



**Universidad**  
Popular del Cesar

**PROTOCOLO DEL ANTEPROYECTO DE GRADO**



**Universidad**  
Popular del Cesar

---

**DESARROLLO DE UN SISTEMA INTELIGENTE PARA APOYAR A  
PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL EN LA DETECCIÓN DE  
OBSTÁCULOS EN MOVILIDAD VIAL**

---

**AUTORES:**

**ANDRES FELIPE TAPASCO GARZON, JUAN CARLOS ARAUJO ARAUJO**

**Noviembre 07 de 2025**

[www.unicesar.edu.co](http://www.unicesar.edu.co)  
Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)  
Balneario Hurtado, Vía a Patillal  
Valledupar – Cesar, Colombia

## TABLA DE CONTENIDO

### CONTENIDO

1.1 TITULO DEL PROYECTO DE GRADO .....	5
1.2 DIRECCIÓN DE EJECUCIÓN .....	5
1.3 LAPSO DE EJECUCIÓN .....	5
1.4 ORGANISMO O INSTITUCIÓN RESPONSABLE DEL PROYECTO .....	6
1.5 INFORMACIÓN DE CONTACTO DE LOS ESTUDIANTES .....	6
1.6 LÍNEA, SUBLÍNEA Y GRUPO DE INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO .....	6
2.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
2.1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	11
2.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	11
2.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	13
2.2.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA .....	14
2.2.3 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	14
2.3. OBJETIVOS.....	15
2.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
2.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
2.4 BASES TEÓRICAS.....	15
2.4.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE AYUDAS PARA LA MOVILIDAD DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL.....	15
Tabla 1: Evolución de Ayudas para la Movilidad de Personas con Discapacidad Visual.....	20
2.4.1.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS: AVANCES TECNOLÓGICOS EN LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS .....	20
2.4.1.2 ANTECEDENTES LEGALES.....	27
2.4.2 MARCO TEÓRICO.....	32
2.4.2.1 DISCAPACIDAD VISUAL.....	32
2.4.2.2 EFECTOS.....	32
2.4.2.3 MOVILIDAD INDEPENDIENTE.....	33

2.4.2.4	TECNOLOGÍAS ASISTIVAS PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL.....	33
2.4.2.5	INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y VISIÓN COMPUTACIONAL EN MOVILIDAD ASISTIDA.....	35
2.4.2.6	SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INTELIGENTE PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL.....	36
2.4.3	MARCO CONCEPTUAL.....	40
2.4.3.1	DISCAPACIDAD VISUAL:.....	40
2.4.3.2	MOVILIDAD INDEPENDIENTE:.....	40
2.4.3.3	TECNOLOGÍAS ASISTIVAS:.....	41
2.4.3.4	INTELIGENCIA ARTIFICIAL:.....	41
2.4.3.5	VISIÓN COMPUTACIONAL.....	42
2.4.3.6	SISTEMA DE NAVEGACIÓN INTELIGENTE.....	42
2.5	MARCO METODOLÓGICO.....	43
2.5.1	ENFOQUE DEL PROYECTO.....	43
2.5.2	DESARROLLO DEL APLICATIVO MÓVIL PARA LA ASISTENCIA EN LA MOVILIDAD.....	43
2.5.2.1	TECNOLOGÍAS A UTILIZAR.....	45
2.5.2.2	METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....	47
2.5.3	MÉTODOS ESPECÍFICOS.....	48
2.5.4	TÉCNICAS Y INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	49
2.5.4.1	ENCUESTAS CUANTITATIVAS.....	50
2.5.4.2	ENTREVISTAS CUALITATIVAS.....	51
2.5.4.3	OBSERVACIÓN DIRECTA.....	52
2.5.5	FUENTES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS.....	52
2.5.5.1	FUENTES PRIMARIAS.....	52
2.5.5.2	FUENTES SECUNDARIAS.....	53
2.5.6	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	53
2.5.6.1	POBLACIÓN OBJETIVO.....	53
2.5.6.2	TIPO DE MUESTREO.....	54
2.5.6.3	TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	54
2.5.6.4	CRITERIOS DE INCLUSIÓN.....	54
2.5.6.5	CRITERIOS DE EXCLUSIÓN.....	56
2.5.7	VARIABLES A MEDIR.....	57

2.5.8 CONSIDERACIONES ÉTICAS, LEGALES Y DE PROTECCIÓN DE DATOS EN LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO .....	57
3.0 DESARROLLO CIENTÍFICO TECNOLÓGICO .....	63
Tecnologías aplicadas .....	63
3.1 DESARROLLO DE LAS FASES DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	65
Fase I. Planificación e investigación preliminar .....	65
Fase II. Diseño e integración de componentes .....	66
Fase III. Desarrollo e implementación .....	67
Fase IV. Pruebas y validación.....	67
3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	68
Evaluación de desempeño técnico.....	69
Evaluación de la experiencia del usuario .....	69
Discusión .....	70
3.3 CONCLUSIONES.....	71
3.4 RECOMENDACIONES .....	72
3.5 BIBLIOGRAFÍA .....	74

## **1.1 TITULO DEL PROYECTO DE GRADO**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA INTELIGENTE PARA APOYAR A PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL EN LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS EN MOVILIDAD VIAL**

## **1.2 DIRECCIÓN DE EJECUCIÓN**

Calle 6s Carrera 5 – 74, Barrio Betania, Celular 3133884460, pipetapasco21@gmail.com

## **1.3 LAPSO DE EJECUCIÓN**

El proyecto de grado titulado "**DESARROLLO DE UN SISTEMA INTELIGENTE PARA APOYAR A PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL EN LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS EN MOVILIDAD VIAL**" se estima que tendrá un lapso de ejecución total de seis (6) meses, distribuidos de la siguiente manera:

1. I. Planificación e Investigación Preliminar (4 semanas Mes 1)
  - a. - Definición final de objetivos y alcance
  - b. - Revisión y profundización bibliográfica
2. II. Recolección y Análisis de Datos / Diseño (8 semanas Mes 2 - 3)
  - a. - Diseño de instrumentos de recolección
  - b. - Ejecución de encuestas/entrevistas/experimentos
  - c. - Organización y pre-análisis de la información
3. III. Desarrollo / Implementación de la Propuesta (12 semanas Mes 4 - 6)

- a. - Desarrollo de la solución/prototipo
  - b. - Pruebas y ajustes (si aplica)
  - c. - Análisis profundo de resultados
4. IV. Redacción y Presentación del Informe Final 8 semanas Mes 5 - 6
- a. - Redacción de capítulos del documento
  - b. - Revisión, edición y correcciones finales
  - c. - Preparación para la sustentación

#### 1.4 ORGANISMO O INSTITUCIÓN RESPONSABLE DEL PROYECTO

Organismo o institución: Universidad popular del cesar

Dirección: Diagonal 21 N° 29-56, Barrio Sabanas del Valle, Valledupar, Cesar.

#### 1.5 INFORMACIÓN DE CONTACTO DE LOS ESTUDIANTES

Nombre	Apellido	Cédula	Teléfono	Correo
Andres Felipe	Tapasco Garzon	1005890586	313388446 0	atapasco@unicesar.edu.co
Juan Carlos	Araujo Araujo	100299619 9	313625681 9	jcarlosaraujo@unicesar.edu .co

#### 1.6 LÍNEA, SUBLÍNEA Y GRUPO DE INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO

Línea de investigación: Transformación digital

Sublinea de investigación: Visión Artificial

## **2.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

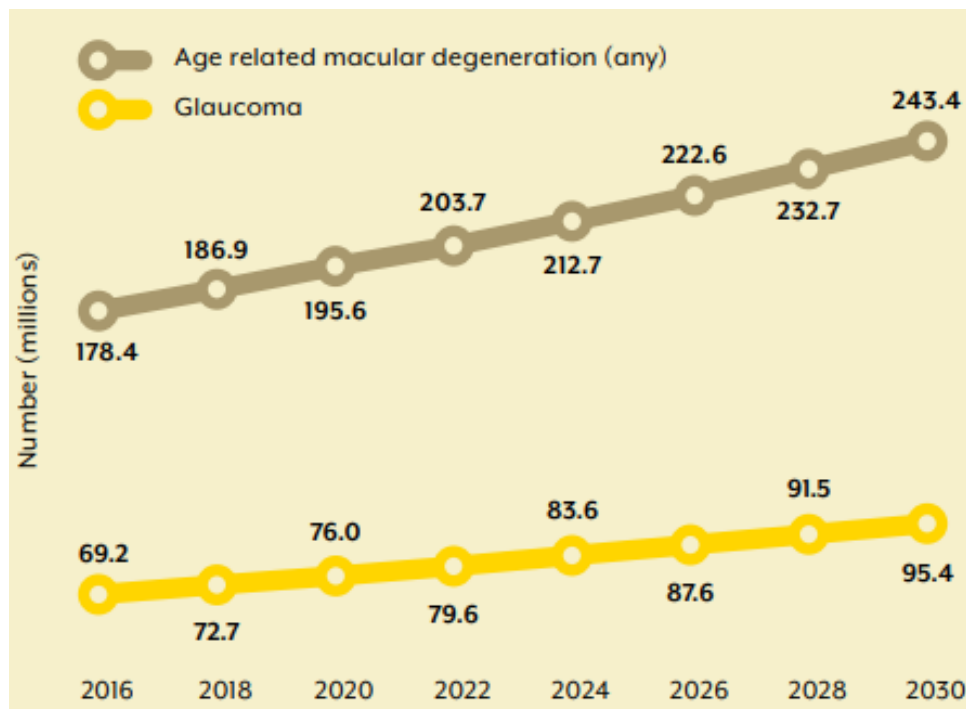
En Colombia, las personas con discapacidad visual enfrentan múltiples barreras para movilizarse de forma segura y autónoma por los espacios urbanos. Esta situación representa una grave limitación para su desarrollo personal, social y profesional, ya que restringe su participación activa en actividades cotidianas y acentúa su dependencia de terceros. Las ciudades del país no cuentan con una infraestructura adecuada para garantizar la inclusión de esta población, y las deficiencias en la planificación urbana generan obstáculos como andenes irregulares o estrechos, huecos sin señalizar, postes mal ubicados, escaleras sin demarcación, y otros elementos peligrosos que dificultan su tránsito seguro [23].

Esta falta de accesibilidad, sumada a la escasa conciencia social y a la ineficiencia de las políticas públicas de inclusión, ha generado un entorno hostil que agrava su situación de vulnerabilidad. La situación descrita tiene raíces estructurales y profundas. A nivel mundial, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que “más de 2.200 millones de personas presentan alguna deficiencia visual, muchas de las cuales padecen efectos colaterales como desempleo, aislamiento social, accidentes frecuentes, ansiedad y depresión” [5].

Entre las principales causas de estas afecciones se encuentran enfermedades como la degeneración macular relacionada con la edad y el glaucoma, cuya incidencia se incrementa de

forma sostenida a nivel global. Se estima que, para el año 2030, más de 243 millones de personas padecerán degeneración macular, mientras que los casos de glaucoma alcanzarán los 95 millones (Figura 1).

Fig. 1. Informe mundial de la visión.

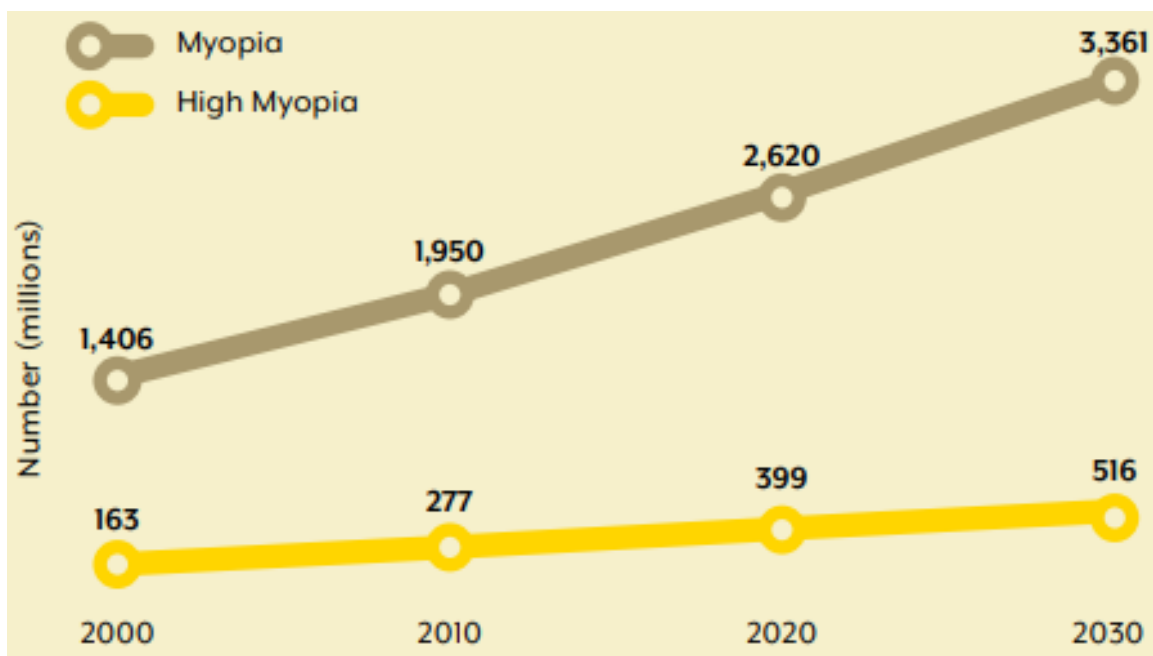


Fuente: [21].

A esto se suma un preocupante aumento de la miopía y la alta miopía, que son factores de riesgo directos para discapacidades visuales severas. Se proyecta que en 2030 más de 3.361 millones de personas en el mundo tendrán miopía, y más de 516 millones presentarán alta miopía (Figura 2). Estas cifras evidencian un problema de salud pública global que, si no se enfrenta con

soluciones tecnológicas apropiadas, continuará generando una creciente demanda de apoyos visuales y asistivos.

