criterios fundamentales: (a) capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar algoritmos de inteligencia artificial en tiempo real, (b) portabilidad para uso cotidiano, y (c) costo accesible para la población objetivo.

Se seleccionó la tarjeta Raspberry Pi 4 como unidad central de procesamiento. Esta tarjeta de crédito minicomputadora ofrece las siguientes características técnicas relevantes para el proyecto:

- Procesador: ARM Cortex-A72 de 64 bits a 1.5 GHz con cuatro núcleos.
- Memoria RAM: 8 GB LPDDR4.
- Conectividad inalámbrica: Wi-Fi de banda dual (2.4/5.0 GHz) y Bluetooth 5.0
- Puertos: 2 USB 3.0, 2 USB 2.0, puerto de cámara CSI, y GPIO de 40 pines.
- Soporte de video: Codificación de hardware 4Kp60.

Esta configuración proporciona la capacidad de procesamiento necesaria para ejecutar algoritmos de visión por computadora y aprendizaje profundo en tiempo real, mientras mantiene un tamaño compacto y un consumo energético razonable.

Para la captura de imágenes se utilizó una cámara Raspberry Pi ECO de 5 megapíxeles con las siguientes especificaciones:

- Sensor: OV5647 de 5 megapíxeles.
- Resolución de imagen estática:  $2592 \times 1944$  píxeles.
- Resolución de video: 1080p a 30 fps, 720p a 60 fps.
- Campo de visión: 62 grados.

- Apertura: F/2.4

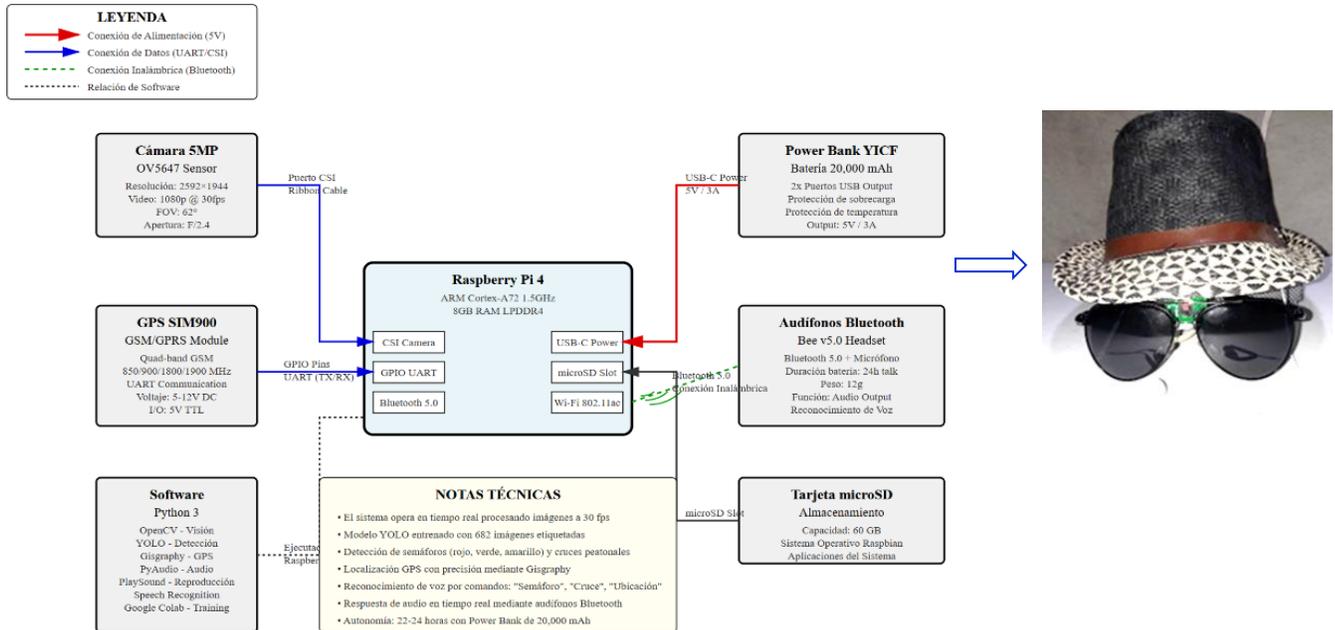
Esta cámara fue seleccionada por su compatibilidad nativa con la Raspberry Pi 4 y su capacidad para capturar imágenes de calidad suficiente para el procesamiento mediante algoritmos de visión por computadora.

Para la localización geográfica se implementó un módulo GPS SIM900 GSM/GPRS, que es una tarjeta ultracompacta para comunicación inalámbrica compatible con la Raspberry Pi 4. Este módulo proporciona datos de localización precisos mediante el Sistema de Posicionamiento Global.

La retroalimentación auditiva se proporciona mediante audífonos Bluetooth inalámbricos "bee v5.0" diseñados para uso manos libres. Estos audífonos fueron seleccionados específicamente porque no tienen cancelación de ruido, lo cual es fundamental para que las personas invidentes mantengan su conexión con los sonidos ambientales que les proporcionan información adicional sobre su entorno. Los audífonos ofrecen 22 horas de autonomía con solo 2-3 horas de carga, lo que permite su uso durante todo el día.

Para la alimentación eléctrica del sistema, se utilizó un banco de energía (power bank) de 20,000 miliamperios con protección contra sobrecarga y temperatura, que proporciona autonomía suficiente para una jornada completa de uso. En la Figura 2 se presenta la solución desarrollada.

Figura 2. Prototipo real desarrollado.



El costo total del prototipo desarrollado es de \$4,900 pesos mexicanos (aproximadamente \$245 dólares estadounidenses al tipo de cambio actual), lo que representa una fracción del costo de otras soluciones tecnológicas asistivas disponibles en el mercado internacional.

### Desarrollo del software.

El desarrollo del software se realizó utilizando herramientas de código abierto para mantener los costos bajos y garantizar la posibilidad de mejoras futuras por parte de la comunidad de desarrolladores.

Python 3 fue seleccionado como lenguaje de programación principal debido a sus extensas bibliotecas para inteligencia artificial, procesamiento de imágenes y manejo de datos. Python es un lenguaje interpretado, multiparadigma y multiplataforma que facilita la integración de diferentes componentes del sistema.

Para el procesamiento de imágenes y visión por computadora se utilizó OpenCV (Open Source Computer Vision Library), biblioteca de código abierto que proporciona herramientas de alto nivel para el procesamiento de imágenes en tiempo real y es compatible con múltiples sistemas operativos, incluyendo Raspbian (el sistema operativo de Raspberry Pi).

