

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**PLANIFICACIÓN DE RUTAS ACCESIBLES PARA PERSONAS CON  
DISCAPACIDAD VISUAL UTILIZANDO PROGRAMACIÓN LINEAL  
ENTERA Y EL ALGORITMO DE DIJKSTRA**

Tesis para optar el título de Ingeniero Industrial

**AUTOR**

Marco Antonio Aragón Loza

**ASESOR:**

Christian Santos Cornejo Sánchez

Lima, julio, 2021

## Resumen

Esta investigación revela que los factores que caracteriza la situación de exclusión que afrontan las personas con discapacidad en el entorno urbano son las barreras físicas como los obstáculos en las veredas y el diseño urbanístico inadecuado de las vías de tránsito. Asimismo, según el Banco Mundial (2018) esta situación de exclusión no les permite acceder a un empleo, lo que origina tasas altas de pobreza y privación. Según el INEI (2018c), las personas con discapacidad en el Perú integran una parte de la población vulnerable y se caracteriza por una alta tasa de pobreza (22.8%). En el Perú hay 3 051 612 de personas que sufren de alguna discapacidad (el 10.4% de la población total) donde la discapacidad más frecuente es la discapacidad visual con 1 473 583 personas (INEI, 2018b).

La revisión de la literatura de este trabajo de investigación revela las diversas soluciones que se han planteado utilizando algoritmos de optimización de rutas. Estos algoritmos no se encargan de resolver el clásico problema de la ruta de caminos mínimo, sino de encontrar una ruta que sea accesible para un peatón con discapacidad visual. Esta tesis usa el algoritmo Dijkstra para minimizar una función de costos que incluye parámetros valorados por las personas con discapacidad visual como la cantidad de esquinas en la ruta, cantidad de barreras, cantidad de claves ambientales y cantidad de puntos de ayuda.

El modelo obtiene rutas que permiten una mejor accesibilidad en el tránsito de las personas con discapacidad visual. Estas rutas incluyeron más elementos de apoyo (hasta seis esquinas, tres claves ambientales y cuatro puntos de ayuda adicionales) que la ruta más corta, lo cual permite al peatón invidente una mejor orientación. Además, se evitaron obstáculos que las personas con discapacidad visual consideran peligrosos: hasta ocho barreras menos que en la ruta corta. Por otro lado, las rutas accesibles resultan más largas que la ruta más corta (hasta 596 metros adicionales en total). Por último, estos resultados demuestran que los parámetros incluidos en el modelo generan rutas óptimas en términos de accesibilidad para un peatón invidente.

## **Agradecimientos**

A mi asesor, el Ing. Christian Cornejo, quien me ha asesorado y guiado con paciencia en el proceso de investigación.

A mi familia, por ayudarme cada vez que lo necesitaba y por demostrarme que siempre estarán cerca.

A los coordinadores de CERCIL, que colaboraron en compartir su información y me mostraron su apoyo en la elaboración de esta tesis.



## Tabla de contenidos

Tabla de contenidos .....	iii
Índice de figuras.....	vi
Índice de tablas .....	ix
Introducción .....	1
Capítulo 1. Descripción de la problemática y diagnóstico de la situación .....	3
1.1. Problemática.....	3
1.1.1. Panorama general sobre aspectos económicos y de desarrollo de los discapacitados.....	3
1.1.2. Situación demográfica de las personas con discapacidad en el Perú.....	6
1.1.3. Situación socioeconómica de las personas con discapacidad en el Perú.....	9
1.1.4. Situación de accesibilidad para personas con discapacidad en el Perú .....	12
1.1.5. Situación de las instituciones encargadas de apoyar a las personas con discapacidad en el Perú.....	15
1.2. Iniciativas a favor de las personas con discapacidad .....	17
1.3. Diagnóstico.....	19
Capítulo 2. Propuesta de modelo .....	21
2.1. Estudios previos .....	21
2.1.1. Algoritmo de Dijkstra utilizado en un ruteo para personas con discapacidad visual utilizando función de costos multicriterio.....	23
2.1.2. Algoritmo multiobjetivo basado en <i>Artificial Bee Colony</i> (ABC) para planificación de rutas.....	27