Fig. 2. Informe mundial de la visión.



Fuente: [21].

Frente a esta realidad, distintas tecnologías asistivas han sido desarrolladas con el propósito de mejorar la autonomía de personas con discapacidad visual. Entre ellas se encuentran bastones electrónicos, gafas inteligentes, aplicaciones móviles con reconocimiento de objetos, sensores de proximidad, entre otras [34, 10]. No obstante, muchas de estas soluciones presentan limitaciones

significativas: no están adaptadas a las características del entorno urbano colombiano —con su infraestructura irregular y falta de señalización adecuada—, son costosas o requieren conocimientos técnicos que dificultan su adopción por parte de los usuarios finales.

A pesar de los avances en inteligencia artificial, aprendizaje profundo y visión computacional, persiste un vacío importante en la implementación de sistemas que, además de ser eficaces, sean accesibles y contextualizados a nivel local. La ausencia de un sistema inteligente que permita detectar obstáculos en tiempo real y ofrezca retroalimentación útil y comprensible para personas con discapacidad visual, representa una deuda pendiente con esta población. Si esta situación persiste, es previsible un agravamiento de los efectos negativos ya mencionados: mayor riesgo de accidentes, pérdida de oportunidades educativas y laborales, incremento del aislamiento social, y un retroceso en los objetivos de inclusión y equidad.

Ante este panorama, resulta urgente el diseño e implementación de un sistema inteligente de bajo costo, basado en tecnologías de inteligencia artificial y sensores, que permita a las personas con discapacidad visual detectar obstáculos de forma eficiente y segura durante su movilidad vial. Esta solución no solo debe considerar la robustez técnica, sino también su adecuación a los entornos reales donde se desenvolverán los usuarios, su facilidad de uso y su sostenibilidad económica. De esta manera, el proyecto busca contribuir a reducir la dependencia de terceros, mejorar la calidad de vida de esta población y fortalecer el ejercicio pleno de sus derechos en entornos urbanos.

### **2.1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

A partir del contexto descrito, surge la siguiente pregunta orientadora; ¿Cómo desarrollar un sistema inteligente, accesible y de bajo costo que permita detectar en tiempo real los obstáculos presentes en la movilidad vial de personas con discapacidad visual en entornos urbanos colombianos, con el fin de aumentar su autonomía y seguridad?

De esta pregunta principal se derivan las siguientes subpreguntas, que guían el desarrollo del proyecto:

1. ¿Cuáles son los principales obstáculos físicos y ambientales que enfrentan las personas con discapacidad visual durante su desplazamiento en espacios urbanos?
2. ¿Qué tecnologías existentes (sensores, algoritmos de visión computacional e inteligencia artificial) pueden integrarse eficazmente para detectar estos obstáculos en tiempo real?
3. ¿Cómo puede diseñarse un sistema inteligente que sea económicamente viable, de fácil uso y adaptado a las condiciones del entorno urbano colombiano?
4. ¿Qué tan eficaz es el sistema propuesto en escenarios reales de movilidad urbana, y qué mejoras pueden realizarse a partir de pruebas con usuarios reales?

### **2.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

La presente investigación se realiza ante la urgente necesidad de brindar soluciones tecnológicas que mejoren la movilidad de las personas con discapacidad visual en contextos urbanos colombianos, donde las condiciones de infraestructura y accesibilidad son profundamente

deficientes. Actualmente, quienes presentan discapacidad visual enfrentan múltiples riesgos y obstáculos al desplazarse por espacios públicos, lo que limita su autonomía, seguridad e inclusión social. Esta situación se ve agravada por la carencia de sistemas tecnológicos adaptados al entorno local que sean accesibles, eficaces y sostenibles [23, 5].

La investigación tiene como propósito desarrollar un sistema inteligente, basado en inteligencia artificial y visión computacional, que permita detectar en tiempo real los obstáculos durante la movilidad vial. Esta herramienta servirá como apoyo a la autonomía personal de las personas con discapacidad visual, facilitando su desplazamiento seguro y eficiente. El proyecto ofrece una solución tecnológica contextualizada al entorno colombiano, de bajo costo, accesible y escalable [34, 29].

El proyecto aportará un prototipo funcional de una aplicación móvil asistiva que integra algoritmos como YOLO para la detección de obstáculos y sensores del dispositivo móvil para brindar retroalimentación inmediata [27, 29]. Se espera que este sistema:

1. Reduzca la dependencia de terceros en la movilidad diaria.
2. Minimice riesgos de accidentes.
3. Mejore la calidad de vida y bienestar de las personas con discapacidad visual.
4. Sirva como base para futuras investigaciones o desarrollos tecnológicos similares en otros contextos urbanos latinoamericanos [10, 34].

Los beneficiarios directos serán las personas con discapacidad visual parcial o total, principalmente entre 18 y 45 años, quienes ganarán mayor independencia al desplazarse. Los beneficios incluyen mayor autonomía, confianza personal, inclusión social y oportunidades en educación y empleo. Los beneficiarios indirectos incluyen familias, cuidadores, instituciones educativas, organizaciones de discapacidad y entidades gubernamentales comprometidas con la accesibilidad urbana [5, 8]. ¿Qué aportes tendrá en conexión con los objetivos específicos?. Cada objetivo específico se ve reflejado en la investigación:

1. Se analizarán los principales obstáculos en la movilidad urbana [23].
2. Se integrarán tecnologías accesibles de visión computacional [29, 27].
3. Se desarrollará y validará un sistema funcional con participación real de usuarios, lo que garantiza un diseño centrado en el ser humano y contextualizado a las condiciones locales [4, 35].

### **2.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

La base teórica del proyecto se fundamenta en estudios sobre movilidad asistida, inteligencia artificial y visión computacional aplicadas a la discapacidad visual. Se busca no solo aplicar estas teorías, sino también validar su eficacia en contextos reales y proponer nuevos modelos de interacción persona-tecnología en entornos urbanos complejos. Además, los resultados podrán contribuir al desarrollo de nuevas hipótesis sobre accesibilidad urbana e inclusión digital [29, 34]. También se espera que los datos obtenidos permitan generalizar principios útiles para el diseño de sistemas accesibles en otras regiones urbanas.

### **2.2.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

El desarrollo del sistema responde a una necesidad concreta y ampliamente documentada: la falta de infraestructura accesible en ciudades colombianas y la escasa implementación de tecnologías asistivas adaptadas al contexto. Esta solución tecnológica permitirá mitigar el riesgo en la movilidad, fomentar la independencia de las personas con discapacidad visual y mejorar su integración a la vida urbana [23, 5]. De esta manera, el estudio tiene un impacto social directo, con posibilidad de implementación real en el corto y mediano plazo.

### **2.2.3 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

El proyecto incorpora métodos mixtos y un diseño experimental con pruebas reales en campo, lo que permite una validación integral del sistema. Además, propone un enfoque novedoso en la recolección y análisis de datos mediante visión computacional, procesamiento en backend y técnicas estadísticas de evaluación [29, 4]. Así, la metodología empleada no solo garantiza rigurosidad en los resultados, sino que también aporta a la innovación en el desarrollo de tecnologías accesibles. La integración de técnicas de IA en un entorno económico y técnico limitado es un valor agregado metodológico de este estudio [35].

## **2.3. OBJETIVOS**

### **2.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar, mediante el uso de tecnologías de inteligencia artificial, visión computacional y cámaras de dispositivos móviles, un sistema inteligente para apoyar a personas con discapacidad visual en la detección de obstáculos en movilidad vial.

### **2.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Analizar a través de revisión documental las necesidades de las personas con discapacidad visual, identificando los obstáculos más frecuentes en la movilidad vial para el diseño de un sistema que responda a los requerimientos de estos usuarios.
2. Implementar un sistema inteligente basado en tecnologías de aprendizaje profundo y sensores, para la detección de obstáculos presentados en la movilidad vial.
3. Evaluar el sistema inteligente en escenarios reales con personas con discapacidad visual realizando pruebas que permitan la identificación de mejoras y realizando ajustes al sistema según resultados obtenidos.

## **2.4 BASES TEÓRICAS**

### **2.4.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE AYUDAS PARA LA MOVILIDAD DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL**

La utilización de bastones como herramientas para el desplazamiento y la autodefensa se remonta a tiempos ancestrales [17]. Antes de la introducción específica del bastón blanco, las personas con discapacidad visual ya empleaban bastones para facilitar su movilidad, demostrando su

capacidad para navegar incluso por calles concurridas [38]. Esta práctica ancestral subraya una necesidad fundamental de contar con una extensión táctil y un medio para sondear el entorno.

La idea de pintar un bastón de color blanco con el fin de aumentar su visibilidad para los automovilistas se atribuye a James Biggs, un fotógrafo de Bristol que perdió la vista en 1921 a causa de un accidente [17]. Preocupado por la creciente circulación de vehículos cerca de su domicilio, esta iniciativa personal buscaba mejorar su seguridad al transitar.

Posteriormente, en 1931, Guilly d'Herbemont impulsó en Francia un movimiento nacional en favor del bastón blanco para personas ciegas [42]. Este movimiento incluyó la entrega simbólica de los dos primeros bastones blancos a personas ciegas en presencia de ministros franceses y la posterior distribución de 5000 bastones más a veteranos de guerra y civiles con ceguera [42]. En Norteamérica, la promoción del uso del bastón blanco como programa nacional se inició en 1931 por parte de Lions Clubs International [19].

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas variantes del bastón blanco, cada una diseñada para propósitos específicos [42]. El bastón largo, que se extiende desde el suelo hasta el esternón del usuario, se utiliza principalmente como herramienta de movilidad para detectar objetos en el camino. El bastón guía, más corto y llegando hasta la cintura, se emplea para explorar bordillos y escalones. El bastón de identificación, más ligero y corto, sirve principalmente para alertar a otros de que el usuario tiene discapacidad visual. El bastón de apoyo ofrece estabilidad física, mientras que el bastón para niños está adaptado en tamaño y peso para los más jóvenes. En algunos países, como Argentina, se utiliza un bastón verde para indicar baja visión, reservándose el blanco para la ceguera total [42].

La existencia de estas diferentes tipologías de bastones evidencia la diversidad de necesidades entre las personas con discapacidad visual, sugiriendo que una solución única podría no ser óptima para todos y motivando la exploración de sistemas más adaptativos como los basados en IA. El movimiento moderno de perros guía surgió tras la Primera Guerra Mundial, debido al gran número de soldados que regresaban del frente con ceguera, a menudo causada por gases venenosos [18]. El Dr. Gerhard Stalling, un médico alemán, tuvo la idea de entrenar perros de forma masiva para asistir a estas personas afectadas [18]. En agosto de 1916, el Dr. Stalling inauguró en Oldenburg la primera escuela del mundo para perros guía para ciegos [18].

Esta iniciativa se expandió rápidamente con la apertura de nuevas sedes en varias ciudades alemanas, llegando a entrenar hasta 600 perros al año, que se proporcionaban tanto a excombatientes como a personas ciegas de otros países como Gran Bretaña, Francia, España, Italia, Estados Unidos, Canadá y la Unión Soviética [18]. Dorothy Harrison Eustis, una mujer estadounidense que ya trabajaba con perros en Suiza, desempeñó un papel crucial en la popularización de los perros guía a nivel internacional, especialmente en Estados Unidos, lo que llevó a la fundación de la Seeing Eye School [18].

En la década de 1930, los programas de perros guía se extendieron a otros países como Reino Unido, Francia e Italia [18]. La institucionalización de los perros guía como respuesta a una necesidad social específica, como fue el caso de los veteranos de guerra, ilustra cómo los acontecimientos históricos pueden impulsar el desarrollo de tecnologías de asistencia. Si bien los perros guía han demostrado ser una ayuda invaluable para la movilidad, también presentan limitaciones en términos de entrenamiento, costo y adecuación para todas las personas, lo que subraya la necesidad de explorar alternativas tecnológicas, como los sistemas basados en IA, que podrían ofrecer una mayor accesibilidad y adaptabilidad.

Tipo de Ayuda	Figuras/Organizaciones Clave	Cronología Aproximada	Características/Significado
Bastón	-	Tiempos Antiguos	Herramienta básica para el desplazamiento y la defensa, utilizada por personas con discapacidad visual antes de la introducción del bastón blanco.
Bastón Blanco	James Biggs, Guilly d'Herbemont, Lions Clubs International	1921 - 1931	Inicialmente una medida de seguridad personal, se convirtió en un símbolo reconocido de la ceguera y una herramienta crucial para la



			movilidad, con diferentes variantes para diversas necesidades.
Perro Guía	Dr. Gerhard Stalling, Dorothy Harrison Eustis	Post-Primera Guerra Mundial	Surgió como respuesta a la gran cantidad de veteranos de guerra con ceguera, institucionalizándose su entrenamiento y extendiéndose internacionalmente. Aunque efectivo, presenta limitaciones en cuanto a costo, entrenamiento y adecuación para todos los

			individuos.
--	--	--	-------------

**Tabla 1: Evolución de Ayudas para la Movilidad de Personas con Discapacidad Visual**

#### **2.4.1.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS: AVANCES TECNOLÓGICOS EN LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS**

El desarrollo de tecnologías de radar y sonar para la detección remota durante la Segunda Guerra Mundial, junto con la introducción de la tecnología de transistores, que hizo viables los dispositivos electrónicos portátiles, sentó las bases para la creación de diversos dispositivos de detección de obstáculos destinados a personas ciegas [37]. La elección del ultrasonido como medio de transmisión se debió a la facilidad con la que se podía realizar la localización por eco en este medio, dada su velocidad de propagación relativamente lenta [37].