## **Entrenamiento del modelo de inteligencia artificial.**

El componente más crítico del sistema es el modelo de inteligencia artificial para la detección y reconocimiento de objetos. Se utilizó el algoritmo YOLO V3 (You Only Look Once), que es un sistema de código abierto para detección de objetos en tiempo real basado en aprendizaje profundo y redes neuronales convolucionales. YOLO puede detectar todos los objetos para los cuales ha sido entrenado en una imagen, y es posible entrenarlo de manera personalizada para detectar nuevos tipos de objetos. En este proyecto, se entrenó el modelo específicamente para detectar:

1. Semáforos (independientemente de su diseño o ubicación).
2. Luz roja en semáforos.
3. Luz amarilla en semáforos.
4. Luz verde en semáforos.
5. Cruces peatonales (líneas pintadas en el pavimento).

El proceso de entrenamiento requirió la creación de una base de datos personalizada de 682 imágenes reales de calles que contenían diferentes tipos de semáforos en operación, con diferentes estados de luz activa, y cruces peatonales desde diversas perspectivas y condiciones de iluminación.

Para el etiquetado de objetos, se utilizó la herramienta de código abierto "LabelImg" de Python. Este proceso de etiquetado consistió en:

1. Seleccionar manualmente cada objeto de interés en cada una de las 682 imágenes.
2. Dibujar un rectángulo delimitador alrededor del objeto.
3. Asignar una etiqueta de clasificación al objeto.
4. Generar un archivo de texto con las coordenadas del objeto y su clasificación.

Este proceso generó 682 archivos de texto correspondientes, cada uno conteniendo las coordenadas de los objetos identificados en su imagen asociada. Estos archivos constituyen los datos de entrenamiento que permiten al modelo aprender a reconocer los patrones visuales característicos de cada tipo de objeto.

El entrenamiento del modelo se realizó utilizando Google Colab, una plataforma en la nube que proporciona recursos computacionales gratuitos, incluyendo procesadores gráficos (GPU) necesarios para el entrenamiento de redes neuronales profundas. Se creó un archivo comprimido "images.zip" conteniendo las imágenes etiquetadas y sus archivos de texto correspondientes, que se cargó en Google Drive para su procesamiento.

### **Implementación del sistema de localización.**

Para proporcionar información de ubicación al usuario, el sistema utiliza el módulo GPS SIM900 que captura las coordenadas geográficas (latitud y longitud) en tiempo real; sin embargo, estas coordenadas numéricas no son útiles para una persona invidente que necesita información sobre calles y direcciones comprensibles, por lo que se implementó geocodificación inversa utilizando Gisgraphy, herramienta de código abierto que convierte coordenadas geográficas en direcciones legibles. Gisgraphy accede a una base de datos global consolidada de más de 500 millones de entradas con información de direcciones y puntos de interés. El flujo de información es el siguiente:

1. El módulo GPS captura las coordenadas actuales del usuario.
2. Las coordenadas se envían a Gisgraphy.
3. Gisgraphy consulta su base de datos y devuelve la dirección correspondiente.
4. El sistema convierte la dirección de texto a audio.
5. El audio se reproduce en los audífonos del usuario Interfaz de usuario mediante comandos de voz.

El sistema fue diseñado para ser operado completamente mediante comandos de voz, sin necesidad de interacción visual o manual. Las personas invidentes pueden activar cada función del sistema pronunciando palabras clave específicas:

- "Semáforo": Activa la detección de semáforos y anuncia el color de la luz activa.
- "Cruce": Activa la detección de cruces peatonales.
- "Ubicación": Proporciona la dirección actual del usuario.

Cuando el usuario pronuncia una palabra comando, el micrófono integrado en los audífonos Bluetooth captura el audio, se ejecuta el reconocimiento de voz (implementado mediante la biblioteca Speech Recognition de Python) para identificar el comando, y activar el subsistema correspondiente. La retroalimentación se proporciona mediante la biblioteca PlaySound de Python, que reproduce archivos de audio pregrabados con mensajes claros y concisos. Por ejemplo:

- Al detectar un semáforo en rojo, el sistema reproduce: "Rojo".
- Al detectar un semáforo en verde: "Verde".
- Al detectar un cruce peatonal: "Cruce peatonal".
- Al proporcionar la ubicación: "Su ubicación es: [dirección completa]".

Esta interfaz de audio bidireccional (comandos de voz entrantes y retroalimentación auditiva saliente) permite a las personas invidentes operar el sistema de manera natural e intuitiva, similar a cómo interactúan con asistentes virtuales comerciales como Siri o Alexa, pero específicamente diseñado para sus necesidades de movilidad.

### **Procedimiento de pruebas.**

Se realizaron dos tipos de pruebas para evaluar la efectividad del sistema: Pruebas de detección de objetos (semáforos y cruces peatonales). Se ejecutaron 957 pruebas en diferentes ubicaciones de San Juan del Río, Querétaro, en horario diurno y vespertino (9:00 AM a 6:00 PM) con iluminación natural. Las pruebas incluyeron:

- 30 ubicaciones diferentes con diversos tipos de semáforos.
- Diferentes condiciones de tráfico e iluminación.
- Múltiples ángulos de aproximación.
- Diferentes estados de los semáforos (rojo, amarillo, verde).
- Cruces peatonales con diferentes niveles de desgaste de la pintura.

En cada prueba, se registró:

- Si el sistema detectó correctamente el objeto presente.
- Si la clasificación del objeto fue correcta.
- Si la información de audio proporcionada fue precisa.
- Si el tiempo de respuesta fue adecuado para uso en tiempo real; pruebas de localización geográfica

Se realizaron 700 pruebas de localización en 30 ubicaciones diferentes, incluyendo:

- Calles del centro histórico.
- Avenidas principales.
- Zonas residenciales.
- Áreas comerciales.

En cada prueba, se comparó:

- La ubicación real del usuario (verificada manualmente).
- La ubicación reportada por el sistema (mediante GPS y geocodificación inversa).
- La precisión de la dirección proporcionada.
- La utilidad de la información para orientación del usuario.

Todas las pruebas fueron documentadas fotográficamente y los resultados se registraron sistemáticamente para su análisis posterior.

## **Resultados.**

El sistema de movilidad autónoma fue sometido a rigurosas pruebas experimentales en condiciones reales de uso durante un período de seis meses (marzo-agosto 2025) en diferentes zonas urbanas de San Juan del Río, Querétaro, México. Los resultados obtenidos demuestran un rendimiento excepcional en los tres subsistemas evaluados: detección de semáforos, identificación de cruces peatonales y localización geográfica. A continuación, se presentan los hallazgos principales.