2.1.3. Estrategias de ruta multicriterio utilizando el algoritmo de Dijkstra ( <i>RouteCheckr</i> ).....	29
2.1.4. Selección de ruta para peatones ciegos utilizando el algoritmo Dijkstra ....	31
2.1.5. Planificación de rutas para personas ciegas con <i>Particle Swarm</i> <i>Optimization</i> (PSO) .....	34
2.1.6. Utilización del algoritmo A* para un sistema de navegación para personas con discapacidad visual .....	36
2.2. .Estudios del problema de movilidad de personas con discapacidad visual en Lima Metropolitana .....	37
2.2.1. Movilidad urbana, espacio público y ciudadanos sin autonomía en Lima ..	37
2.2.2. Estudio cualitativo .....	38
2.2.3. Encuesta realizada a personas con discapacidad visual en Lima .....	42
2.3. Planteamiento del problema .....	45
2.4. Metodología de trabajo.....	47
2.5. Supuestos.....	49
2.6. Formulación del modelo.....	50
2.7. Modelación matemática .....	55
2.8. Aplicación del algoritmo Dijkstra .....	56
Capítulo 3. Discusión de los resultados .....	61
3.1. Resolución del modelo con el Hospital Arzobispo Loayza como destino .....	61
3.1.1. Escenario 1 .....	62
3.1.2. Escenario 2.....	64

3.2. Resolución del modelo con el Hospital María Auxiliadora como destino.....	67
3.2.1. Escenario 1.....	67
3.2.2. Escenario 2.....	70
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones .....	77
4.1. Conclusiones .....	77
4.2. Recomendaciones.....	79
Bibliografía .....	81



## Índice de figuras

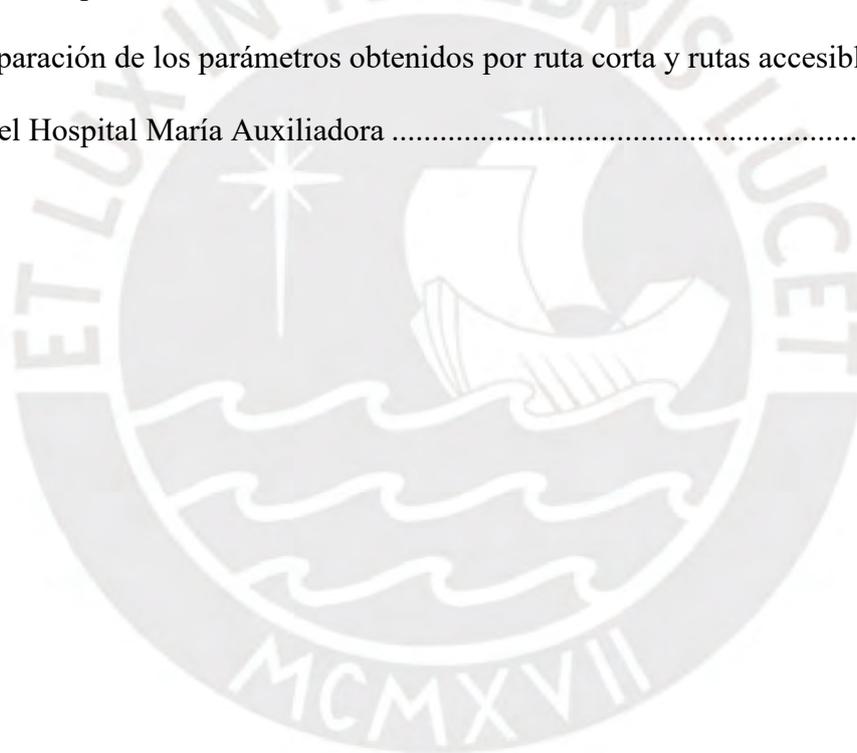
Figura 1. Población censada por tipo de discapacidad. ....	7
Figura 2. Prevalencia de edad en la población con discapacidad. ....	8
Figura 3. Origen de la discapacidad.....	8
Figura 4. Dificultades para conseguir trabajo en personas con discapacidad.....	10
Figura 5. Nivel de educación alcanzado por la población con discapacidad de 15 años a más. .....	11
Figura 6. Pago mensual por el apoyo prestado a personas con discapacidad dependientes. ...	11
Figura 7. Tareas en las que personas con discapacidad son dependientes.....	12
Figura 8. Personas con discapacidad que tienen dificultad para ingresar o desplazarse en establecimientos públicos. ....	13
Figura 9. Tipo de desplazamiento por tipo de discapacidad.....	13
Figura 10. Estado de las vías por las cuales las personas con discapacidad se desplazan.....	14
Figura 11. Percepción del estado de las vías donde las personas con discapacidad se desplazan según tipo de discapacidad.....	14
Figura 12. Percepción de infraestructura adecuada en construcciones de uso público según tipo de discapacidad.....	15
Figura 13. Conocimiento de organismos, instituciones o asociaciones de apoyo a la persona con discapacidad.....	16
Figura 14. Personas con discapacidad inscritas al CONADIS. ....	16
Figura 15. Zonas mapeadas con la herramienta Open Street Map. ....	25
Figura 16. Las posibles rutas trazadas por el algoritmo Dijkstra.....	26
Figura 17. Cobertura de luz de un camino.....	27
Figura 18. Ratio de afluencia de gente en el camino. ....	27
Figura 19. Ejemplo de rutas para llegar de un punto de origen a un punto de destino.....	28