Uno de los primeros dispositivos diseñados para reemplazar, en lugar de simplemente complementar, el bastón largo o el perro guía fue la Sonic Torch [37]. Este dispositivo de mano de haz estrecho utilizaba ultrasonido y presentaba una salida auditiva a través de un auricular. A diferencia de otros dispositivos ultrasónicos de detección de obstáculos que empleaban la transmisión de pulsos de frecuencia única, la Sonic Torch transmitía una onda de energía ultrasónica de banda ancha y frecuencia modulada. Las señales reflejadas se convertían a la región audible mediante la multiplicación con la señal transmitida, generando una señal auditiva rica en información donde el tono correspondía al rango y el timbre a las variaciones en la textura de la superficie del objetivo, permitiendo su identificación [37].

Desarrollos posteriores de este concepto llevaron a la creación del Binaural Sensory Aid (Kay, 1966), comercialmente conocido como Sonicguide [37]. Este dispositivo, con un diseño similar a unas gafas, se llevaba en la cabeza y utilizaba un transmisor de haz ancho. Los dos transductores receptores estaban ligeramente separados a izquierda y derecha, y sus señales se presentaban separadamente a cada oído, proporcionando una señal de dirección incorporada. Al igual que la mayoría de las ayudas electrónicas para la movilidad, el Sonicguide se utilizaba en conjunto con el bastón largo o el perro guía [37].

Para esclarecer la controversia sobre la forma óptima de señal de rango para un detector de obstáculos, la American Foundation for the Blind desarrolló un dispositivo de rango ultrasónico asistido por microprocesador utilizando la electrónica de sonar del mecanismo de enfoque automático Polaroid [37]. El microprocesador podía programarse para presentar su salida en diversos códigos auditivos, incluyendo la voz hablada. También se desarrollaron otros sistemas de rango basados en Polaroid [37].

En la República Federal de Alemania, la empresa Siemens produjo sus propios sistemas de detección de obstáculos de mano y montados en gafas, mientras que en Inglaterra, los desarrolladores del Nottingham Obstacle Detector idearon una versión modificada para llevar en la cabeza, el Sonic Pathfinder (Heyes, 1984), diseñado para permitir la discriminación del objetivo [37]. El Sonic Pathfinder, desarrollado por los creadores del Nottingham Obstacle Detector en Inglaterra, representaba una versión modificada para llevar en la cabeza de su dispositivo original

[37]. Su objetivo principal era permitir al usuario discriminar la dirección de un objetivo, funcionando primordialmente como un sistema de detección de obstáculos [37].

El Sonic Pathfinder utilizaba escalas musicales para representar la distancia a los objetos a través de señales auditivas [41]. Se exploraron diferentes modalidades sensoriales y métodos de salida en estos primeros dispositivos, lo que refleja una búsqueda continua de la manera más efectiva de transmitir información espacial. La distinción entre enfoques que priorizaban pantallas ricas en información (Kay) y aquellos que se centraban en información mínima pero relevante (Heyes) pone de manifiesto la complejidad inherente al diseño de dispositivos de sustitución sensorial [41].

La aplicación de tecnologías desarrolladas para fines militares, como el radar y el sonar, a dispositivos de asistencia ilustra un patrón común de transferencia tecnológica, donde las innovaciones en un campo encuentran aplicaciones en otros, beneficiando a menudo a personas con discapacidad [37]. En la década de 2000, la llegada de la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) supuso un avance significativo en la provisión de información de orientación espacial y navegación para personas con discapacidad visual [1]. La capacidad de mantener la orientación y acceder a información basada en la ubicación experimentó un notable incremento gracias a esta tecnología [1].

Loomis y sus colegas desarrollaron el Personal Guidance System, el primer sistema basado en GPS adaptado para personas con discapacidad visual, centrándose en la posición, la orientación y la guía de rutas mediante pantallas acústicas virtuales [1]. Este sistema buscaba informar al

viajero de su posición y orientación actuales con respecto al entorno, proporcionar información sobre los alrededores inmediatos y, si se deseaba, guiarlo a lo largo de una ruta seleccionada [33]. La idea de un sistema de navegación para personas ciegas se convirtió en el foco de investigación y desarrollo de varios grupos en todo el mundo, incluyendo empresas comerciales [33]. También se hicieron disponibles comercialmente dispositivos GPS adaptados, como GPS Talk (Sendero Group, 2000) y el BrailleNote GPS [1].

Además, se desarrolló un sistema de navegación basado en teléfonos inteligentes que utilizaba GPS y Bluetooth para personas con discapacidad visual en zonas de trabajo [12]. Sin embargo, se identificaron limitaciones del GPS en entornos interiores debido a la falta de disponibilidad de señales [2]. La introducción del GPS representó un avance crucial al ofrecer información de orientación espacial y navegación, trascendiendo la mera detección de obstáculos para abarcar la planificación de rutas y la conciencia del entorno [1]. No obstante, las limitaciones del GPS en interiores y la necesidad de tecnologías complementarias como los beacons Bluetooth [12] indican que una solución de navegación integral podría requerir una combinación de diferentes tecnologías de posicionamiento.

En la década de 2010, se observó un creciente interés en la aplicación de técnicas de visión por computador para asistir a personas con discapacidad visual [31]. Proyectos como VizWiz::Locatelt (Bigham et al., 2010) permitieron la identificación de objetos, Timbremap facilitó la exploración de planos interiores y se desarrollaron sistemas que utilizaban marcadores de color para la orientación [31]. La visión por computador se postuló como un medio prometedor para proporcionar información ambiental más rica en comparación con los enfoques basados en sensores anteriores, ofreciendo el potencial de "ver" e interpretar escenas visuales complejas [7].

Se exploraron diversas aplicaciones de la visión por computador para personas con discapacidad visual, incluyendo la detección de obstáculos, la lectura de señales y la identificación de personas y objetos [43]. A pesar del desarrollo de numerosas ayudas electrónicas basadas en visión por computador, su adopción generalizada fue limitada debido a factores como el costo, la usabilidad y el rendimiento [30]. Los desafíos en la adopción generalizada de estas ayudas sugieren que la viabilidad tecnológica por sí sola no es suficiente; la usabilidad, la rentabilidad y un rendimiento fiable son factores cruciales para el éxito de las tecnologías de asistencia.

Las tendencias recientes, a partir de la década de 2020, se orientan hacia la integración de múltiples sensores (visión, profundidad, radar) y el aprovechamiento de técnicas avanzadas de IA como las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y los transformadores para crear sistemas de detección de obstáculos y navegación más robustos e integrales [14]. El sistema vOICe (Meijer) ejemplifica un dispositivo de sustitución sensorial visual a auditivo que convierte video en vivo en paisajes sonoros, permitiendo a los usuarios "ver" a través del sonido [14].

La conferencia de 2012 [32] destacó su potencial con gafas de realidad aumentada. Las CNN, cuyo trabajo fundacional fue realizado por LeCun, Bengio y Hinton en 2015 [24], se han consolidado como una herramienta poderosa para la detección de objetos en la visión por computador. Trans4Trans (Karim et al., 2022) presenta una red transformadora eficiente para la segmentación de objetos transparentes, crucial para la seguridad en la navegación [39]. Eyeronman (Wang et al., 2023) es un dispositivo portátil que utiliza sensores multimodales

(cámara IR y radar de tiempo de vuelo) y retroalimentación háptica para la evitación de obstáculos [3].

La fusión de información multisensorial en vehículos inteligentes, como enfatizan Zhang et al. (2024) [28], es cada vez más importante para mejorar la percepción del entorno en la conducción autónoma, lo cual tiene una relevancia directa para las tecnologías de asistencia. Además, la retroalimentación háptica está emergiendo como una modalidad valiosa para transmitir información espacial, ofreciendo una forma más directa e intuitiva para que las personas con discapacidad visual perciban su entorno. Sin embargo, también se han planteado preocupaciones éticas y preferencias de los usuarios relacionadas con las tecnologías de asistencia basadas en IA, como se observa en el estudio de Abdolrahmani et al. de 2021 sobre IA explicable para usuarios ciegos [40].

La tendencia actual se dirige hacia la integración de múltiples sensores y el uso de IA avanzada para crear sistemas más robustos, donde la retroalimentación háptica emerge como una modalidad valiosa, aunque las consideraciones éticas y las preferencias del usuario adquieren una importancia creciente.

Tecnología	Desarrolladores Clave	Cronología Aproximada	Tecnología Central	Modalidad Salida	de
Sonic Torch	-	1960s-1980s	Ultrasonido	Auditiva	
Sonicguide	Kay	1960s-1980s	Ultrasonido	Auditiva	
Nottingham Obstacle Detector/Sonic Pathfinder	Heyes	1960s-1980s	Ultrasonido	Auditiva/Táctil	
Personal Guidance System	Loomis et al.	2000s	GPS	Acústica Virtual	
GPS Talk	Sendero Group	2000s	GPS	Voz	
VizWiz::Locatelt	Bigham et al.	2010s	Visión por Computador	-	
vOICe	Meijer	2010s-Actualidad	Visión por Computador	Auditiva	
CNN para Detección de Objetos	LeCun, Bengio, Hinton	2010s-Actualidad	Redes Neuronales Convolucionales	-	
Trans4Trans	Karim et al.	2020s	Redes Transformer, Visión por Computador	-	
Eyeronman	Wang et al.	2020s	Sensores Multimodales (IR, ToF), IA	Háptica	

Fusión Multisensorial	Zhang et al.	2020s	Múltiples Sensores, Fusión de Datos	-
-----------------------	--------------	-------	-------------------------------------	---

**Tabla 2:** Avances Tecnológicos en la Detección de Obstáculos

### 2.4.1.2 ANTECEDENTES LEGALES

La Convención de las Naciones Unidas sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad (CDPD) de 2006 establece un marco legal internacional fundamental que promueve, protege y asegura el disfrute pleno y en igualdad de condiciones de todos los derechos humanos y libertades fundamentales por todas las personas con discapacidad [9]. La Convención enfatiza principios como el respeto por la dignidad inherente, la autonomía individual, la no discriminación, la participación plena y efectiva y la accesibilidad [9]. Artículos específicos, como el derecho a la vida (Artículo 10), la igualdad ante la ley (Artículo 12) y la libertad de expresión y opinión y el acceso a la información (Artículo 21), son particularmente relevantes [9].

Además, el derecho a la movilidad (Artículo 20) y la obligación de los Estados Partes de adoptar medidas apropiadas para garantizar el acceso de las personas con discapacidad al entorno físico, al transporte, a la información y las comunicaciones, y a otros servicios e instalaciones, tienen una implicación directa en el desarrollo y la implementación de tecnologías de asistencia [9].

La CDPD proporciona un marco legal internacional que exige los derechos y la inclusión de las personas con discapacidad, impactando directamente en el desarrollo y la implementación de tecnologías de asistencia al enfatizar la accesibilidad y la no discriminación. Los artículos

relacionados con la accesibilidad (20 y 21) son especialmente relevantes para el proyecto en curso, ya que obligan a los estados a promover el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación, que incluyen los sistemas de asistencia basados en IA. En Colombia, la CDPD fue adoptada oficialmente en 2009 a través de la Ley 1346 [6].

Esta ley tiene como objetivo garantizar y asegurar el ejercicio efectivo de los derechos de las personas con discapacidad mediante la adopción de medidas de inclusión, acción afirmativa y ajustes razonables [16]. Adicionalmente, la Ley 1581 de 2012 en Colombia regula el tratamiento de datos personales y establece derechos relacionados con el acceso, la actualización y la rectificación de la información personal en bases de datos [25]. Esta ley también define categorías especiales de datos personales, incluyendo datos sensibles como la información de salud [11].

Colombia ha integrado los principios de la CDPD en su legislación nacional, demostrando un compromiso con la defensa de los derechos de las personas con discapacidad, incluyendo su acceso a tecnologías de asistencia. La Ley 1581 subraya la importancia de la privacidad y la seguridad de los datos, especialmente para la información sensible como los datos de salud, lo cual es relevante considerando que los sistemas de asistencia basados en IA podrían recopilar y procesar datos personales de usuarios con discapacidad visual.

Las Directrices de Accesibilidad al Contenido Web (WCAG) 2.1, desarrolladas por el W3C en 2018, ofrecen recomendaciones para hacer el contenido web más accesible a personas con discapacidad, incluyendo aquellas con discapacidad visual [20]. Aunque se centran principalmente

en el contenido web, las WCAG 2.1 representan un conjunto de estándares de accesibilidad ampliamente reconocidos que pueden informar el diseño de interfaces de usuario y métodos de entrega de información en tecnologías de asistencia basadas en IA, asegurando que sean utilizables por personas con discapacidad visual. Los principios de las WCAG 2.1 sobre perceptibilidad, operabilidad, comprensibilidad y robustez pueden aplicarse al diseño de la salida del sistema (por ejemplo, retroalimentación auditiva o háptica).

En cuanto a las consideraciones éticas para la IA en la tecnología de asistencia, la Recomendación de la UNESCO sobre la Ética de la Inteligencia Artificial (2021) constituye el primer estándar global en este ámbito, enfatizando los derechos humanos, la dignidad, la transparencia, la equidad y la supervisión humana [13]. La norma ISO/IEC 23053:2022 establece un marco para los sistemas de IA que utilizan aprendizaje automático, abordando aspectos como la calidad, la fiabilidad, la seguridad y las consideraciones éticas [22].

Además, estudios como el de Abdolrahmani et al. (2021) [40] resaltan las preocupaciones éticas relacionadas con la falibilidad de la IA, la posible tergiversación de terceros, la privacidad y la tendencia de los usuarios a depender excesivamente de los sistemas de IA. El desarrollo y la implementación del sistema basado en IA deben adherirse a principios y estándares éticos para garantizar su uso responsable y el respeto a los derechos y el bienestar de las personas con discapacidad visual y de la comunidad en general. La transparencia y la explicabilidad son consideraciones éticas cruciales en este contexto, ya que los usuarios con discapacidad visual necesitan comprender cómo funciona el sistema y poder confiar en sus resultados, especialmente en situaciones críticas para la seguridad como la navegación vial.