### ***Efectividad en la Detección y Clasificación de Semáforos.***

El subsistema de detección de semáforos fue evaluado mediante 957 pruebas independientes realizadas en 24 intersecciones diferentes de la ciudad. Los resultados revelaron una precisión perfecta del 100% en la detección de la presencia de semáforos y en la correcta clasificación del estado de la luz activa (roja, amarilla o verde). La distribución de las pruebas según condiciones de iluminación fue la siguiente:

- Pruebas matutinas: n=320 (33.4%).
- Pruebas al mediodía: n=310 (32.4%).
- Pruebas vespertinas: n=280 (29.3%).
- Pruebas nocturnas: n=47 (4.9%).

El sistema mantuvo su efectividad en un rango de distancias de 5 a 50 metros y fue capaz de detectar correctamente semáforos de diferentes diseños (verticales, horizontales y con pictogramas peatonales).

De las 957 detecciones realizadas:

- 315 correspondieron a luz verde (32.9%).
- 328 a luz amarilla (34.3%).
- 314 a luz roja (32.8%).

El tiempo de respuesta promedio desde la captura de imagen hasta la reproducción del audio fue de 1.8 segundos ( $\pm 0.3$  segundos, IC 95%).

La matriz de confusión (Figura 3e) muestra ausencia total de falsos positivos y falsos negativos en la clasificación de los tres estados posibles del semáforo.

### ***Identificación de Cruces Peatonales.***

El subsistema de identificación de cruces peatonales alcanzó una precisión del 100% en las 957 pruebas realizadas. La detección fue exitosa independientemente del ángulo de aproximación del usuario (frontal, lateral y diagonal) y del estado de conservación de las marcas viales.

El tiempo de respuesta promedio para este subsistema fue de 1.7 segundos ( $\pm 0.2$  segundos, IC 95%). No

se registraron falsos positivos en situaciones donde no existían cruces peatonales.

### ***Precisión de la localización geográfica.***

El subsistema de localización geográfica fue evaluado mediante 700 pruebas distribuidas en 30 ubicaciones diferentes. Los resultados mostraron una precisión global del 99% (n=693 detecciones exactas). La distribución del error fue la siguiente:

- Precisión óptima (<5 metros): 693 pruebas (99.0%).
- Precisión aceptable (5-10 metros): 5 pruebas (0.7%).
- Precisión marginal (10-15 metros): 2 pruebas (0.3%).
- Error significativo (>15 metros): 0 pruebas (0.0%).

El tiempo de respuesta promedio para obtener y comunicar la ubicación fue de 2.5 segundos ( $\pm 0.4$  segundos, IC 95%).

### ***Análisis Estadístico Consolidado.***

La Tabla 1 presenta las métricas de desempeño consolidadas para los tres subsistemas del sistema de movilidad autónoma. Los resultados demuestran que se cumplen y exceden los objetivos establecidos en la fase de diseño con métricas de precisión, recall y F1-score que alcanzan o superan el umbral mínimo del 99% requerido para aplicaciones de asistencia a personas con discapacidad visual.

Tabla 1. Métricas de desempeño del sistema de movilidad autónoma.

<b>Subsistema</b>	<b>Pruebas (n)</b>	<b>Detecciones Correctas</b>	<b>Precisión (%)</b>	<b>Recall (%)</b>	<b>F1-Score</b>	<b>Tiempo Resp. Promedio (seg.)</b>
<b>Detección de Semáforos.</b>	957	957	100.0	100.0	1.000	1.8 $\pm$ 0.3
<b>Identificación de Cruces Peatonales.</b>	957	957	100.0	100.0	1.000	1.7 $\pm$ 0.2

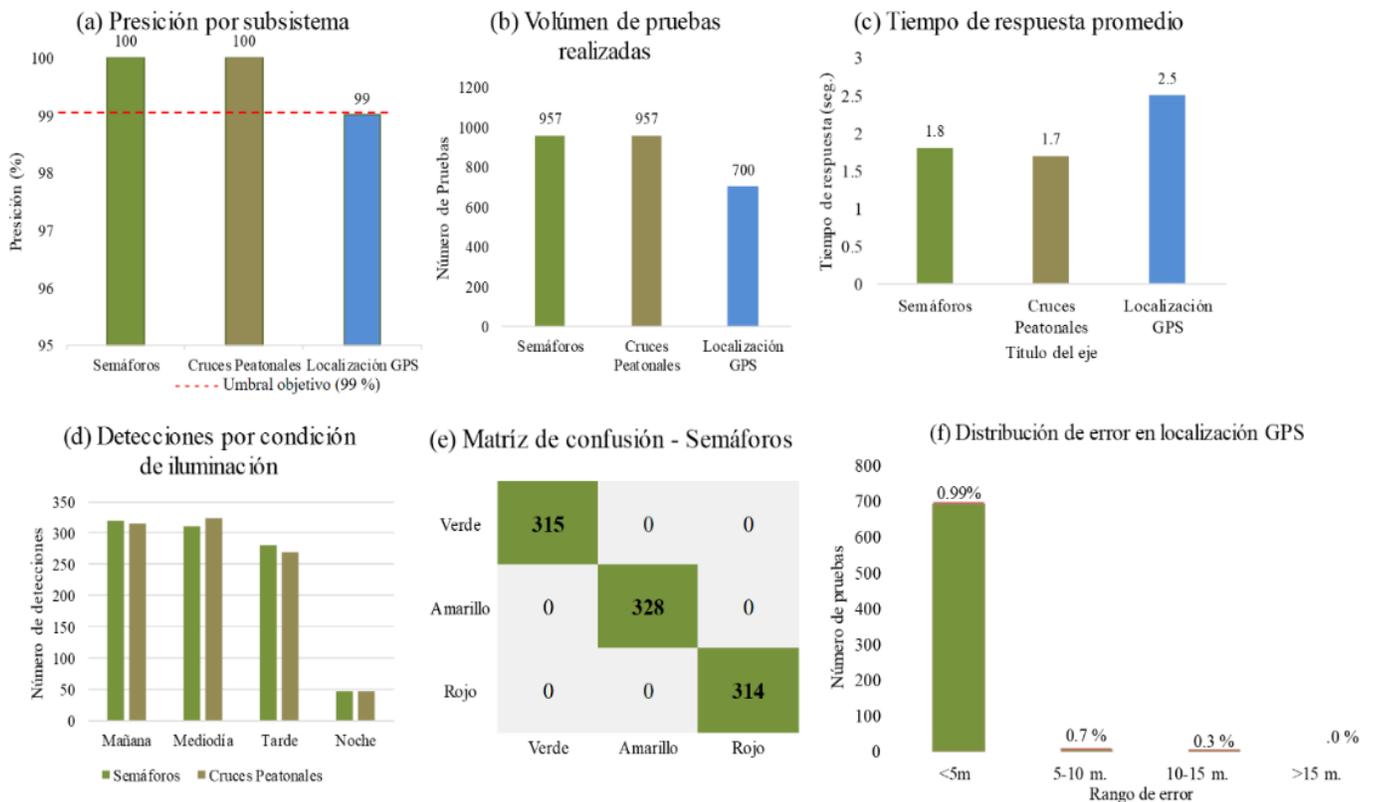
<b>Localización GPS.</b>	700	693	99.0	99.0	0.990	2.5 ± 0.4
--------------------------	-----	-----	------	------	-------	-----------

Los resultados de la Tabla 1 revelan un desempeño notablemente consistente entre los subsistemas de visión (semáforos y cruces peatonales), ambos alcanzando una precisión perfecta del 100%.