Figura 20. Gráfica con los pesos para cada camino.....	30
Figura 21. Asignación de pesos en la función de coste. ....	30
Figura 22. Las rutas brindadas según la preferencia de <i>POI</i> , <i>LM</i> o <i>VP</i> . ....	32
Figura 23. Pesos asignados al ancho de las aceras.....	33
Figura 24. Funcionamiento del algoritmo PSO. ....	34
Figura 25. Flujo de trabajo del algoritmo A* en el sistema. ....	36
Figura 26. El invidente identifica la esquina como intersección de calles. ....	39
Figura 27. El invidente no puede identificar un borde inadecuado en una intersección. ....	39
Figura 28. Entrada de playa de estacionamiento sin señalización adecuada para invidentes. .	40
Figura 29. Colegio como clave ambiental detectada por el sentido de la audición. ....	41
Figura 30. Centro comercial como clave ambiental detectado por el sentido de la audición. .	41
Figura 31. Invidente solicita ayuda para cruzar en una intersección con semáforos y paraderos. ....	42
Figura 32. Preferencia de los encuestados por un tipo de camino. ....	43
Figura 33. Claves ambientales más frecuentes para personas invidentes. ....	43
Figura 34. Obstáculos más frecuentes para personas invidentes. ....	44
Figura 35. Uso de las señales peatonales accesibles para personas invidentes. ....	45
Figura 36. Elementos alrededor del Hospital Arzobispo Loayza mapeado mediante OSM. ..	48
Figura 37. Ruta con nodos por corregir, extraído mediante el lenguaje de programación Python. ....	48
Figura 38. Tramos con el valor asignado mediante la función de coste multicriterio. ....	49
Figura 39. Definición de la función que construirá el algoritmo de optimización. ....	49
Figura 40. Inputs que ingresan a la función. ....	57
Figura 41. Diccionario de Python que indica los costes entre vértices. ....	57
Figura 42. Asignación de etiquetas a los vértices en la primera iteración. ....	58

Figura 43. Iteraciones de la función en cada vértice.....	58
Figura 44. Actualización del arreglo D.....	58
Figura 45. Almacenamiento de los vértices de la ruta óptima en el arreglo P.....	59
Figura 46. Algoritmo Dijkstra codificado en Python.....	59
Figura 47. Mapeo de los alrededores del Hospital Arzobispo Loayza .....	61
Figura 48. Rutas encontradas por el algoritmo para el escenario 1 del Hospital Arzobispo Loayza.....	62
Figura 49. Rutas encontradas por el algoritmo para el escenario 2 del Hospital Arzobispo Loayza.....	65
Figura 50. Mapeo realizado alrededor del Hospital María Auxiliadora. ....	67
Figura 51. Rutas encontradas por el algoritmo para el escenario 1. ....	68
Figura 52. Rutas encontradas por el algoritmo para el escenario 2. ....	70
Figura 53. Comparación de la longitud total entre las rutas accesible con la ruta corta.....	73
Figura 54. Comparación de cantidad de esquinas entre las rutas accesibles con las rutas cortas. ....	73
Figura 55. Comparación de la cantidad de barreras entre las rutas accesibles con las rutas cortas. ....	74
Figura 56. Comparación de cantidad de claves ambientales entre las rutas accesibles con las rutas cortas. ....	75
Figura 57. Comparación de cantidad de puntos de ayuda entre las rutas accesibles con las rutas cortas. ....	75