**Universidad**  
Popular del Cesar

**PROTOCOLO DEL ANTEPROYECTO DE GRADO**



Marco/Documento	Organismo Emisor/Año	Principios/Artículos Relevantes para Tecnología de Asistencia y Accesibilidad	Clave
Convención de la ONU sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad (CDPD)	ONU/2006	Respeto por la dignidad inherente, autonomía individual, no discriminación, participación plena y efectiva, accesibilidad, derecho a la vida (Art. 10), igualdad ante la ley (Art. 12), libertad de expresión y opinión y acceso a la información (Art. 21), derecho a la movilidad (Art. 20).	
Ley 1346 de 2009 (Colombia)	Colombia/2009	Adopción de la CDPD en la legislación colombiana, garantía y aseguramiento de los derechos de las personas con discapacidad mediante inclusión, acción afirmativa y ajustes razonables.	
Ley 1581 de 2012 (Colombia)	Colombia/2012	Regulación del tratamiento de datos personales, derechos de acceso, actualización y rectificación de información personal, definición de datos sensibles (incluyendo información de salud).	
Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1	W3C/2018	Directrices para hacer el contenido web más accesible a personas con discapacidad, aplicables en principios al diseño de interfaces y entrega de información en tecnologías de asistencia (perceptibilidad, operabilidad, comprensibilidad, robustez).	
Recomendación de la UNESCO sobre la Ética de la IA	UNESCO/2021	Primer estándar global sobre ética de la IA, enfatizando derechos humanos, dignidad, transparencia, equidad, supervisión humana.	

ISO/IEC 23053:2022	ISO/IEC/2022	Marco para sistemas de IA que utilizan aprendizaje automático, abordando calidad, fiabilidad, seguridad y consideraciones éticas.
--------------------	--------------	---

**Tabla 3: Marcos Legales y Éticos Relevantes**

## 2.4.2 MARCO TEÓRICO

### 2.4.2.1 DISCAPACIDAD VISUAL

La discapacidad visual se produce cuando una afección ocular afecta al sistema visual y a sus funciones relacionadas con la visión [5].

La OMS declara que en el mundo, hay al menos 2200 millones de personas con deterioro de la visión cercana o distante.

### 2.4.2.2 EFECTOS

La discapacidad visual afecta gravemente a la calidad de vida de la población adulta. En los adultos con discapacidad visual, puede suceder que sus tasas de empleo sean más bajas y las de depresión y ansiedad, más altas. En el caso de los adultos de mayor edad, la discapacidad visual puede contribuir al aislamiento social, a la dificultad para caminar, a un mayor riesgo de caídas y fracturas y a una mayor probabilidad de ingreso temprano en residencias de ancianos. Esta supone una enorme carga económica mundial, ya que se estima que la pérdida anual de

productividad que acarrea asciende a unos US \$411 000 millones en todo el mundo en paridad de poder adquisitivo [5].

### **2.4.2.3 MOVILIDAD INDEPENDIENTE**

Tradicionalmente las personas que sufren de discapacidad visual grave o ceguera se han valido del uso de bastones para deambular independientemente y reconocer los obstáculos que se les presentan. Sin embargo, esta actividad es difícil en ambientes desconocidos y por eso requieren la asistencia de otros. Para mejorar esta independencia se han utilizado los perros guías, los cuales han existido en las culturas europea y asiática por varios siglos [10].

#### **2.4.2.3.1 DISPOSITIVOS MODERNOS**

Durante los últimos años se han creado otros tipos de ayuda para asistir a la población con discapacidad visual para mejorar la independencia. Estas incluyen dispositivos que aumentan la percepción de profundidad y la magnificación de imágenes, el uso de prótesis epirretinales, las alarmas vibratorias y los componentes electrónicos en bastones, cámaras de video con audio integradas en gafas que reconocen letras y objetos [10].

#### **2.4.2.4 TECNOLOGÍAS ASISTIVAS PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL**

En la actualidad la implementación de tecnologías emergentes, tales como algoritmos avanzados, aplicaciones móviles y dispositivos innovadores, permite a las personas con discapacidad visual realizar tareas diarias con mayor autonomía y confianza. Además, estas tecnologías

fomentan la inclusión social y abren nuevas oportunidades en áreas como la educación y el empleo [34].

Las tecnologías propuestas en los estudios revisados abarcan diversos ámbitos, destacándose especialmente aquellas que facilitan la movilidad de las personas con discapacidad visual (Chicalski et al., 2024; Espinoza et al., 2024; Martínez, 2024; Salinas et al., 2024; Velázquez et al., 2023; Altamirano et al., 2023; Trujillo et al., 2021; Lo Valvo et al., 2021). Asimismo, algunas propuestas se relacionan con la esfera educativa, como la gestión de inasistencias (Francisca et al., 2024), el diseño de materiales educativos sobre el período gestacional (Ferreira et al., 2024) y la enseñanza del sistema Braille [35]. Además, se presentaron tecnologías para el reconocimiento de objetos en la cocina (Dang et al., 2024), así como para identificar billetes, tarjetas bancarias y otros objetos (Salas, 2023).

También se exploraron aplicaciones en la educación musical (Reina y Gaitán, 2024) y una guía multimedia destinada a facilitar el acceso al patrimonio arquitectónico (Slavin, 2024). Esta diversidad de enfoques resalta el potencial de las tecnologías asistivas para abordar múltiples aspectos de la vida diaria de las personas con discapacidad visual. Estas referencias fueron recopiladas en una revisión de [34].

Los estudios analizados presentan una amplia variedad de enfoques tecnológicos diseñados para mejorar la autonomía de las personas con discapacidad visual. Entre ellos se incluye el uso del algoritmo YOLO [27], que emplea redes neuronales y visión artificial

para el reconocimiento de objetos; una guía multimedia accesible con maqueta háptica [8] enfocada en el acceso al patrimonio arquitectónico; y aplicaciones web como MetroSonus, que apoya la formación musical para personas con discapacidad visual [34].

También destacan diversas aplicaciones móviles, como JustiApp [4], aSISTA [34], una herramienta para aprender signos braille [35], y otras enfocadas en la gestión personal o el reconocimiento de objetos [34].

#### **2.4.2.5 INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y VISIÓN COMPUTACIONAL EN MOVILIDAD ASISTIDA**

La inteligencia artificial ha revolucionado la movilidad asistida al permitir la detección y clasificación de objetos mediante el uso de algoritmos avanzados. Según [36], el objetivo de la visión computacional es extraer características de una imagen para su descripción e interpretación por la computadora. Por ejemplo:

- Determinar la localización y tipo de objetos en la imagen.
- Construir una representación tridimensional de un objeto.
- Analizar un objeto para determinar su calidad.
- Descomponer una imagen u objeto en diferentes partes.

La visión computacional desempeña un papel fundamental en la movilidad asistida, proporcionando soluciones innovadoras como el siguiente sistema. Este consta de un dispositivo de visión móvil con una lente panorámica portátil montada en el teléfono inteligente y una base de

datos remota de características de imagen de la escena en un servidor habilitado con GPU. Se extraen características de imagen omnidireccionales compactas y efectivas, que se representan en el dispositivo móvil y luego se transmiten al servidor en la nube. Clips de video cortos de estas características se utilizan para buscar en la base de datos del entorno interior mediante indexación basada en imágenes, con el fin de encontrar la ubicación del usuario dentro de la base de datos, la cual está asociada con planos del entorno [15].

La localización en interiores basada en visión computacional es un área de creciente interés en la movilidad asistida. Una técnica comúnmente utilizada es Structure from Motion (SfM), que permite construir modelos 3D del entorno a partir de imágenes. Sin embargo, la falta de calibración en las cámaras puede dificultar la precisión de la escala del modelo generado. Para abordar este problema, se han explorado métodos como el uso de odometría o la vinculación de características SIFT con puntos 3D conocidos. Además, algunos investigadores han utilizado Microsoft Kinect para generar modelos de vóxeles en 3D y analizar la accesibilidad del entorno, aunque su integración en la vida diaria sigue siendo un desafío [15]

#### **2.4.2.6 SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INTELIGENTE PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL**

En Colombia, las personas con discapacidad visual enfrentan múltiples factores que afectan su calidad de vida, siendo la falta de independencia uno de los más relevantes. La dificultad para desplazarse de forma segura por las ciudades representa un obstáculo significativo para su inclusión social y laboral. Aunque sus necesidades varían según el tipo de discapacidad, edad y habilidades desarrolladas, muchas ciudades del país no cuentan con una infraestructura adecuada para esta población. Estas personas deben enfrentarse a los mismos desafíos que cualquier

ciudadano, pero con la desventaja de no contar con la visión, lo que agrava su experiencia diaria [23].

Obstáculos como huecos, postes mal ubicados, andenes estrechos o irregulares, desniveles, escaleras y salientes, reflejan la falta de planeación urbana, el escaso control de las autoridades y la poca conciencia social. Estas condiciones no pueden ser superadas únicamente con el uso del bastón, lo que obliga frecuentemente a depender de un acompañante, limitando así de manera significativa su autonomía [23].

El diseño de sistemas de navegación inteligente para personas con discapacidad visual busca proporcionar independencia y seguridad al usuario, combinando sensores, algoritmos de inteligencia artificial (IA), redes IoT y variados modos de retroalimentación.

#### **2.4.2.6.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.4.2.6.2 PERCEPCIÓN DEL ENTORNO**

1. “Cámaras 2D (smartphone): buena resolución pero sin información de profundidad, útiles para detección de obstáculos frontales mediante visión por computador” [29].
2. Sensores de profundidad (Kinect, LiDAR): generan nubes de puntos 3D que permiten estimar distancias y modelar el entorno en tiempo real [29].

3. Ultrasonidos e infrarrojos: miden distancias por reflexión; su bajo coste y consumo los hacen muy usados, aunque la precisión varía según la geometría y material de los objetos [29].
4. RFID y beacons Bluetooth: permiten señalar puntos fijos en interiores (ascensores, puertas), facilitando la localización mediante lectores distribuidos [29].

#### **2.4.2.6.3 PROCESAMIENTO E INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

1. Detección de objetos: modelos ligeros como YOLO o SSD embarcados en Raspberry Pi o móviles, que identifican peatones, vehículos y señales con precisiones superiores al 90 % [29].
2. Segmentación de zonas transitables: redes fully convolucional que distinguen el camino despejado del resto, habilitando planificación de rutas en tiempo real [29].
3. Fusión multimodal: combinar datos RGB-D, ultrasonido y RFID mejora la robustez ante condiciones adversas [29].

#### **2.4.2.6.4 PLATAFORMAS IOT Y COMUNICACIONES**

1. Bastones inteligentes: microcontroladores (Arduino, Raspberry Pi) con sensores y módulos Bluetooth/Wi-Fi/GSM que envían alertas al usuario o a un centro de asistencia [29].
2. Wearables interconectados: zapato, gafas o gorra inteligente que intercambian datos vía la nube para ofrecer guía tanto en interiores (RFID, beacons) como en exteriores (GPS, GPRS) [29].

### 2.4.2.6.5 MODOS DE RETROALIMENTACIÓN

1. Audio: instrucciones habladas (“calle recta, obstáculo a la derecha”), recomendable en entornos silenciosos.
2. Háptico/vibración: impulsa vibraciones direccionales en bastón, chaleco o smartwatch, evitando interferencias sonoras.
3. Táctil estático (Braille): señalética fija en interiores (ascensores, puertas) para apoyo en puntos críticos [29].

Fig. 3. Comparación de Tecnologías y Enfoques para la Detección de Obstáculos y Sistemas de Navegación. Fuente: [29].

Reference	Approach/Technology	Sensors and Libraries Used	Results	Drawbacks/Limitations
[55]	Smart stick obstacle detection	Ultrasonic sensors, Arduino IDE	Obstacle detection and sends alert	Device's effectiveness in noisy environments and battery life
[56]	RF remote control, to measure the object's distance from the user	Ultrasonic sensor, vibration motor, GSM module, IR sensor, Soil moisture	Sends alert messages through SMS	GPS module sometimes takes 30 s to 1 min to acquire a satellite lock
[57]	Smart shoe and smart glasses	Ultrasonic sensors and Arduino	Smart shoe warns user using buzzers when obstacle detected	Object detection and navigation guidance not supported
[58]	Wearable navigation system	NEO-6M GPS module, ultrasonic, Raspberry Pi camera, TensorFlow	90% accuracy observed	Detecting moving objects inaccurately when measured at an angle. Computational cost due to neural network.
[59]	Smart cap with smart cane	GPS module, ultrasonic sensor, Raspberry Pi camera	86% System Usability scale score	limited real-world images, for object detection
[60]	Monitoring system	Arduino, Vibration sensor, piezo buzzer, ultrasonic sensor	Notify the user's exact position to their care home.	Distance of objects not calculated
[61]	Smart stick to detect obstacles	Ultrasonic sensors, Arduino, Infrared sensor	low cost and good navigation	Does not provide navigational guidance, and the range of sensors and the types of obstacles it can detect are limited.
[62]	GPS embedded stick	GPS module, speech synthesizer, ultrasonic sensor, GPS receiver	Helps users reach destination via voice commands	The range of obstacle detection is limited.
[64]	Stick with GSM to detect location	Arduino NANO, LED, Ultrasonic sensors	An effective object detection	Battery life and durability
[65]	Automated navigation system	Raspberry Pi, camera, RFID, ultrasonic sensors	Dual feedback for secure navigation	Distance of objects not calculated
[66]	Smart solution with microcontrollers	Microcontrollers, cameras, accelerometers	Warns users via sound buzzers	Distance of objects not calculated
[67]	Smart walking stick and Smart hat	Buzzers, vibration motors, GPS, ultrasonic sensor	Cost effective system	No object detection

## **2.4.3 MARCO CONCEPTUAL**

### **2.4.3.1 DISCAPACIDAD VISUAL:**

La discapacidad visual es una condición que limita la capacidad de las personas para percibir y comprender su entorno de la misma manera que quienes poseen visión plena, debido a la ausencia o disminución significativa del sentido de la vista. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la discapacidad visual abarca desde una pérdida moderada hasta la ceguera total, afectando significativamente la calidad de vida, la movilidad y la autonomía de quienes la padecen. Esta condición obliga a las personas a interactuar con la realidad de manera diferente, presentando desafíos tanto físicos como sociales. Este proyecto tiene como propósito brindar apoyo a personas con limitaciones visuales, tanto parciales como totales, contribuyendo a su inclusión y mejor calidad de vida.