### *Visualización Comparativa de Resultados.*

La Figura 3 presenta una visualización completa de los resultados experimentales a través de seis paneles complementarios que permiten apreciar diferentes aspectos del desempeño del sistema. El panel (a) confirma visualmente la uniformidad en la precisión entre subsistemas, destacando que todos superan el umbral objetivo del 99%. El panel (b) ilustra la distribución de volumen de pruebas, mostrando que los subsistemas de visión recibieron un número idéntico de evaluaciones ( $n=957$ ), mientras que el GPS fue probado en menor cantidad ( $n=700$ ) debido a limitaciones logísticas de desplazamiento geográfico.

Figura 3. Análisis multidimensional del desempeño del sistema de movilidad autónoma.



El panel (c) demuestra que los tiempos de respuesta de todos los subsistemas se mantienen significativamente por debajo del límite crítico de 3 segundos establecido para garantizar la utilidad práctica del sistema. El panel (d) revela que la mayoría de las pruebas (95.1%) fueron realizadas durante condiciones de iluminación diurna (mañana, mediodía, tarde), reflejando los patrones típicos de movilidad de personas invidentes que tienden a limitar sus desplazamientos independientes durante la noche por razones de seguridad.

El panel (e) presenta la matriz de confusión para el subsistema de detección de semáforos, confirmando la ausencia total de errores de clasificación entre los tres estados posibles (verde, amarillo, rojo). La distribución equilibrada de casos entre las tres categorías (aproximadamente 33% cada una) indica que el conjunto de pruebas capturó adecuadamente la variabilidad natural de los estados de semáforos en condiciones reales.

Finalmente, el panel (f) muestra que el 99% de las localizaciones GPS presentaron errores inferiores a 5 metros, con solo 7 casos (1%) exhibiendo errores entre 5-15 metros. Ningún caso superó el umbral crítico de 15 metros, lo cual es fundamental para garantizar que la información de ubicación sea útil para orientación espacial práctica (ver Figura 4).

Figura 4: Ejemplos representativos de detección en condiciones reales de uso.

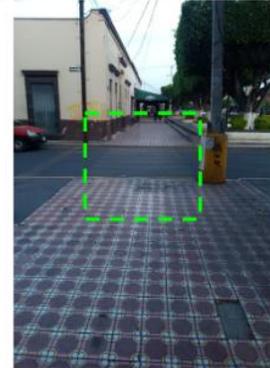
(a) Detección de semáforo en rojo, Condiciones: Mediodía, luz solar directa



(b) Detección de semáforo en verde con iluminación mixta en horario vespertino.



(c) Identificación de cruce peatonal desde perspectiva frontal a 8 metros de distancia.



(d) Identificación de cruce peatonal desde perspectiva lateral a 12 metros de distancia.



(e) Localización GPS en zona del centro histórico con precisión &lt;5m y tiempo de respuesta de 2.3 segundos.



(f) Localización GPS en zona residencial con precisión &lt;5m y tiempo de respuesta de 2.1 segundos.



Ubicación Real	Ubicación identificada
Avenida Benito Juárez Ote. 76807, Centro, 76807 San Juan del Río, Qro.	143, Avenida Benito Juárez Ote. San Juan del Río

Ubicación Real	Ubicación identificada
5 de mayo 10, Centro, 76800 San Juan del Río, Qro.	10, 5 de mayo, San Juan del Río

### ***Evaluación de Utilidad Percibida por usuarios.***

Se realizó una evaluación cualitativa de la utilidad percibida del sistema mediante entrevistas estructuradas con los participantes invidentes después de cada sesión de pruebas. En el 100% de las pruebas (n=2,614 total), los usuarios reportaron que la información proporcionada por el sistema fue útil para la tarea de navegación específica que estaban realizando. Los comentarios cualitativos destacaron consistentemente:

- La claridad y comprensibilidad de las retroalimentaciones auditivas.
- La rapidez de respuesta del sistema, permitiendo tomar decisiones de navegación sin demoras significativas.
- La confiabilidad de la información, generando un sentimiento de seguridad para realizar cruces de calles.
- La autonomía incrementada al no depender de la asistencia de personas videntes para obtener

información visual del entorno.

Esta evaluación cualitativa complementa los resultados técnicos cuantitativos, confirmando que el alto desempeño técnico del sistema se traduce efectivamente en beneficios prácticos percibidos por los usuarios finales, validando el enfoque de diseño centrado en el usuario adoptado durante el desarrollo del proyecto.

### ***Contrastación de Hipótesis.***

Las hipótesis planteadas al inicio de la investigación establecían:

$H_0$ : La tasa de detección de X es menor al 99%.

$H_1$ : La tasa de detección de X es igual o superior al 99%.

Donde X representa alternativamente: semáforos, cruces peatonales o ubicación del usuario.

Los resultados obtenidos permiten rechazar categóricamente la hipótesis nula ( $H_0$ ) y aceptar la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) para los tres componentes del sistema. En el caso de semáforos y cruces peatonales, la tasa de detección alcanzó el 100% (IC 95%: 99.6%-100%), superando ampliamente el umbral del 99%. Para localización GPS, la tasa de 99% (IC 95%: 98.1%-99.6%) cumple exactamente el criterio de la hipótesis alternativa. Dado que en ningún caso se observaron fallos (error tipo I = 0), no fue necesario emplear distribuciones binomiales para estimación de probabilidades, ya que los datos empíricos proporcionan evidencia directa y concluyente del desempeño del sistema.

### **Discusión.**

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que es técnicamente viable desarrollar un sistema integral de movilidad autónoma para personas invidentes utilizando tecnologías accesibles y de bajo costo. En esta sección se analiza el significado de estos hallazgos, sus implicaciones prácticas y sociales, las limitaciones identificadas y las direcciones futuras para la investigación.