## Índice de tablas

Tabla 1 Calificaciones de importancia de cada variable en porcentaje asignado por los coordinadores de CERCIL .....	53
Tabla 2 Comparación de los parámetros obtenidos por ruta corta y rutas accesibles en el escenario 1 del Hospital Arzobispo Loayza.....	63
Tabla 3 Comparación de los parámetros obtenidos por ruta corta y rutas accesibles en el escenario 2 del Hospital Arzobispo Loayza.....	66
Tabla 4 Comparación de los parámetros obtenidos por ruta corta y rutas accesibles en el escenario 1 del Hospital María Auxiliadora .....	69
Tabla 5 Comparación de los parámetros obtenidos por ruta corta y rutas accesibles en el escenario 2 del Hospital María Auxiliadora .....	71



## Introducción

Este trabajo de investigación tiene como objetivo formular y resolver un modelo de programación lineal entera que obtenga rutas óptimas en términos de accesibilidad para personas con discapacidad visual. Según Karimi y Ghafourian (2010) es necesario que se cumplan con las necesidades de las personas con discapacidad para que una ruta sea catalogada como accesible.

En el primer capítulo se describe la problemática del tránsito seguro y accesible de las personas con discapacidad en un entorno urbano, y el impacto negativo que tiene sobre el ámbito social, económico y laboral de esta población. También se revisan las iniciativas que toman otros países para mitigar esta problemática. Se realiza el diagnóstico de la situación en la que se encuentran las personas con discapacidad visual en el Perú.

Posteriormente, en el segundo capítulo se desarrolla la revisión de la literatura. En este capítulo se presentan investigaciones de modelos y algoritmos utilizados para la problemática del tránsito de personas invidentes. Se explican las modificaciones o consideraciones que se realizan en las investigaciones para adaptar el problema a una persona con discapacidad visual. Asimismo, se presenta los parámetros que se consideran en esta investigación para obtener una ruta accesible son definidos por expertos en movilidad y orientación de personas invidentes así como el análisis realizado sobre la movilidad de peatones invidentes con base en entrevistas realizadas a expertos y una encuesta realizada a personas con discapacidad visual en la ciudad de Lima. Luego, se presenta el planteamiento del modelo que se utiliza con base en la literatura revisada.

En el tercer capítulo se aplica un modelo de programación lineal entera en dos escenarios (el hospital Arzobispo Loayza y el hospital María Auxiliadora), se resuelve el modelo con el algoritmo de Dijkstra y se presentan las rutas obtenidas por el modelo y que utiliza los pesos de importancia de cada experto en movilidad de personas invidentes. Se comparan los resultados obtenidos en cada ruta y se utilizan los parámetros de accesibilidad definidos por los expertos.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones obtenidas del análisis de resultados y recomendaciones para la mejora del modelo, con base en la literatura y las propias recomendaciones de la encuesta a personas con discapacidad visual revisadas en el capítulo 2.



## **Capítulo 1. Descripción de la problemática y diagnóstico de la situación**

### **1.1. Problemática**

Se presenta la problemática de la situación de inaccesibilidad de las personas con discapacidad hacia entornos urbanos y el impacto negativo que genera en ámbitos económicos, laborales y sociales.

#### **1.1.1. Panorama general sobre aspectos económicos y de desarrollo de los discapacitados**

En el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobó la Agenda Sostenible para el año 2030, esta agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales buscan que los países y sociedades puedan mejorar la vida de todos los ciudadanos (Organización de las Naciones Unidas [ONU], s.f.a). Entre estos 17 ODS se destacan el de Reducción de Desigualdades y el de Ciudades y Comunidades Sostenibles; en ambas sus metas incluyen la importancia de incluir a las personas con discapacidad.