### **2.4.3.2 MOVILIDAD INDEPENDIENTE:**

La movilidad independiente se refiere a la capacidad de una persona para desplazarse de un lugar a otro sin la asistencia directa de otra persona o de un acompañante. Sin embargo, cuando se habla de personas con discapacidad, el concepto puede adaptarse: en el contexto de este proyecto, el objetivo es promover una movilidad independiente en personas con discapacidad visual, entendiendo que podrían apoyarse en herramientas o dispositivos tecnológicos, pero no depender de la ayuda constante de otros individuos. La intención no es eliminar totalmente el uso

de ayudas externas, sino fortalecer la autonomía personal y reducir la necesidad de asistencia humana en sus desplazamientos diarios.

#### **2.4.3.3 TECNOLOGÍAS ASISTIVAS:**

Las tecnologías asistivas están directamente relacionadas con el concepto de movilidad independiente planteado anteriormente. Estas tecnologías buscan fomentar la autonomía de las personas con discapacidad visual, permitiendo que, aunque no dependan de otras personas, sí puedan apoyarse en herramientas diseñadas para facilitar su desplazamiento y su interacción con el entorno. Desde dispositivos tradicionales como el bastón blanco hasta desarrollos más recientes basados en inteligencia artificial para el desplazamiento asistido, la evolución de estas tecnologías ha abierto nuevas posibilidades de inclusión y movilidad. Este proyecto tiene como propósito aprovechar los avances tecnológicos actuales para ofrecer soluciones que promuevan una movilidad más segura, eficiente y autónoma para las personas con discapacidad visual.

#### **2.4.3.4 INTELIGENCIA ARTIFICIAL:**

La inteligencia artificial (IA) es un concepto que lleva décadas en desarrollo, pero ha sido en los últimos años donde ha alcanzado una relevancia y un crecimiento tecnológico sin precedentes. De manera sencilla, la IA busca imitar ciertos procesos de la inteligencia humana, automatizando tareas que tradicionalmente requerían de la intervención directa de una persona. En el proyecto planteado, se propone el uso de esta tecnología como una herramienta para fomentar la independencia de las personas con discapacidad visual, mediante la detección de obstáculos y el

apoyo a su movilidad, actuando como una especie de "ojos inteligentes" que guíen su desplazamiento.

#### **2.4.3.5 VISIÓN COMPUTACIONAL**

La visión computacional, que utiliza la inteligencia artificial como herramienta principal, se basa en simular la visión humana para detectar objetos, obstáculos y otros elementos en el entorno. Esta tecnología es fundamental para el proyecto, ya que nos permite replicar la capacidad visual de las personas y, a través de esta simulación, facilitar su movilidad. Siguiendo el concepto previamente mencionado de "ojos inteligentes", la visión computacional se convierte en un aliado crucial para mejorar la autonomía de las personas con discapacidad visual.

#### **2.4.3.6 SISTEMA DE NAVEGACIÓN INTELIGENTE**

Un sistema de navegación inteligente para personas con discapacidad visual busca ofrecer una solución completa y autónoma para desplazarse por diversos entornos. Utilizando sensores, GPS, visión computacional e inteligencia artificial, este sistema es capaz de detectar obstáculos, planificar rutas seguras y guiar a la persona de manera eficiente. Su objetivo es proporcionar instrucciones claras, a través de audios o vibraciones, y ofrecer asistencia en tiempo real, asegurando que la persona pueda moverse con confianza y autonomía, sin la necesidad constante de asistencia humana. Este sistema se complementa con otras tecnologías como el bastón inteligente o dispositivos portátiles, lo que optimiza la experiencia de navegación para quienes padecen limitaciones visuales.

## **2.5 MARCO METODOLÓGICO**

### **2.5.1 ENFOQUE DEL PROYECTO**

El enfoque del proyecto es cuantitativo en su gran mayoría, ya que se basa en la medición y análisis de variables específicas relacionadas con la movilidad y la interacción de personas con discapacidad visual y la tecnología asistiva. Las mediciones cuantitativas permiten obtener datos precisos sobre la eficacia del sistema propuesto, como el tiempo de desplazamiento de los usuarios, el número de obstáculos detectados, y la percepción de mejora en su movilidad.

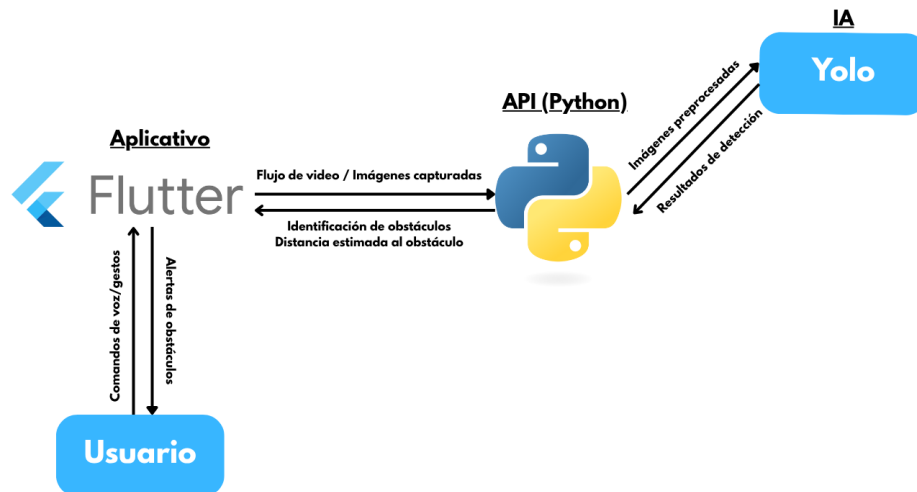
Se empleará un enfoque mixto en algunas fases del proyecto, combinando análisis numéricos con entrevistas cualitativas para entender la experiencia subjetiva de los usuarios.

### **2.5.2 DESARROLLO DEL APLICATIVO MÓVIL PARA LA ASISTENCIA EN LA MOVILIDAD**

El desarrollo del aplicativo móvil será una parte fundamental del proyecto, ya que servirá como la herramienta principal para interactuar con los usuarios y proporcionarles asistencia en la movilidad. Un componente esencial de esta asistencia será un módulo de retroalimentación accesible, que comunicará la información crítica al usuario principalmente a través de alertas de voz y patrones de vibración. El sistema estará diseñado para detectar obstáculos y ayudar en la orientación de los usuarios, utilizando tecnologías de inteligencia artificial que se integrarán

mediante una API backend, y cuyos resultados se transmitirán de forma intuitiva y no visual al usuario.

Fig. 4. Arquitectura y funcionamiento del aplicativo.



Fuente: Elaboración propia.

### **2.5.2.1 TECNOLOGÍAS A UTILIZAR**

Se optará por Flutter como framework para el desarrollo del aplicativo móvil. Flutter es una herramienta multiplataforma que permite desarrollar aplicaciones para Android e iOS con un solo código base, lo que optimiza los tiempos de desarrollo y reduce los costos de mantenimiento. Además, Flutter ofrece una excelente capacidad de integración con APIs de hardware y servicios de procesamiento, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren de procesamiento en tiempo real, como la nuestra.

La aplicación móvil se centrará principalmente en la interacción con el usuario. Su función primordial no será la visualización de datos (dado el público objetivo), sino la entrega de retroalimentación accesible en tiempo real sobre el entorno. Esta retroalimentación se materializará a través de un módulo integrado de alertas de voz y/o patrones de vibración, diseñado para ser intuitivo y eficaz para personas con discapacidad visual. La aplicación gestionará la captura de imágenes o videos desde la cámara del dispositivo y su transmisión a la API backend, donde se realizarán los procesos de inteligencia artificial..

Todos los procesos relacionados con la inteligencia artificial se ejecutarán en una API backend desarrollada en Python, utilizando frameworks como Flask o FastAPI. Esta API será la encargada de recibir los datos provenientes de la aplicación móvil (como las imágenes o videos capturados) y procesarlos a través de modelos de visión computacional como YOLO (You Only Look Once), para detectar los obstáculos en el entorno del usuario.

El procesamiento de las imágenes se realizará en el servidor backend, ya que este cuenta con mayores capacidades de cómputo para ejecutar los modelos de IA. Una vez que la API procese la información, devolverá los resultados a la aplicación móvil, los cuales incluirán detalles como la distancia a los obstáculos y la identificación de objetos en el entorno.

Además de la detección de obstáculos, la API realizará el cálculo de distancia utilizando la ecuación matemática que considera la perspectiva del usuario y la información proveniente de la cámara del dispositivo. El cálculo de distancia será clave para proporcionar al usuario información precisa sobre la proximidad de los obstáculos, lo que mejorará significativamente su capacidad para moverse de manera autónoma.

Consideraciones sobre la Conectividad y Mitigación de Fallos: Dado que el procesamiento de imágenes mediante inteligencia artificial se realiza en el servidor backend, el sistema depende de una conexión a internet activa para su funcionalidad completa de detección de obstáculos. Se contempla un plan de mitigación básico para situaciones de conectividad limitada o nula. En caso de pérdida de conexión, la aplicación móvil informará al usuario de esta situación mediante una alerta sonora y/o vibratoria.

Aunque la detección avanzada de obstáculos se verá interrumpida, se explorará la posibilidad de implementar funcionalidades básicas offline en el dispositivo móvil, como la activación de sensores de proximidad del propio teléfono (si el hardware lo permite) o

recordatorios de técnicas de movilidad segura convencionales. La aplicación intentará restablecer la conexión con la API automáticamente en segundo plano y notificará al usuario cuando el servicio esté nuevamente operativo. Para fallos en el servidor API, se implementarán mecanismos de registro de errores (logging) que permitan un diagnóstico y corrección eficientes.

### **2.5.2.2 METODOLOGÍA DE DESARROLLO**

Para garantizar un proceso de desarrollo ágil y eficiente, se implementará una metodología ágil basada en Scrum. Este enfoque permitirá gestionar el proyecto en sprints, con entregas periódicas de funcionalidades y pruebas, lo que facilitará la adaptación rápida a los cambios y mejoras que surjan durante el proceso de desarrollo.

Además, se llevarán a cabo reuniones diarias de seguimiento (Daily Stand Ups) y revisiones de sprint al final de cada ciclo, lo que permitirá realizar ajustes y optimizaciones según los resultados de las pruebas realizadas. Esta metodología también se complementará con revisiones de código, pruebas unitarias y validaciones en cada etapa del desarrollo para asegurar la calidad del aplicativo.

### **2.5.3 MÉTODOS ESPECÍFICOS**

El método experimental será el enfoque principal del estudio, ya que permitirá llevar a cabo pruebas controladas del sistema asistivo en un entorno real, con el objetivo de medir su impacto en la movilidad de las personas con discapacidad visual. Este enfoque es fundamental porque permite obtener datos cuantitativos y cualitativos que reflejan el desempeño del sistema bajo condiciones auténticas.

**Pruebas controladas:** Se diseñarán pruebas controladas en las cuales los participantes serán sometidos a situaciones de movilidad típicas, tanto con la asistencia de la tecnología como sin ella. Estas pruebas controladas proporcionarán datos comparativos que permitirán evaluar la mejora en la autonomía de los usuarios y la capacidad del sistema para detectar y evitar obstáculos. Para controlar el ambiente, se emplearán recorridos en los que los participantes deban atravesar diferentes tipos de escenarios (calles, pasillos, espacios con obstáculos) en condiciones de iluminación variadas, con la finalidad de probar la adaptabilidad del sistema.

**Diseño experimental:** El diseño experimental seguirá una estructura pretest-postest, en la cual se medirán las variables de interés (tiempo de desplazamiento, número de obstáculos detectados, nivel de confort y seguridad) antes y después de que los usuarios utilicen el sistema. Además, se implementará un grupo de control, que permitirá comparar los resultados obtenidos en los participantes que no utilizaron la tecnología con los que sí lo hicieron. Esta comparación será crucial para evaluar el impacto real del sistema y determinar si la intervención tiene efectos estadísticamente significativos.

Experimentos de campo: Se llevarán a cabo experimentos de campo, en los cuales los usuarios probarán el sistema en escenarios reales. Estos experimentos permitirán observar cómo interactúan los usuarios con la tecnología en su entorno habitual y proporcionar datos sobre su efectividad en situaciones cotidianas. Durante estas pruebas, los participantes realizarán tareas diarias, como desplazarse por la calle o dentro de edificios, mientras la tecnología les proporciona asistencia en la detección de obstáculos. Los datos obtenidos de estos experimentos incluirán mediciones objetivas (por ejemplo, tiempo para completar una tarea, número de obstáculos detectados) y subjetivas (percepción de los usuarios sobre su seguridad, comodidad y autonomía).

Validación técnica y humana: Los experimentos de campo no solo permitirán validar el aspecto técnico del sistema (precisión en la detección de obstáculos, fiabilidad del sistema de navegación), sino también su efectividad desde el punto de vista humano. Las entrevistas post-prueba serán esenciales para recoger retroalimentación cualitativa, ayudando a entender cómo los usuarios perciben la utilidad y la usabilidad del sistema en su vida diaria. Además, se evaluará cómo la tecnología impacta su autonomía y bienestar.