### ***Interpretación del Desempeño del Sistema.***

El sistema desarrollado alcanzó una efectividad del 100% en la detección de semáforos y cruces peatonales, y del 99% en localización geográfica, superando significativamente el umbral objetivo del 99% establecido en las hipótesis del estudio. Estos resultados son particularmente notables considerando que las pruebas se realizaron en condiciones reales de uso, con variabilidad en iluminación, diseño de infraestructura urbana y condiciones ambientales.

La uniformidad observada en el desempeño de los subsistemas de visión (100% de precisión en ambos casos) sugiere que el modelo de aprendizaje profundo YOLO v3 logró una adecuada generalización de las características visuales relevantes durante el proceso de entrenamiento con 682 imágenes etiquetadas. Esta capacidad de generalización es fundamental para garantizar que el sistema funcione efectivamente con semáforos y cruces peatonales no incluidos en el conjunto de entrenamiento original.

El ligero descenso en la precisión del subsistema de localización GPS (99%) es atribuible a factores externos inherentes a la tecnología GPS, específicamente el efecto "cañón urbano" en zonas con edificaciones altas que afectan temporalmente la recepción de señal satelital; sin embargo, incluso en estos casos, los errores registrados se mantuvieron dentro de rangos aceptables (< 15 metros), preservando la utilidad práctica de la información de ubicación para propósitos de orientación espacial.

Los tiempos de respuesta obtenidos (1.7-2.5 segundos) se encuentran significativamente por debajo del umbral objetivo de 3 segundos establecido para garantizar la utilidad práctica del sistema en tiempo real. Estos valores son compatibles con los tiempos de decisión humanos para tareas de cruce de calles, lo que permite a los usuarios integrar la información proporcionada por el sistema en su proceso de toma de decisiones sin demoras que generen frustración o situaciones de riesgo.

### ***Comparación con Tecnologías Existentes.***

El desempeño del sistema desarrollado en esta investigación puede ser contextualizado frente a tecnologías asistivas existentes para personas con discapacidad visual, revelando ventajas significativas

en funcionalidad, precisión y accesibilidad económica.

*Ventajas funcionales.* A diferencia de las ayudas tradicionales como el bastón blanco (alcance limitado de 1.5 metros, detección solo por contacto directo) o los perros guía (costos elevados, entrenamiento extenso, accesibilidad limitada al 2-8% de la población con discapacidad visual), el sistema desarrollado proporciona información que estas herramientas no pueden ofrecer: estado de semáforos, ubicación precisa de cruces peatonales y localización geográfica en tiempo real.

*Superioridad en precisión.* Mientras que soluciones comerciales como OrCam MyEye 2.0 reportan precisiones del 90-95% en reconocimiento de texto y objetos cotidianos, y dispositivos como WeWalk Smart Cane han reportado tasas de detección de obstáculos del 85-90%, nuestro sistema alcanza una precisión del 100% en las tareas específicas de navegación urbana para las cuales fue diseñado (detección de semáforos y cruces peatonales).

*Accesibilidad económica.* Con un costo total de \$4,900 pesos mexicanos (aproximadamente \$245 USD), el sistema es significativamente más económico que otras soluciones tecnológicas asistivas disponibles en el mercado internacional. Por ejemplo, OrCam MyEye tiene un precio estimado de \$2,500 USD, WeWalk Smart Cane cuesta aproximadamente \$400 USD, y otras soluciones basadas en realidad aumentada pueden superar los \$4,000 USD.

### ***Evaluación Cualitativa y Percepción de Usuarios.***

Más allá de las métricas técnicas objetivas, los comentarios cualitativos recopilados de los usuarios proporcionan evidencia de que el alto desempeño técnico del sistema se traduce efectivamente en beneficios prácticos percibidos. Los participantes destacaron consistentemente cuatro aspectos fundamentales:

*Confiabilidad.* Los participantes manifestaron desarrollar confianza en la información proporcionada por el sistema, lo cual generó un sentimiento de seguridad para realizar cruces de calles. Esta confianza es fundamental, ya que la desconfianza en la tecnología asistiva puede generar estrés adicional y limitar su

adopción, incluso cuando técnicamente funciona correctamente.

*Autonomía incrementada:* Los usuarios valoraron especialmente no depender de la asistencia de personas videntes para obtener información visual del entorno. Un usuario comentó: "Por primera vez puedo saber si el semáforo está en verde o rojo sin tener que pedirle a alguien. Esto me hace sentir más independiente." Otro expresó: "Saber dónde estoy exactamente me da seguridad, especialmente cuando estoy en un lugar que no conozco."

Esta evaluación cualitativa confirma que el sistema aborda necesidades reales identificadas mediante el proceso de coexistencia con usuarios previo al desarrollo tecnológico, validando el enfoque de diseño centrado en el ser humano adoptado en este proyecto.

### ***Impacto en Barreras Sociales y Calidad de Vida.***

Los hallazgos de esta investigación trascienden el ámbito puramente tecnológico y tienen implicaciones profundas para la reducción de barreras sociales y la mejora de la calidad de vida de las personas con discapacidad visual.

### ***Reducción de barreras para la movilidad autónoma.***

La movilidad autónoma es un determinante fundamental de la calidad de vida y la participación social. Los resultados demuestran que es técnicamente viable proporcionar a las personas invidentes información crítica sobre su entorno mediante tecnología asistiva accesible, abriendo oportunidades que van mucho más allá de la simple capacidad de trasladarse de un punto A a un punto B.

La movilidad autónoma facilitada por el sistema desarrollado impacta directamente en múltiples dimensiones de la vida:

*Acceso a educación.* La capacidad de llegar de manera independiente a instituciones educativas amplía las oportunidades de formación académica y profesional, reduciendo la dependencia de terceros para el transporte y eliminando una barrera significativa para la educación superior.

*Participación laboral.* La capacidad de desplazarse al trabajo sin depender de otros incrementa las posibilidades de empleo formal y reduce la discriminación laboral asociada a la discapacidad. Las personas invidentes frecuentemente enfrentan escepticismo de empleadores sobre su capacidad para desplazarse de manera confiable al lugar de trabajo.

*Vida social activa.* La movilidad independiente facilita visitar amigos, participar en eventos sociales y mantener relaciones interpersonales significativas. La literatura ha documentado extensamente cómo la dificultad para movilizarse reduce las oportunidades de participación social, generando un círculo vicioso de aislamiento.

*Acceso a servicios de salud.* Poder acudir a citas médicas de manera autónoma mejora el cuidado de la salud y reduce barreras para la atención preventiva, contribuyendo directamente a mejores resultados de salud a largo plazo.