Respecto al ODS de Reducción de Desigualdades, la ONU (s.f.b) refiere que las desigualdades han aumentado (e intensificado a raíz de la pandemia generada por el COVID-19), esto afecta a las personas que pertenecen a poblaciones vulnerables sobre todo las que pertenecen a países con sistemas de salud precarios o países que actualmente sufren crisis humanitarias. Dentro de este grupo de personas vulnerables se encuentran las personas con discapacidad que presentan dificultades como el riesgo de ser excluidos en los momentos de crisis y tienen hasta cinco veces más de probabilidades de incurrir en gastos de salud muy altos. Respecto a las personas con discapacidad, el Banco Mundial (2018) refiere lo siguiente:

Actualmente las personas con discapacidad presentan dificultades para acceder a entornos urbanizados, desde carreteras y viviendas hasta edificios y espacios públicos, así como a servicios básicos como sistemas de saneamiento y agua, salud, educación y transporte. Esta falta de accesibilidad impide la participación de la población con discapacidad en el

mercado laboral, en actividades sociales y cívicas. Esto genera como resultado una situación desventajosa y de vulnerabilidad para las personas con discapacidad, lo que genera tasas desproporcionada de pobreza, privación y exclusión. (p. 23)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2010) indica que las personas con discapacidad tienen salarios muy bajos, y a pesar de que pueden recibir algún beneficio económico en caso se encuentren desempleados, tienen tasas de pobreza más altas e incluso el doble que la población general.

En el ámbito laboral, la Organización Mundial de la Salud [OMS] (2011) indica que las personas con discapacidad tienen una mayor probabilidad de desempleo y debido a esta menor participación económica presentan tasas más altas de pobreza que las personas sin discapacidad. Asimismo, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] (2017) señala también que si están laborando, “tienen mayor probabilidad de tener empleos mal remunerados, con limitadas perspectivas profesionales” (p. 187), y como consecuencia, “las personas con discapacidad experimentan tasas de desempleo más altas y una mayor probabilidad de ser económicamente inactivas que las personas sin discapacidad” (p. 187).

Sobre las causas de la situación desfavorable descrita, la Organización Internacional de Trabajo (OIT, 2015, p. vii) señala que “la falta de igualdad de oportunidades de empleo para las personas con discapacidad constituye una de las causas subyacentes de la pobreza y la exclusión de dichas personas”. Por otro lado, Zuñiga (2015) identifica varios factores que son obstáculos para los discapacitados para acceder a un empleo y los clasifica en tres niveles: contexto individual, contexto social y contexto físico. En el individual, señala entre otros factores a reducidas habilidades blandas y baja calificación técnica; al respecto la CEPAL (2017) afirma que las personas con discapacidad tienen menos logros educativos que las que no las tienen. En el contexto social Zuñiga (2015) reseña a las bajas expectativas familiares y de los empleadores. Finalmente, en el contexto físico Zuñiga (2015, p. 28) menciona un factor –que en particular está estrechamente

relacionado al tema de estudio de esta tesis—: las “grandes distancias entre los lugares de trabajo y la residencia en donde habitan”.

En la situación actual afectada por la pandemia del COVID-19, la CEPAL (2020b) afirma que las personas con discapacidad estarán entre las más afectadas; sin embargo, antes de la pandemia ya se ubicaban entre las más excluidas. En particular, advierte que aquellos discapacitados que habitan en residencias comunitarias son especialmente vulnerables debido a las limitaciones para lograr el distanciamiento social de esos establecimientos.

Con respecto a la situación laboral en el Perú, según el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo [MTPE] (2020) el impacto del COVID-19 sobre el empleo sería negativo. El MTPE refiere que las proyecciones realizadas por el Banco Central de Reserva [BCRP], Macroconsult y Apoyo Consultoría sobre la población económicamente activa (PEA) con respecto al año 2019 son negativas; para el BCRP se tendrá un decrecimiento de la PEA de 885 000 personas, para Macroconsult el decrecimiento será de 583 000 personas, mientras que para Apoyo Consultoría indica que se reducirá en 899 000 personas donde los sectores más golpeados serían los de servicios y comercio. En particular, la población con discapacidad es uno de los sectores de la sociedad que tiene probabilidades de verse duramente afectado en momentos de crisis global económica (Huete, Sola, & Díaz, 2009); al respecto la CEPAL (2020a) revela en una encuesta aplicada en varios países de América Latina que el 88% de los encuestados indicó que las personas con discapacidad están en general viviendo una situación peor que antes del COVID-19<sup>1</sup> y el 54.6% valoró como mínimas las medidas de protección especial a los puestos de trabajo de las personas con discapacidad.