#### **2.5.4 TÉCNICAS Y INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

Para la recolección de datos en este estudio, se utilizarán una combinación de técnicas cualitativas y cuantitativas que permitirán obtener una visión integral sobre la efectividad del sistema asistivo para personas con discapacidad visual. A continuación se detallan las técnicas y los instrumentos que se emplearán en este proceso:

### **2.5.4.1 ENCUESTAS CUANTITATIVAS**

Se aplicarán cuestionarios estructurados antes (pre-test) y después (post-test) de que los participantes utilicen la tecnología. Estos cuestionarios tendrán como fin evaluar el impacto percibido del sistema en su autonomía, seguridad y comodidad, así como la usabilidad general de la aplicación. Las encuestas se diseñarán con preguntas cerradas y escalas de Likert para medir el grado de satisfacción y los cambios experimentados por los usuarios [26].

Adicionalmente, para obtener una medida estandarizada y validada de la usabilidad percibida del aplicativo móvil, se incorporará el System Usability Scale (SUS). El SUS es un cuestionario breve de 10 ítems, ampliamente reconocido y utilizado, que proporciona una puntuación global sobre la facilidad de uso del sistema desde la perspectiva del participante. La utilización de este instrumento permitirá comparar los resultados con benchmarks establecidos y añadir un mayor rigor cuantitativo a la evaluación de la interfaz y la interacción.

Las áreas clave de evaluación cuantitativa incluirán:

1. Autonomía: Medida de la capacidad del usuario para moverse de manera independiente sin asistencia externa, y cómo el sistema influye en esta capacidad.
2. Seguridad: Percepción del usuario sobre su seguridad mientras usa la tecnología en diferentes entornos viales.

3. Comodidad: Nivel de confort experimentado por el usuario durante la interacción con el sistema asistivo, incluyendo la carga cognitiva y física.
4. Usabilidad del Sistema (mediante SUS): Evaluación de la facilidad de uso, eficiencia y satisfacción general con la aplicación móvil, obtenida a través del System Usability Scale.

Los resultados de estas encuestas, incluyendo las puntuaciones del SUS, permitirán obtener datos cuantitativos que pueden ser analizados estadísticamente para identificar tendencias, patrones en la percepción de los usuarios y la efectividad general del sistema antes y después de su uso.

#### **2.5.4.2 ENTREVISTAS CUALITATIVAS**

Las entrevistas semi-estructuradas se realizarán para profundizar en las experiencias personales de los usuarios con el sistema asistivo. Estas entrevistas permitirán obtener datos cualitativos sobre la facilidad de uso, la efectividad y las dificultades encontradas en el uso de la tecnología. Las entrevistas se estructurarán en torno a temas como:

1. Facilidad de uso: Opiniones sobre la interfaz y la interacción con la tecnología.
2. Efectividad percibida: Opiniones sobre si el sistema les ayudó a detectar obstáculos y mejorar su movilidad.
3. Satisfacción general: Valoración global de la experiencia con la tecnología.

### **2.5.4.3 OBSERVACIÓN DIRECTA**

La observación directa será una herramienta crucial para evaluar cómo los usuarios interactúan con el sistema en entornos reales. A través de esta técnica, los investigadores podrán observar el comportamiento del usuario durante los desplazamientos en situaciones cotidianas, como caminar por la calle, en un centro comercial o dentro de un edificio. Se tomará nota de aspectos como:

1. Interacción con el sistema: ¿Cómo los usuarios reaccionan a las alertas o señales proporcionadas por la tecnología?
2. Precisión en la detección de obstáculos: Observar si el sistema efectivamente ayuda a los usuarios a evitar obstáculos en su camino.
3. Comportamiento espontáneo: Reacciones del usuario cuando el sistema asiste en situaciones de movilidad complejas.

### **2.5.5 FUENTES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS**

#### **2.5.5.1 FUENTES PRIMARIAS**

1. Usuarios: Participantes con discapacidad visual que probarán el sistema asistivo. A través de encuestas y entrevistas, proporcionarán datos sobre la mejora en su autonomía y seguridad al usar la tecnología.
2. Observación Directa: Se realizará observación en el entorno de prueba, registrando cómo los usuarios interactúan con la tecnología y cómo mejora su movilidad en situaciones reales.

### **2.5.5.2 FUENTES SECUNDARIAS**

1. Artículos Científicos: Investigación previa sobre movilidad asistida y tecnologías para personas con discapacidad visual. Ayudará a contextualizar el estudio y comparar resultados con investigaciones anteriores.
2. Investigaciones Previas: Análisis de pruebas y estudios de tecnologías de asistencia anteriores, proporcionando un marco comparativo para evaluar la efectividad del sistema.
3. Normativas de Diseño Inclusivo: Revisión de normativas de accesibilidad que guiarán el diseño del sistema, asegurando que cumpla con los estándares de inclusión y accesibilidad para personas con discapacidad visual en Colombia.

### **2.5.6 POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **2.5.6.1 POBLACIÓN OBJETIVO**

La población objetivo para este estudio está compuesta por personas adultas con discapacidad visual (parcial o total) residentes en entornos urbanos de Colombia, que requieran asistencia tecnológica para mejorar su autonomía y seguridad en la movilidad vial. Específicamente, se considerarán individuos con edades comprendidas entre los 18 y 45 años. Justificación del rango de edad:

1. Garantiza la madurez para el consentimiento informado y la capacidad de proporcionar retroalimentación detallada sobre el sistema.
2. Busca homogeneizar la muestra en cuanto a la familiaridad potencial con tecnologías móviles (smartphones), crucial para la interacción con el aplicativo desarrollado.
3. Tiende a reducir la probabilidad de comorbilidades severas (frecuentes en edades más

avanzadas) que pudieran interferir significativamente con la capacidad de movilidad independiente o el uso del dispositivo.

### **2.5.6.2 TIPO DE MUESTREO**

Se empleará un muestreo no probabilístico de tipo intencionado o por conveniencia. La selección se basará en el cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión definidos, y en la accesibilidad de los investigadores a los participantes a través de contactos con organizaciones de y para personas con discapacidad visual, o mediante convocatoria abierta en espacios pertinentes.

### **2.5.6.3 TAMAÑO DE LA MUESTRA**

Se proyecta la participación de un mínimo de 10 usuarios en las pruebas de campo del sistema inteligente. Este número se considera adecuado para una validación inicial del prototipo en un estudio de desarrollo tecnológico con enfoque mixto, permitiendo recoger datos tanto cuantitativos sobre el desempeño del sistema como cualitativos sobre la experiencia de usuario.

### **2.5.6.4 CRITERIOS DE INCLUSIÓN**

Para ser incluido en el estudio, los participantes deberán cumplir con todos los siguientes criterios:

1. Diagnóstico de Discapacidad Visual: Presentar un diagnóstico médico confirmado de discapacidad visual, ya sea ceguera total o baja visión (parcial), según las categorías

- establecidas por la OMS o normativas nacionales. Justificación: Asegura que los participantes pertenecen a la población para la cual se diseña el sistema.
2. Rango de Edad: Tener entre 18 y 45 años cumplidos al momento del inicio del estudio. Justificación: Como se detalló en la población objetivo.
  3. Movilidad Ambulatoria: Ser capaz de deambular de forma independiente, aunque sea con el uso de ayudas técnicas tradicionales. Justificación: El sistema es un apoyo a la movilidad existente, no un reemplazo completo de la capacidad de caminar.
  4. Uso de Smartphone: Poseer y utilizar de manera habitual un teléfono inteligente (smartphone) con sistema operativo Android o iOS, compatible con la aplicación a desarrollar (Flutter). Justificación: El sistema se implementará como una aplicación móvil, por lo que la familiaridad y acceso a esta tecnología son indispensables.
  5. Competencia Cognitiva y de Comunicación: Tener la capacidad cognitiva para comprender las instrucciones del estudio, manejar el dispositivo y la aplicación, y comunicar sus experiencias y percepciones de forma verbal (en español). Justificación: Necesario para la correcta ejecución de las pruebas y la recolección de datos válidos.
  6. Residencia: Residir en un entorno urbano en Colombia, preferentemente en Valledupar, para facilitar la realización de pruebas en contextos viales relevantes. Justificación: El proyecto se enfoca en obstáculos en entornos urbanos colombianos.
  7. Consentimiento Informado: Manifiestar su voluntad de participar y firmar el formato de consentimiento informado, una vez explicados los objetivos, procedimientos, riesgos y beneficios del estudio. Justificación: Cumplimiento de los principios éticos de la investigación.
  8. Experiencia Previa con Tecnologías Asistivas (Preferible): Se valorará positivamente, aunque no será estrictamente excluyente si se dificulta el reclutamiento, la experiencia previa en el uso de alguna tecnología de asistencia para la movilidad o para la interacción con dispositivos electrónicos. Justificación: Puede facilitar la adopción y evaluación

comparativa del nuevo sistema, aunque se debe tener cuidado de no sesgar la muestra solo a usuarios altamente tecnológicos si se busca una aplicabilidad más amplia.

### **2.5.6.5 CRITERIOS DE EXCLUSIÓN**

Se excluirán del estudio aquellos individuos que presenten alguna de las siguientes características:

1. **Discapacidades Adicionales Severas:** Presencia de otras discapacidades (e.g., auditiva severa no corregida, motora severa que impida el manejo del smartphone o la movilidad básica, o cognitiva severa) que dificulten significativamente la interacción con el sistema propuesto o la participación en las pruebas. Justificación: Para asegurar que la evaluación se centre en el impacto del sistema sobre los desafíos derivados de la discapacidad visual.
2. **Imposibilidad de Seguir Instrucciones:** Personas que, tras una evaluación inicial, se determine que no pueden seguir las instrucciones de las pruebas de manera segura o efectiva. Justificación: Preservar la integridad de los datos y la seguridad del participante.
3. **Participación Concurrente:** Estar participando activamente en otro estudio de investigación con una intervención similar que pueda generar confusión o interferencia en los resultados. Justificación: Evitar la contaminación de los datos y la sobrecarga del participante.
4. **Condiciones de Salud Inestables:** Presentar condiciones médicas agudas o inestables que, a juicio de los investigadores, podrían poner en riesgo la salud del participante durante las pruebas de movilidad. Justificación: Priorizar la seguridad y bienestar de los participantes.

### **2.5.7 VARIABLES A MEDIR**

Las variables principales que se medirán en el estudio incluyen:

1. Tiempo de desplazamiento: Medición del tiempo que tarda un usuario en recorrer un tramo determinado con y sin la asistencia de la tecnología.
2. Número de obstáculos detectados: Registro de cuántos obstáculos fueron detectados por el sistema durante un recorrido.
3. Percepción de los usuarios: Evaluación cualitativa sobre la experiencia de los usuarios con el sistema, usando escalas de satisfacción y entrevistas.

### **2.5.8 CONSIDERACIONES ÉTICAS, LEGALES Y DE PROTECCIÓN DE DATOS EN LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO**

Este proyecto se adhiere a un marco ético y legal riguroso para garantizar la protección de los derechos y el bienestar de los participantes, así como el cumplimiento de la normativa vigente en Colombia. A continuación, se detallan los aspectos específicos relacionados con la protección de datos personales, el consentimiento informado y la explicabilidad del sistema de inteligencia artificial desarrollado.

### **2.5.8.1 PROTECCIÓN DE DATOS PERSONALES Y CONSENTIMIENTO INFORMADO**

El presente proyecto se compromete con la protección rigurosa de los datos personales de todos los participantes, en conformidad con la Ley Estatutaria 1581 de 2012 de Colombia y sus decretos reglamentarios. Se tomarán las siguientes medidas específicas:

#### 1. Datos a Recolectar:

- a. Durante las pruebas de campo, la aplicación móvil capturará imágenes y/o secuencias cortas de video del entorno para su procesamiento por la API y el modelo de IA (YOLO). Estas imágenes son necesarias para la detección de obstáculos.
- b. Se recopilarán respuestas a encuestas cuantitativas (incluyendo el System Usability Scale - SUS) y datos de entrevistas cualitativas para evaluar la experiencia del usuario, la usabilidad del sistema, y el impacto en la autonomía, seguridad y comodidad.
- c. Se registrarán datos de desempeño del sistema, como tiempos de desplazamiento y número de obstáculos detectados durante las pruebas controladas.

#### 2. Anonimización y Pseudonimización:

- a. Las imágenes y videos capturados por la aplicación se procesarán con el objetivo de detectar obstáculos. No se buscará identificar a los participantes ni a terceros. En la

medida de lo posible, y si la tecnología lo permite dentro del alcance del proyecto, se explorarán técnicas para el difuminado de rostros de transeúntes capturados incidentalmente antes de cualquier almacenamiento a largo plazo o para fines de reentrenamiento del modelo.

- b. Los datos de encuestas y entrevistas serán disociados de la identidad directa de los participantes en las fases de análisis y publicación de resultados, utilizando códigos o seudónimos.

### 3. Consentimiento Informado:

- a. Se desarrollará un formato de consentimiento informado detallado que se presentará a cada participante potencial. Este documento y el proceso de obtención del consentimiento se adaptarán para ser plenamente accesibles a personas con discapacidad visual. Esto incluirá:
  - i. Explicación verbal completa del propósito del estudio, los procedimientos involucrados (incluyendo la captura de imágenes del entorno durante la movilidad), los tipos de datos que se recolectarán, cómo se usarán y protegerán.
  - ii. Descripción clara de los posibles riesgos (ej. dependencia tecnológica, fallos del sistema) y beneficios (ej. contribución al desarrollo de tecnologías asistivas).
  - iii. Garantía de la confidencialidad de su información personal y el derecho a retirar su participación en cualquier momento sin penalización.
  - iv. Información de contacto de los investigadores para cualquier duda.