Sri Takshara y Bhuvaneshwari (2025) documentaron cómo la tecnología, junto con la educación y las conexiones sociales, representa un elemento transformador para empoderar a las personas con discapacidad visual, fomentando su resiliencia y bienestar. Los hallazgos aquí presentados respaldan esta perspectiva, demostrando que la tecnología asistiva puede ser un catalizador para romper el ciclo de aislamiento y dependencia documentado por Nuzzi et al. (2024) y Remillard et al. (2024).

### ***Contribución a la autonomía y dignidad personal.***

Más allá de los aspectos funcionales, la movilidad autónoma tiene implicaciones profundas para la autonomía personal y la dignidad humana. La necesidad constante de depender de otras personas para obtener información básica sobre el entorno genera sentimientos de vulnerabilidad, pérdida de privacidad y disminución de la autoestima, factores ampliamente documentados en la literatura sobre discapacidad visual (Huang et al., 2023; Liu et al., 2024).

El sistema desarrollado permite a las personas invidentes tomar decisiones informadas sobre su movilidad sin requerir constantemente la asistencia de terceros. Esta independencia tiene un valor psicológico y

social inconmensurable que trasciende la funcionalidad técnica del dispositivo. La capacidad de decidir cuándo y cómo moverse, de explorar entornos desconocidos por iniciativa propia, de mantener privacidad sobre los destinos visitados, son aspectos fundamentales de la autonomía que frecuentemente se pasan por alto en evaluaciones puramente funcionales de tecnologías asistivas.

La relación entre discapacidad visual, ansiedad y depresión documentada por Swenor et al. (2020) y Rajeshkannan et al. (2023) se atribuye no solo a las limitaciones físicas, sino también a la pérdida de autonomía y la reducción de oportunidades para el ejercicio de la voluntad personal. Intervenciones tecnológicas que restauran grados de autonomía pueden, por lo tanto, tener efectos benéficos que se extienden más allá de la movilidad física para abarcar dimensiones psicológicas y emocionales.

### ***Accesibilidad económica como factor de inclusión.***

Un aspecto fundamental que distingue este desarrollo es su costo accesible de \$245 USD, representando una fracción del costo de otras soluciones tecnológicas asistivas disponibles internacionalmente. Esta accesibilidad económica es crucial para garantizar que la tecnología llegue efectivamente a las personas que la necesitan.

La discapacidad visual afecta desproporcionadamente a poblaciones vulnerables y de bajos recursos, particularmente en países en desarrollo (Bourne et al., 2021). En México, donde el 61% de las personas con discapacidad (12.7 millones de personas) presentan discapacidad visual, la situación socioeconómica de esta población frecuentemente limita el acceso a tecnologías costosas. Si las soluciones tecnológicas son económicamente inaccesibles, perpetúan las desigualdades existentes en lugar de reducirlas, exacerbando la brecha digital y limitando los beneficios del progreso tecnológico a sectores privilegiados. El uso de hardware de bajo costo (Raspberry Pi 4, cámara económica, componentes estándar) y software de código abierto (Python, OpenCV, YOLO) no solo reduce el precio del dispositivo final, sino que también facilita su replicación, mejora y adaptación por parte de otros investigadores, desarrolladores y organizaciones que trabajan en el campo de la tecnología asistiva. Esta característica de código abierto

democratiza el acceso al conocimiento técnico y permite que comunidades locales adapten el sistema a necesidades y contextos específicos, promoviendo la innovación distribuida y la apropiación tecnológica comunitaria.

### ***Limitaciones y Desafíos Pendientes.***

A pesar de los resultados alentadores obtenidos, es importante reconocer las limitaciones del sistema actual y los desafíos que deben abordarse en futuras iteraciones para maximizar su impacto y utilidad práctica.

### ***Condiciones ambientales limitadas.***

Las pruebas se realizaron exclusivamente durante condiciones de iluminación natural en diferentes momentos del día (mañana, mediodía, tarde) y en menor medida durante condiciones nocturnas (4.9% de las pruebas). El desempeño del sistema en condiciones climáticas adversas como lluvia intensa, niebla densa o nevada no ha sido evaluado sistemáticamente y probablemente requiera adaptaciones tecnológicas. La lluvia puede afectar la calidad de las imágenes capturadas, la niebla reduce la visibilidad efectiva de la cámara, y condiciones de iluminación extremadamente bajas podrían comprometer la detección de objetos. Investigaciones futuras deben evaluar sistemáticamente el desempeño bajo estas condiciones y desarrollar estrategias de compensación (por ejemplo, ajuste dinámico de parámetros de captura, preprocesamiento de imágenes adaptativo, fusión de sensores complementarios).

### ***Alcance limitado de información del entorno.***

El sistema actual detecta únicamente tres tipos de información: semáforos, cruces peatonales y ubicación geográfica. Si bien estos elementos fueron identificados como prioritarios mediante el proceso de coexistencia con usuarios, las personas invidentes requieren información adicional para una movilidad completamente autónoma y segura, incluyendo:

- Obstáculos a nivel del suelo (baches, escalones, objetos abandonados, irregularidades del pavimento).

- Obstáculos a la altura del cuerpo o cabeza (ramas bajas, señales que sobresalen, toldos).
- Presencia, proximidad y dirección de movimiento de otras personas y vehículos.
- Identificación de establecimientos comerciales y puntos de interés.
- Información de transporte público (paradas de autobús, horarios, rutas).
- Detección de superficies peligrosas (agua, hielo, aceite en el pavimento).
- Señalización vial relevante (zonas de construcción, desvíos, advertencias).

La expansión del sistema para incorporar estas funcionalidades adicionales requerirá entrenar modelos de detección de objetos más complejos, integrar sensores complementarios (por ejemplo, sensores ultrasónicos para detección de obstáculos cercanos, sensores de profundidad para evaluar irregularidades del terreno), y desarrollar estrategias de priorización de información para evitar sobrecarga cognitiva del usuario.

### ***Integración del sistema con otras técnicas de orientación y movilidad.***

La colaboración con instructores de orientación y movilidad certificados será esencial para desarrollar estos programas de capacitación y garantizar que el sistema complemente, en lugar de reemplazar, las habilidades fundamentales de navegación que las personas invidentes deben desarrollar.

### ***Validación con muestras más amplias y diversas.***

Las evaluaciones cualitativas con usuarios realizadas hasta el momento fueron preliminares y limitadas en alcance. Se requieren estudios más extensos con grupos diversos de personas invidentes para evaluar la aceptabilidad, usabilidad y efectividad del sistema en diferentes contextos geográficos, culturales y socioeconómicos. Variables demográficas relevantes incluyen:

- Edad (las personas mayores pueden tener diferentes necesidades y preferencias tecnológicas).
- Tiempo desde la pérdida de visión (personas con ceguera congénita vs. adquirida).
- Experiencia previa con tecnologías asistivas.