Sobre el gasto en salud, según Blanco (2010) la evidencia empírica sugiere que es mayor para personas con discapacidad. Asimismo, la OMS (2011) afirma que la atención de los problemas

---

<sup>1</sup> Los tipos de encuestados pertenecen a tres de los siguientes grupos: personas con discapacidad, familiar cercano o profesional que brinda servicios a personas con discapacidad.

que sufren las personas con discapacidad está tomando mayor relevancia debido al incremento de número de estas personas a causa del envejecimiento de la población y al incremento de problemas crónicos de salud. Con relación a ese tema, Blanco (2010) afirma que existe una relación entre el envejecimiento, la discapacidad y la dependencia: las personas presentan limitaciones funcionales mientras envejecen y por esta razón tienen posibilidades de pertenecer a la población con discapacidad. Es por ello que la previsión de las necesidades de esta población en constante crecimiento será un problema de interés socioeconómico.

En cuanto al ODS Ciudades y Comunidades Sostenibles, la meta 2 plantea que para el año 2030 existan sistemas de transporte que brinden seguridad, accesibilidad y que sea inclusivo, con especial énfasis en las personas con discapacidad. Asimismo, la meta 3 recomienda una urbanización inclusiva y sostenible, y la meta 7 plantea el acceso universal a áreas verdes y espacios públicos accesibles también para personas con discapacidad (ONU, s.f.c).

### **1.1.2. Situación demográfica de las personas con discapacidad en el Perú**

El reporte “Perú: Caracterización de las Condiciones de Vida de la Población con Discapacidad, 2017” del Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] (INEI, 2018c), muestra aspectos demográficos de la población con discapacidad. En este estudio se estimó la población con discapacidad con base en la tasa de prevalencia<sup>2</sup> de 5.2% del total de la población utilizada en la Primera Encuesta Nacional Especializada sobre Discapacidad (ENEDIS) del año 2012.

Sin embargo, al contrastar con los datos tomados del Censo 2017 para el Informe Nacional “Perú: Perfil Sociodemográfico”, se observó un incremento en esta tasa de prevalencia, los resultados del censo revelan que actualmente existen en el país 3 051 612 personas que padecen de alguna discapacidad y representa el 10.4% del total de la población (INEI, 2018b).

---

<sup>2</sup> Con respecto a la tasa de prevalencia la Organización Panamericana de la Salud (2018) refiere que es “el número de casos existentes de una enfermedad u otro evento de salud dividido por el número de personas de una población en un período específico” (p. 24).

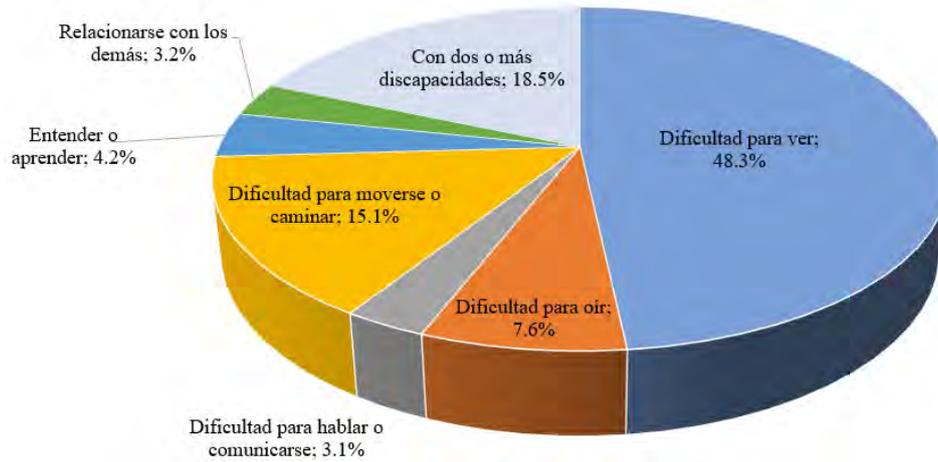


Figura 1. Población censada por tipo de discapacidad.

Elaborado con datos de INEI (2018b).

Dentro de esa población se encontró que la discapacidad que más prevalece es la dificultad para ver, pues 1 473 583 personas se identificaron con esta discapacidad y representa el 48.3% del total; seguido por el físico (15.1%) con 462 060 personas; luego 232 176 de personas con problemas para oír (7.6%); enseguida 127 947 personas con dificultad para entender o aprender (4.2%); 98 836 personas con dificultad para relacionarse con los demás (3.2%), finalmente el 3.1% son 93 mil 88 personas con dificultad para hablar o comunicarse. La ciudad de Lima Metropolitana tiene 513 249 personas con dificultad para ver y es la provincia que tiene la mayor proporción de la población invidente con un 34.8% (INEI, 2018b), vea figura 1.