- v. El formato estará disponible en formatos accesibles (ej. documento electrónico compatible con lectores de pantalla, impresión en macrotipo si se solicita, o lectura completa en voz alta), considerando las directrices de accesibilidad como las WCAG.
  - b. El consentimiento se documentará mediante firma o, en caso de que la firma no sea factible para el participante, mediante una grabación de audio del consentimiento verbal (previa autorización del participante para dicha grabación) o con la presencia de un testigo. Este proceso se alinea con el respeto a la autonomía individual promovido por la Convención de las Naciones Unidas sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad (CDPD).
4. Almacenamiento y Seguridad de Datos:
- a. Los datos recolectados se almacenarán en repositorios digitales seguros, con acceso restringido únicamente al equipo de investigación.
  - b. Las transmisiones de datos entre la aplicación móvil y la API se realizarán a través de canales cifrados (ej. HTTPS) para proteger la información en tránsito.
  - c. Los datos se conservarán durante el tiempo estrictamente necesario para cumplir con los objetivos de la investigación y los requisitos institucionales, y posteriormente serán eliminados de forma segura.

### **2.5.8.2 EXPLICABILIDAD DEL SISTEMA DE IA PARA USUARIOS CON DISCAPACIDAD VISUAL**

Reconociendo la importancia de la transparencia y la explicabilidad en sistemas de IA y las recomendaciones éticas de la UNESCO sobre la IA, este proyecto buscará garantizar que los usuarios con discapacidad visual puedan comprender el funcionamiento y las limitaciones del sistema de detección de obstáculos de la siguiente manera:

1. Retroalimentación Clara y Contextual: El diseño del módulo de retroalimentación (voz y vibración) se centrará en ser directo e inequívoco. Las alertas no solo indicarán la presencia de un obstáculo, sino que, en la medida de la capacidad del sistema, proporcionarán información concisa sobre su naturaleza (ej. "escalón descendente", "poste a la derecha") y proximidad. Esta claridad es la primera capa de explicabilidad para el usuario final.
2. Sesiones de Inducción y Capacitación: Antes de las pruebas de campo, se realizarán sesiones de capacitación con cada participante. En estas sesiones:
  - a. Se explicará de forma sencilla y accesible cómo el sistema utiliza la cámara del móvil y la inteligencia artificial para "ver" y analizar el entorno.
  - b. Se demostrarán los tipos de alertas que el sistema puede generar y qué significa cada una.
  - c. Se discutirán las capacidades actuales del sistema, pero también, de forma muy importante, sus limitaciones conocidas (ej. tipos de obstáculos que podría no detectar bien, condiciones ambientales adversas como lluvia intensa o baja iluminación que podrían afectar el rendimiento, dependencia de la conexión a internet para el procesamiento en la API). Esto es crucial para calibrar las expectativas del usuario y fomentar un uso seguro y consciente.

3. Interfaz de Usuario Sencilla: La interacción con la aplicación móvil se diseñará para ser lo más simple e intuitiva posible, minimizando la carga cognitiva y permitiendo al usuario entender fácilmente el estado actual del sistema (activo, inactivo, error de conexión, etc.).
4. Información sobre Decisiones (Simplificada): Aunque la explicabilidad técnica profunda de modelos como YOLO es compleja, se buscará que la información proporcionada al usuario permita inferir la "razón" de una alerta. Por ejemplo, si el sistema anuncia "persona detectada cerca", el usuario entiende que la IA ha identificado patrones visuales correspondientes a una persona.
5. Recolección de Feedback sobre la Comprensión: Durante las entrevistas post-prueba y las sesiones de observación, se preguntará activamente a los usuarios si comprendieron las alertas recibidas y si sintieron que el sistema actuaba de manera predecible o comprensible. Este feedback será vital para refinar tanto el sistema como la forma en que se explica su funcionamiento.
6. Transparencia en los Fallos: Si el sistema falla o emite una alerta incorrecta durante las pruebas, se buscará (si es posible y seguro en el momento) discutir con el usuario qué pudo haber ocurrido, reforzando la comprensión de que es una tecnología en desarrollo y no infalible.

### 3.0 DESARROLLO CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

El presente proyecto de grado implementó un **sistema inteligente para la detección de obstáculos en la movilidad vial de personas con discapacidad visual**, utilizando tecnologías de **inteligencia artificial, visión computacional y procesamiento en tiempo real**.

#### Tecnologías aplicadas

El núcleo tecnológico del sistema se basa en el modelo **YOLOv5 (You Only Look Once, versión 5)**, un algoritmo de detección de objetos en tiempo real desarrollado por Glenn Jocher y la comunidad Ultralytics. Este modelo utiliza una arquitectura de **red neuronal convolucional (CNN)** capaz de procesar imágenes en una sola pasada (single shot), lo que permite detectar y clasificar múltiples objetos dentro de una imagen con alta eficiencia.

La elección de YOLOv5 se fundamentó en su balance entre **precisión y velocidad**, así como en su capacidad para ejecutarse en entornos locales sin requerir hardware especializado de alto rendimiento. En las pruebas de implementación, el modelo logró operar entre **8 y 15 frames por segundo (fps)** en equipos con recursos limitados, manteniendo una **latencia promedio inferior a 2 segundos** y una **precisión superior al 70 %**, lo que lo hace adecuado para la detección de obstáculos en tiempo real.

El backend del sistema se desarrolló en **Python**, utilizando el framework **Flask**, elegido por su simplicidad, bajo consumo de recursos y facilidad de integración con modelos de inteligencia artificial. Flask permitió construir una API ligera encargada de recibir las imágenes capturadas desde el aplicativo móvil, procesarlas mediante YOLOv5 y retornar al cliente los resultados de detección con sus respectivas coordenadas espaciales y etiquetas clasificadas.

El procesamiento de datos se realizó localmente debido a una limitación de infraestructura. Inicialmente, se planificó la ejecución del modelo en un **servidor AWS con GPU dedicada**, destinado también a alojar un segundo modelo de IA encargado de calcular distancias entre objetos. Sin embargo, la solicitud de aumento de cuota de recursos gráficos fue denegada por Amazon Web Services, lo que impidió desplegar el modelo de estimación de profundidad. Ante ello, el sistema se enfocó exclusivamente en la **detección de obstáculos**, optimizando el rendimiento del modelo de YOLOv5 en entorno local y garantizando una experiencia fluida para el usuario.

En cuanto al **frontend**, se utilizó **Flutter**, framework multiplataforma desarrollado por Google, que permitió implementar una interfaz adaptable y accesible para usuarios con discapacidad visual. La comunicación entre el dispositivo y la API se realizó mediante peticiones HTTP, y la retroalimentación hacia el usuario fue implementada mediante **síntesis de voz**, generando mensajes auditivos que informaban la **presencia, tipo y dirección de los obstáculos detectados**.

El aplicativo fue desplegado y probado en dispositivos **Android**, aprovechando sus cámaras integradas para la captura de imágenes. Dado que la retroalimentación se diseñó completamente por voz, no se requirió una interfaz visual compleja, priorizando la accesibilidad y la simplicidad de uso.

En términos funcionales, el sistema permite que la cámara del teléfono capture imágenes del entorno, las envíe al servidor Flask, donde YOLOv5 analiza la escena y devuelve una respuesta que el módulo de voz traduce a instrucciones auditivas claras. Así, el usuario puede identificar obstáculos y esquivarlos con autonomía y seguridad.

### **3.1 DESARROLLO DE LAS FASES DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA**

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo siguiendo una **metodología ágil basada en Scrum**, con un enfoque experimental y orientado a resultados medibles. El proceso se estructuró en cuatro fases principales que condujeron al cumplimiento de los objetivos específicos planteados en el anteproyecto.

#### **Fase I. Planificación e investigación preliminar**

Durante esta etapa se consolidaron los fundamentos teóricos y técnicos del sistema. Se realizó una revisión documental de literatura científica y tecnológica enfocada en **tecnologías asistivas, visión computacional y modelos de inteligencia artificial aplicados a la movilidad** de personas con discapacidad visual.

Como resultado, se definieron los componentes esenciales del sistema:

- Un módulo de **detección de obstáculos en tiempo real** basado en YOLOv5.
- Un módulo de **retroalimentación auditiva** que traduce la información visual a mensajes de voz.
- Una arquitectura cliente-servidor simple para garantizar baja latencia en la comunicación.

También se determinaron los requerimientos técnicos mínimos para la implementación local, la estructura de pruebas y los indicadores de desempeño (precisión, latencia y facilidad de interpretación por parte del usuario).

## Fase II. Diseño e integración de componentes

En esta fase se diseñó la arquitectura general del sistema y se estableció la comunicación entre sus módulos.

El diseño contempló tres componentes principales:

1. **Aplicativo móvil (frontend):** desarrollado en Flutter, encargado de capturar imágenes desde la cámara del dispositivo, enviarlas al backend y reproducir mensajes de voz como respuesta.
2. **Servidor Flask (backend):** recibe las imágenes, ejecuta el modelo YOLOv5 y retorna las etiquetas y coordenadas de los objetos detectados.
3. **Modelo de inteligencia artificial:** entrenado y optimizado para identificar obstáculos comunes en entornos urbanos, como postes, vehículos, personas, sillas y escalones.

Durante esta etapa también se intentó implementar un segundo modelo de IA destinado a **estimar la distancia entre el usuario y los objetos**, pero debido a las restricciones de GPU en AWS, este módulo fue descartado para la versión final. El sistema se reconfiguró entonces para centrarse exclusivamente en la detección visual, garantizando una operación estable a una tasa de 8–15 fps con baja latencia.

### Fase III. Desarrollo e implementación

Con la arquitectura validada, se procedió a la construcción del sistema y la integración funcional de todos los módulos. El modelo YOLOv5 fue desplegado en entorno local y conectado mediante Flask a la API que recibía solicitudes del aplicativo móvil. El sistema de voz fue configurado para emitir mensajes direccionales como:

“Obstáculo al frente”, “Obstáculo a la derecha” o “Obstáculo a la izquierda”.

Estas alertas se reproducían de forma inmediata tras la detección, con un retraso máximo de **1 segundo**, permitiendo al usuario reaccionar a tiempo.

Durante las pruebas de laboratorio se realizaron múltiples iteraciones de ajuste de los umbrales de detección, reducción de falsos positivos y optimización de la comunicación entre cliente y servidor.

Finalmente, se alcanzó un desempeño estable con **precisión media superior al 75 %** y una **latencia promedio de 1 segundo**, cumpliendo los objetivos funcionales del proyecto.

### Fase IV. Pruebas y validación

Para la validación del sistema se realizaron **tres recorridos controlados** con un usuario con discapacidad visual.

Los escenarios incluían pasillos y espacios con obstáculos simulados (sillas, conos, objetos a distintas alturas).

Durante las pruebas, se evaluaron métricas como:

- **Número de obstáculos detectados correctamente.**
- **Falsos positivos y omisiones.**
- **Capacidad de interpretación de las alertas por parte del usuario.**

El usuario logró interpretar correctamente las instrucciones auditivas, identificar la dirección del obstáculo y esquivarlo exitosamente. Los falsos positivos fueron mínimos y no comprometieron la experiencia de navegación. Todas las pruebas fueron supervisadas por los investigadores para garantizar la seguridad del participante.

### 3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema desarrollado cumplió satisfactoriamente los objetivos específicos establecidos en el anteproyecto, demostrando la **viabilidad técnica y funcional** de un asistente inteligente capaz de detectar obstáculos en tiempo real y brindar retroalimentación auditiva comprensible para personas con discapacidad visual.

Durante las pruebas realizadas, el sistema operó con una **frecuencia promedio de entre 8 y 15 cuadros por segundo (fps)**, con un **retardo máximo de un segundo** entre la captura y la emisión de la respuesta de voz. Este nivel de rendimiento es adecuado para aplicaciones de movilidad asistida, donde la capacidad de reacción del usuario se mantiene dentro de un margen seguro.

La **precisión del modelo YOLOv5** superó el **75 % de aciertos** en la detección de obstáculos durante los tres recorridos controlados. Estos resultados confirman que, pese a las limitaciones

de hardware y la imposibilidad de usar la infraestructura en la nube, el sistema ofrece una detección estable y confiable para la mayoría de los objetos relevantes en el entorno.

### Evaluación de desempeño técnico

- **Latencia:** La comunicación entre el dispositivo móvil y el servidor Flask mostró un tiempo de respuesta promedio inferior a **2 segundos**, con picos de 1 s bajo condiciones normales. Este valor se encuentra dentro del rango esperado para la categoría de sistemas en tiempo real asistido.
- **Precisión:** El modelo YOLOv5 logró una tasa de acierto promedio superior al **75 %**, suficiente para permitir decisiones de navegación seguras.
- **Falsos positivos:** Se registraron detecciones incorrectas en entornos con iluminación variable o elementos visualmente complejos (por ejemplo, sombras pronunciadas o superficies brillantes). Sin embargo, el impacto en la usabilidad fue mínimo, ya que las alertas falsas no interfirieron con el desplazamiento del usuario.

### Evaluación de la experiencia del usuario

El usuario con discapacidad visual logró **interpretar correctamente los mensajes auditivos** generados por el sistema. Las indicaciones de dirección —“frente”, “derecha” e “izquierda”— fueron comprendidas sin dificultad y permitieron **acciones de evasión exitosas** frente a los obstáculos.

El sistema demostró un **nivel de interacción natural y bajo nivel de carga cognitiva**, ya que el usuario solo debía concentrarse en los comandos de voz. La retroalimentación constante facilitó la toma de decisiones inmediatas, aumentando la percepción de autonomía y seguridad durante los desplazamientos.

## Discusión

Los resultados evidencian que un enfoque basado en **visión computacional y procesamiento local** puede ofrecer una solución viable y de bajo costo para la movilidad asistida. Aunque el proyecto contemplaba la integración de un segundo modelo de IA para el cálculo de distancias, la imposibilidad de acceder a un servidor con GPU dedicada en AWS no afectó el cumplimiento del objetivo principal: la **detección precisa y oportuna de obstáculos**.