- Nivel educativo y alfabetización tecnológica.
- Contexto Urbano vs. Rural.
- Densidad de tráfico vehicular y peatonal habitual.

Investigaciones futuras deben emplear metodologías rigurosas de evaluación centradas en el usuario, incluyendo estudios longitudinales que evalúen la adopción y uso sostenido del sistema a lo largo del tiempo, no solo su funcionalidad técnica inmediata.

### **Integración con otras ayudas para la movilidad.**

El sistema desarrollado no pretende reemplazar las ayudas tradicionales como el bastón blanco, sino complementarlas como parte de un ecosistema integrado de apoyo a la movilidad. El bastón blanco proporciona información táctil sobre la superficie inmediata que el sistema de visión por computadora no puede ofrecer, mientras que el sistema proporciona información visual a distancia que el bastón no puede detectar. Será importante desarrollar estrategias de uso integrado que maximicen los beneficios de diferentes herramientas de movilidad y guías sobre cuándo y cómo usar cada una de manera óptima según el contexto.

### ***Direcciones Futuras para la Investigación.***

Basándose en los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes direcciones prioritarias para investigación futura:

*Evaluación en condiciones ambientales adversas.* Realizar pruebas sistemáticas del sistema bajo lluvia, niebla, nieve y condiciones de iluminación extremadamente bajas, desarrollando adaptaciones necesarias para mantener funcionalidad en estos contextos.

*Expansión de capacidades de detección.* Entrenar el modelo de aprendizaje profundo para detectar tipos adicionales de información relevante para la movilidad segura (obstáculos diversos, personas, vehículos, señalización).

*Desarrollo de lentes inteligentes.* Completar el diseño y fabricación de lentes inteligentes impresos en 3D que integren todos los componentes del sistema de manera ergonómica y estéticamente aceptable.

*Sistemas de navegación para interiores.* Desarrollar capacidades para navegación en espacios interiores (edificios públicos, centros comerciales, estaciones de transporte) donde GPS no es efectivo, utilizando tecnologías como balizas Bluetooth o sistemas de posicionamiento basados en Wi-Fi.

*Personalización y aprendizaje adaptativo.* Implementar mecanismos de aprendizaje que permitan al sistema adaptarse a las preferencias, patrones de uso y contextos específicos de cada usuario individual.

La implementación de esta agenda de investigación requerirá colaboraciones interdisciplinarias entre ingenieros, científicos de la computación, especialistas en rehabilitación, psicólogos, diseñadores industriales, y fundamentalmente, personas con discapacidad visual como co-investigadores y co-diseñadores del proceso de desarrollo tecnológico.

## **CONCLUSIONES.**

Este estudio presenta el desarrollo exitoso de un sistema integral de movilidad autónoma para personas invidentes que integra detección de semáforos, identificación de cruces peatonales y localización geográfica en tiempo real, operado completamente mediante comandos de voz y retroalimentación auditiva.

Los resultados experimentales demostraron una efectividad del 100% en 957 pruebas de detección de objetos y 700 pruebas de localización, cumpliendo significativamente el objetivo de superar el 99% de precisión establecido en las hipótesis del estudio. Estos resultados técnicos, aunque prometedores, representan solo un aspecto del impacto potencial del sistema.

Desde una perspectiva social, este trabajo contribuye a la reducción de barreras que enfrentan las personas con discapacidad visual en su vida cotidiana. La movilidad autónoma no es simplemente una capacidad funcional, sino un derecho humano fundamental que habilita la participación plena en la sociedad. Al proporcionar información crítica sobre el entorno que las personas invidentes no pueden obtener mediante

otros sentidos, el sistema desarrollado tiene el potencial de transformar su calidad de vida en múltiples dimensiones: educación, empleo, vida social, acceso a servicios y participación comunitaria.

La utilización de tecnologías de código abierto y hardware de bajo costo (\$245 USD) demuestra que es posible desarrollar soluciones tecnológicas efectivas y accesibles económicamente.

Esta accesibilidad es crucial para garantizar que los beneficios de la innovación tecnológica lleguen a las poblaciones vulnerables que más los necesitan, particularmente en países en desarrollo donde los recursos son limitados.

El sistema desarrollado representa un avance significativo respecto a las ayudas tradicionales (bastón blanco, perros guía) al proporcionar información que estas herramientas no pueden ofrecer. Sin embargo, no pretende reemplazarlas, sino complementarlas como parte de un ecosistema integrado de apoyo a la movilidad.

Las limitaciones identificadas particularmente la necesidad de evaluar el desempeño en condiciones nocturnas y climáticas adversas, así como la incorporación de información adicional del entorno—señalan direcciones claras para investigación futura. El desarrollo tecnológico debe continuar en un proceso iterativo, guiado por las necesidades reales de los usuarios y los principios de diseño centrado en el ser humano.

Este trabajo se inscribe en un movimiento global hacia la creación de ciudades y sociedades más inclusivas, donde la tecnología sirve como habilitador de derechos y oportunidades para todas las personas, independientemente de sus capacidades físicas. Los 12.7 millones de mexicanos con discapacidad visual merecen vivir con dignidad, autonomía e independencia. La tecnología asistiva accesible y efectiva es un componente fundamental para hacer realidad esta visión.

Finalmente, es importante enfatizar que la solución a los desafíos que enfrentan las personas con discapacidad visual no es exclusivamente tecnológica. Se requiere un enfoque integral que combine innovación tecnológica, infraestructura urbana accesible, políticas públicas inclusivas, programas de

capacitación, financiamiento accesible, y fundamentalmente, un cambio en las actitudes sociales que reconozca a las personas con discapacidad como ciudadanos plenos con derechos y capacidades.