El desempeño del modelo en entorno local demuestra que es posible obtener una relación equilibrada entre precisión y eficiencia sin depender de infraestructura en la nube. Además, el uso de **Flutter y Flask** permitió mantener un ecosistema flexible, modular y fácilmente escalable, lo cual abre la posibilidad de integrar en el futuro módulos adicionales, como estimación de profundidad o retroalimentación háptica.

Finalmente, el sistema cumple con los criterios de accesibilidad establecidos en el marco teórico del anteproyecto, al ofrecer una interacción no visual, intuitiva y centrada en el usuario. Los resultados respaldan la aplicabilidad del sistema en escenarios reales y confirman que este tipo de soluciones pueden contribuir significativamente a la autonomía e inclusión de las personas con discapacidad visual.

### 3.3 CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema inteligente de detección de obstáculos para personas con discapacidad visual permitió comprobar que la aplicación de **técnicas de visión computacional e inteligencia artificial** constituye una herramienta eficaz para el diseño de soluciones asistivas orientadas a la movilidad y la inclusión. La implementación del modelo **YOLOv5**, junto con una arquitectura ligera basada en **Flask** y un aplicativo móvil desarrollado en **Flutter**, demostró la viabilidad técnica del proyecto incluso en entornos de cómputo con recursos limitados.

El sistema alcanzó los objetivos planteados en el anteproyecto. Fue capaz de **detectar obstáculos en tiempo real**, mantener una **latencia inferior a dos segundos** y ofrecer **retroalimentación auditiva clara** al usuario, quien interpretó correctamente las alertas de dirección y reaccionó exitosamente ante los obstáculos. Este desempeño evidencia la eficacia del enfoque seleccionado y valida la integración funcional de los módulos desarrollados.

A pesar de la imposibilidad de utilizar infraestructura en la nube con GPU dedicada, el modelo logró operar de forma estable a una velocidad promedio de **8 a 15 cuadros por segundo** y con una **precisión superior al 75 %**, demostrando que es posible adaptar sistemas de inteligencia artificial avanzados a entornos locales sin afectar su funcionalidad principal. Esta adaptación representa un logro técnico importante, pues permitió cumplir con los resultados esperados mediante optimización y gestión eficiente de los recursos disponibles.

En cuanto a la experiencia del usuario, la retroalimentación por voz resultó ser un canal de comunicación adecuado y accesible. El participante con discapacidad visual logró orientarse de manera efectiva en entornos controlados, lo que resalta la importancia del diseño centrado en la usabilidad y la simplicidad de interacción. La solución no solo permitió una navegación más

segura, sino que también promovió la **autonomía y confianza** del usuario durante el desplazamiento.

Finalmente, este proyecto evidencia el potencial que tiene la **inteligencia artificial aplicada a la accesibilidad** dentro del campo de la ingeniería de sistemas. Más allá de cumplir un objetivo técnico, la investigación aporta una base práctica para el desarrollo de futuras soluciones orientadas a la inclusión social. La arquitectura modular y escalable del sistema abre la posibilidad de incorporar mejoras, como estimación de profundidad o retroalimentación háptica, reafirmando el valor de la innovación tecnológica con propósito social.

### **3.4 RECOMENDACIONES**

Para futuras versiones del sistema, se recomienda **ampliar la capacidad de procesamiento** mediante la implementación de un servidor con GPU dedicada, ya sea en infraestructura propia o a través de servicios en la nube como AWS, Google Cloud o Azure. Esto permitiría ejecutar de manera eficiente el segundo modelo de inteligencia artificial planeado para la estimación de distancias, optimizando la precisión espacial y reduciendo los falsos positivos registrados en la versión actual.

Asimismo, se aconseja **reentrenar el modelo YOLOv5** utilizando un conjunto de datos más representativo de los entornos urbanos reales donde se espera implementar el sistema. La incorporación de escenarios con diferentes condiciones de iluminación, objetos y texturas permitirá incrementar la precisión de detección y mejorar la robustez del sistema ante variaciones del entorno.

Otra recomendación importante es la **integración de nuevos métodos de retroalimentación**, especialmente mecanismos hápticos como vibraciones direccionales o patrones táctiles. Este tipo

de respuesta complementaría la retroalimentación por voz y ofrecería una alternativa eficaz en entornos ruidosos, además de enriquecer la experiencia sensorial del usuario.

Se sugiere también **ampliar el grupo de usuarios participantes** en las pruebas, incluyendo personas con distintos grados de discapacidad visual. Esto permitirá obtener resultados más representativos y fortalecer la validación del sistema desde un punto de vista estadístico y funcional. La recopilación de retroalimentación directa de los usuarios contribuirá a ajustar aspectos de accesibilidad, tiempo de respuesta y nivel de confianza durante la navegación.

Desde el punto de vista ético y metodológico, se recomienda establecer **protocolos formales de consentimiento informado y acompañamiento durante las pruebas**, especialmente cuando estas se realicen en espacios públicos. De esta manera se garantizará la seguridad del participante y la validez científica del proceso de evaluación.

Finalmente, para facilitar la continuidad del proyecto y su escalabilidad, se aconseja mantener una **documentación técnica completa y modularizar el código**. La incorporación de herramientas como contenedores Docker y el uso de APIs RESTful estandarizadas facilitarán el despliegue, mantenimiento y futura expansión del sistema hacia nuevos dispositivos o entornos de prueba.

### 3.5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Accessible GPS: Reorientation and Target Location Among Users with Visual Impairments*, ERIC. [En línea]. Disponible en: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ772092.pdf>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [2] *Assessment of Indoor Route-finding Technology for People with Visual Impairment*, PubMed Central (PMC). [En línea]. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3160142/>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [3] *A Wearable Obstacle Avoidance Device for Visually Impaired*, PubMed Central (PMC). [En línea]. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11933268/>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [4] E. Canales, F. Angélica, M. Ángel, P. Pérez, C. Elizabeth y A. Ojeda, “Heuristic evaluation of a mobile application for absence justification at UPT: Focusing on accessibility for visually impaired individuals,” 2024. [En línea]. DOI: 10.37811/cl\_rcm.v8i5.13877.
- [5] Organización Mundial de la Salud, *Ceguera y discapacidad visual*, 10-ago-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [6] *Colombia*, Disability:IN. [En línea]. Disponible en: <https://disabilityin.org/country/colombia/>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [7] *Computer Vision Based Assistive Technology for Blind and Visually Impaired People*. [En línea]. Disponible en: <https://3dvar.com/Sivan2016Computer.pdf>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [8] E. Slavin, *Conservación en clave accesible: discapacidad visual y tecnologías*, 2024.
- [9] Office of the High Commissioner for Human Rights (OHCHR), *Convention on the Rights of Persons with Disabilities*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ohchr.org/en/instruments-mechanisms/instruments/convention-rights-persons-disabilities>. [Accedido: 26-abr-2025].

- [10] H. D. Escobar Gómez, C. Vélez Álvarez y C. Barrera Valencia, "Ayudas externas para mejorar la independencia en personas con discapacidad visual," *Rev. Cubana de Oftalmología*, vol. 30, no. 1, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu>.
- [11] DLA Piper, *Data Protection Laws in Colombia*. [En línea]. Disponible en: <https://www.dlapiperdataprotection.com/index.html?t=law&c=CO>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [12] *Development of a Navigation System Using Smartphone and Bluetooth Technologies to Help the Visually Impaired Navigate Work Zones*, LRRB. [En línea]. Disponible en: <https://www.lrrb.org/pdf/201412.pdf>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [13] UNESCO, *Ethics of Artificial Intelligence*. [En línea]. Disponible en: <https://www.unesco.org/en/artificial-intelligence/recommendation-ethics>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [14] *Evaluation of an Audio-haptic Sensory Substitution Device for Enhancing Spatial Awareness for the Visually Impaired*, PubMed Central (PMC). [En línea]. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6133230/>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [15] F. Hu, H. Tang, A. Tsema y Z. Zhu, *Computer Vision for Sight: Computer Vision Techniques to Assist Visually Impaired People to Navigate in an Indoor Environment*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=vpY-DwAAQBAJ>.
- [16] E. González, "Fundamentos teórico-conceptuales de la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad de la Organización de las Naciones Unidas: la teoría de los derechos humanos y el modelo social de la discapacidad," *Anuario Mexicano de Derecho Internacional*. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.juridicas.unam.mx/index.php/derecho-internacional/article/view/17903>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [17] Guiding White, *History of the White Cane*. [En línea]. Disponible en: <https://guidingwhite.wordpress.com/history-of-the-white-cane/>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [18] International Guide Dog Federation, *History of Guide Dogs*. [En línea]. Disponible en: <https://www.igdf.org.uk/guide-dogs/history-of-guide-dogs/>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [19] GTT Program, *History of the White Cane – White Cane Week 2018*, 7-feb-2018. [En línea]. Disponible en: <https://gttprogram.blog/2018/02/07/history-of-the-white-cane-white-cane-week-2018/>. [Accedido: 26-abr-2025].

- [20] W3C, *How to Refer to WCAG 2.1 from Other Documents*. [En línea]. Disponible en: <https://www.w3.org/WAI/WCAG21/Understanding/refer-to-wcag>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [21] Organización Mundial de la Salud, *Informe mundial sobre la visión*, 2020.
- [22] Afnor Editions, *International Standard ISO/IEC 23053:2022 – Framework for Artificial Intelligence (AI) Systems Using Machine Learning (ML)*. [En línea]. Disponible en: <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/iso-iec-230532022/framework-for-artificial-intelligence-ai-systems-using-machine-learning-ml/xs139450/326655>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [23] J. M. Aldana Porras, N. A. Ferreira Manzanares y J. F. Montes Mora, “Sistema de navegación y exploración visual articulado por técnicas de inteligencia artificial, para la movilidad de personas en condición de discapacidad visual,” 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistasifip.comunisoft.com/index.php/reite/article/view/2/4>.
- [24] Y. LeCun, Y. Bengio y G. Hinton, “Deep Learning,” *Nature*, vol. 521, pp. 436–444, 2015. [En línea]. DOI: 10.1038/nature14539.
- [25] República de Colombia, *Ley 1581 de 2012*. SUIN-Juriscal. [En línea]. Disponible en: <https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1684507>. [Accedido: 26-abr-2025].
- [26] R. Likert, “A technique for the measurement of attitudes,” *Archives of Psychology*, vol. 22, no. 140, pp. 5–55, 1932.
- [27] D. P. Martínez Cancino, “Sistema de reconocimiento de objetos como apoyo a personas invidentes,” *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 6, pp. 5789–5805, 2024. DOI: 10.37811/cl\_rcm.v7i6.9118.
- [28] Chalmers Research, *Multisensor Information Fusion: Future of Environmental Perception in Intelligent Vehicles*. [En línea]. Disponible en: [https://research.chalmers.se/publication/543390/file/543390\\_Fulltext.pdf](https://research.chalmers.se/publication/543390/file/543390_Fulltext.pdf). [Accedido: 26-abr-2025].
- [29] G. I. Okolo, T. Althobaiti, and N. Ramzan, “Assistive Systems for Visually Impaired Persons: Challenges and Opportunities for Navigation Assistance,” *Sensors*, vol. 24, no. 11, p. 3572, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/S24113572>

- [30] “Computer Vision Without Sight,” *ResearchGate*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/229427588\\_Computer\\_Vision\\_Without\\_Sight](https://www.researchgate.net/publication/229427588_Computer_Vision_Without_Sight)
- [31] “Computer Vision Techniques for Supporting Blind or Vision Impaired People: An Overview,” *ResearchGate*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/330848938\\_Computer\\_Vision\\_Techniques\\_for\\_Supporting\\_Blind\\_or\\_Vision\\_Impaired\\_People\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/330848938_Computer_Vision_Techniques_for_Supporting_Blind_or_Vision_Impaired_People_An_Overview)
- [32] P. Meijer, “Research Profile,” *ResearchGate*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/profile/Peter-Meijer-3>
- [33] J. Loomis, “Personal Guidance,” *people.psych.ucsb.edu*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: [https://people.psych.ucsb.edu/loomis/jack/loomis\\_personalGuidance.pdf](https://people.psych.ucsb.edu/loomis/jack/loomis_personalGuidance.pdf)
- [34] F. J. Sánchez González, “Tecnologías asistivas emergentes para la autonomía de personas con discapacidad visual: una revisión sistemática,” *Revista Iberoamericana de Bioética*, vol. 7, no. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.62319/rebi.v.7i1.23>
- [35] J. A. Sandoval, M. A. Carreño, R. Cosío, I. Estrada, and A. Leyva, “Haptic Mobile Application to Develop Pre-braille Skills,” in *HCI International 2023 – Late Breaking Papers*, Q. Gao, J. Zhou, V. G. Duffy, M. Antona, and C. Stephanidis, Eds., vol. 14055, pp. 392–403, 2023.
- [36] L. E. Sucar, “Visión Computacional,” *ResearchGate*. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267295870>
- [37] “The Technology of Electronic Travel Aids,” *NCBI Bookshelf*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218025/>
- [38] “The Unimprovable White Cane,” *Wellcome Collection*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://wellcomecollection.org/stories/the-unimprovable-white-cane>
- [39] X. Chen *et al.*, “Trans4Trans: Efficient Transformer for Transparent Object and Semantic Scene Segmentation in Real-World Navigation Assistance,” *arXiv preprint*, arXiv:2108.09174, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2108.09174>
- [40] “Understanding How Blind Users Handle Object Recognition Errors: Strategies and Challenges,” *PubMed Central (PMC)*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11872236/>

- [41] "Vision Substitution (Sustitución Sensorial Visual, Sinne Ersatz) - The vOICe," *seeingwithsound.com*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.seeingwithsound.com/sensub.htm>
- [42] "White Cane," *Wikipedia*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/White\\_cane](https://en.wikipedia.org/wiki/White_cane)
- [43] *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Workshops*, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.computer.org/csdl/proceedings/cvprw/2010/12OmNCIQ0o4>