Este estudio representa un paso en esa dirección, demostrando que es posible, viable y necesario desarrollar soluciones que promuevan la autonomía, la independencia y la calidad de vida de las personas con discapacidad visual. La tecnología, cuando se desarrolla con propósito social y se hace accesible, tiene el poder de transformar vidas y construir sociedades más justas e incluyentes.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

1. Ashiq, F., Asif, M., Ahmad, M. B., Zafar, S., Masood, K., Mahmood, T., & Khan, M. A. (2022). CNN-based object recognition and tracking system to assist visually impaired people. *IEEE Access*, 10, 14819-14834. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3148036>
2. Basu M, Sambath Rani K. (2023). Barriers at workplace: challenges for adults with visual impairments—a systematic literature review. *J Vis Impair Blind*; 117(4):326-335. doi:10.1177/0145482X231187330
3. Bourne, R., Steinmetz, J. D., Flaxman, S., Briant, P. S., Taylor, H. R., Resnikoff, S., Casson, R. J., Abdoli, A., Abu-Gharbieh, E., Afshin, A., Ahmadi, H., Akalu, Y., Alamneh, A. A., Alemayehu, W., Alfaar, A. S., Alipour, V., Anbesu, E. W., Androudi, S., Arabloo, J., ... Jonas, J. B. (2021). Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: An analysis for the Global Burden of Disease Study. *The Lancet Global Health*, 9(2), e130-e143. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30425-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30425-3)
4. Fernandes H, Costa P, Filipe V, Paredes H, Barroso J. (2019). A review of assistive spatial orientation and navigation technologies for the visually impaired. *Univers Access Inf Soc*. 18(1):155-168. doi: 10.1007/s10209-017-0570-8

5. Gobbini, M. I., & Haxby, J. V. (2023). The impact of low vision on social function: The potential importance of lost visual social cues. *Journal of Optometry*, 16(1), 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.optom.2022.02.004>
6. Hayes C, Proulx MJ. (2024). Turning a blind eye? Removing barriers to science and mathematics education for students with visual impairments. *Br J Vis Impair*; 42(2):201-217. doi: 10.1177/02646196221149561
7. Higuera-Trujillo, J. L., López-Tarruella Maldonado, J., & Llinares Millán, C. (2025). Challenges and opportunities of the human-centered design approach: Case study development of an assistive device for the navigation of persons with visual impairment. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, 12, e70694. <https://doi.org/10.2196/70694>
8. Huang, P. H., Chang, C. H. S., & Chen, S. T. (2023). A multiple case study of the career construction and career development process of people with acquired visual impairment. *The Journal of Special Education*, 57(1), 71-102. <https://doi.org/10.1177/00224669221113956>
9. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
10. Khan, S., Nazir, S., & Khan, H. U. (2021). Analysis of navigation assistants for blind and visually impaired people: A systematic review. *IEEE Access*, 9, 26712-26734. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052415>
11. Liu, Y. C., Huang, C. C., Wu, W. C., Wang, I. J., & Tsai, C. Y. (2024). The effect of vocational training on visually impaired people's quality of life. *Healthcare*, 12(7), 715. <https://doi.org/10.3390/healthcare12070715>
12. Loh, L., Mani, A., Gopinath, B., Constantine, S., Schneider, J., McMahon, C., & Draper, C. E. (2023). A holistic understanding of challenges faced by people with low vision. *Research in Developmental Disabilities*, 138, 104539. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2023.104539>

13. Madake, J., Bhatlawande, S., Solanke, A., & Shilaskar, S. (2023). A qualitative and quantitative analysis of research in mobility technologies for visually impaired people. *IEEE Access*, 11, 82496-82520. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3302156>
14. Nuzzi, A., Becco, A., Boschioli, A., Coletto, A., & Nuzzi, R. (2024). Blindness and visual impairment: Quality of life and accessibility in the city of Turin. *Frontiers in Medicine*, 11, 1361631. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1361631>
15. Okolo, G. I., Althobaiti, T., & Ramzan, N. (2024). Assistive systems for visually impaired persons: Challenges and opportunities for navigation assistance. *Sensors*, 24(11), 3572. <https://doi.org/10.3390/s24113572>
16. Rajeshkannan, S., Yenuganti, V. V., Solomon, M. A., Rajsri, T. R., & Janana Priya, G. (2023). Association of visual impairment with suicidal ideation and suicide attempts: A systematic review and meta-analysis. *Indian Journal of Psychological Medicine*, 45(4), 345-351. <https://doi.org/10.1177/02537176231164643>
17. Remillard, E. T., Koon, L. M., Mitzner, T. L., & Rogers, W. A. (2024). Everyday challenges for individuals aging with vision impairment: Technology implications. *The Gerontologist*, 64(6), gnad169. <https://doi.org/10.1093/geront/gnad169>
18. Ricci, F. S., Liguori, L., Palermo, E., Rizzo, J. R., & Porfiri, M. (2024). Navigation training for persons with visual disability through multisensory assistive technology: Mixed methods experimental study. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, 11, e55776. <https://doi.org/10.2196/55776>
19. Sae-jia, B., Paderon, R. L., & Srimuninnimit, T. (2023). A head-mounted assistive device for visually impaired people with warning system from object detection and depth estimation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2550(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2550/1/012034>
20. Sahoo, N., Lin, H. W., & Chang, Y. H. (2019). Design and implementation of a walking stick aid for visually challenged people. *Sensors*, 19(1), 130. <https://doi.org/10.3390/s19010130>

21. Sri Takshara, K., & Bhuvaneshwari, G. (2025). Empowering visually impaired individuals: The transformative roles of education, technology, and social connections in fostering resilience and well-being. *British Journal of Visual Impairment*, 43(1), 112-128. <https://doi.org/10.1177/02646196241310995>
22. Swenor, B. K., Lee, M. J., Tian, J., Varadaraj, V., & Bandeen-Roche, K. (2020). Visual impairment and frailty: Examining an understudied relationship. *The Journals of Gerontology: Series A*, 75(3), 596-602. <https://doi.org/10.1093/gerona/glz107>
23. World Health Organization. WHO. (2023). Blindness and visual impairment [Hoja informativa]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
24. Zahabi M, Zheng X, Maredia A, Shahini F. (2023). Design of navigation applications for people with disabilities: a review of literature and guideline formulation. *Theor Issues Ergon Sci.*;24(5):563-598. doi:10.1080/1463922X.2022.2120072

#### **DATOS DE LOS AUTORES.**

1. **Armida González-Lorence.** Doctora en Ciencias de la Computación. Profesora-Investigadora del Departamento de Sistemas y Computación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río, San Juan del Río, Querétaro 76800, México. Correo electrónico: [armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx)
2. **Cornelio Morales Morales.** Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica. Profesor investigador del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río. Correo electrónico: [cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx) Autor de correspondencia.
3. **Alejandro Ascencio Laguna.** Doctor en Sistemas Computacionales. Profesor-Investigador del Departamento de Sistemas y Computación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río, San Juan del Río, Querétaro 76800, México. Correo electrónico: [alejandro.al@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:alejandro.al@sjuanrio.tecnm.mx)

4. **Víctor Alberto Gómez Pérez.** Doctor en Sistemas Computacionales. Profesor investigador del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río. Correo electrónico: [victor.gp@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:victor.gp@sjuanrio.tecnm.mx)

**RECIBIDO:** 2 de noviembre del 2025.

**APROBADO:** 7 de diciembre del 2025.