Con respecto a la edad, la mayor proporción de personas con discapacidad se encuentran en el rango de edad avanzada (65 años a más) indistintamente de su sexo, vea la figura 2 Además, en la figura 3 se observa que la edad avanzada es la principal causa del desarrollo de una discapacidad (41.4%) (INEI, 2014). Esta información sugiere que las presunciones mencionadas anteriormente sobre el incremento de personas con discapacidad debido al envejecimiento de la población tendrían fundamento.

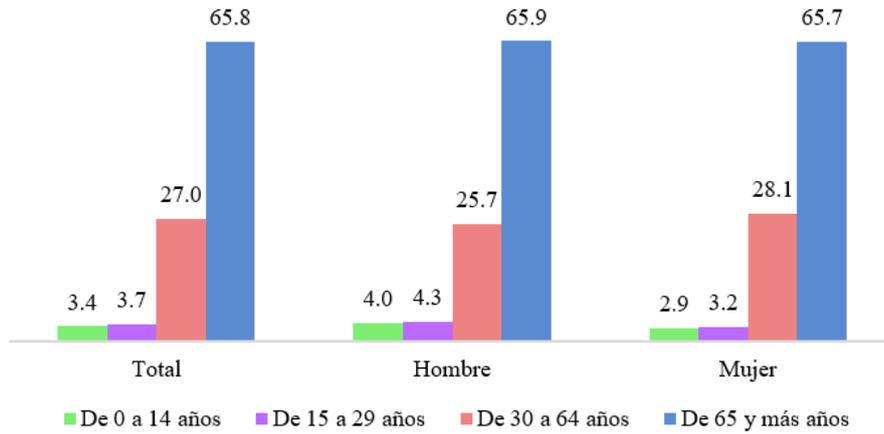


Figura 2. Prevalencia de edad en la población con discapacidad.

Elaborado con datos de INEI (2014).

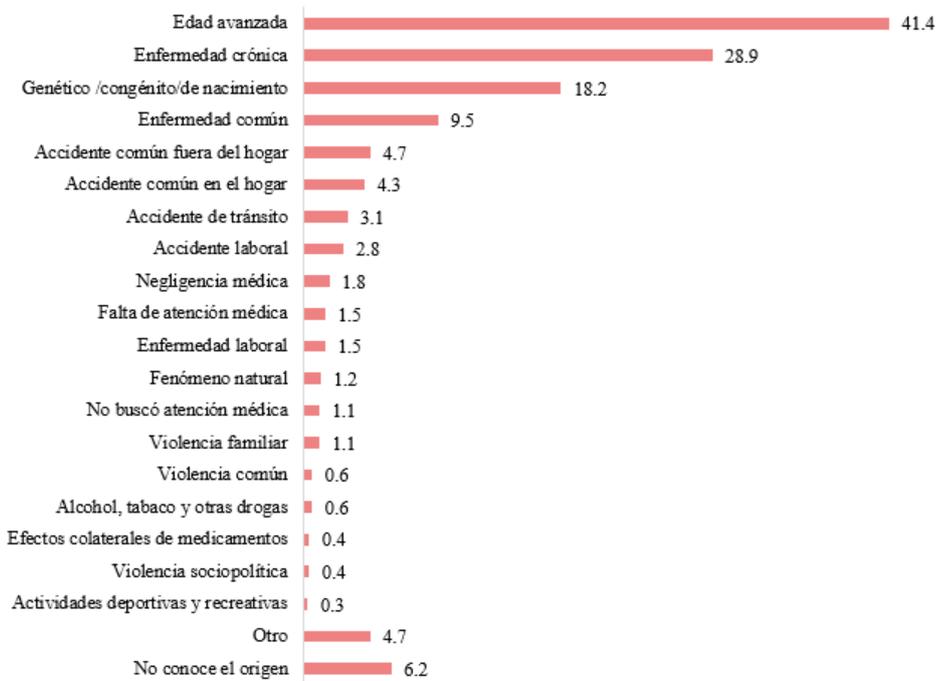


Figura 3. Origen de la discapacidad.

Elaborado con datos de INEI (2014).

De igual forma, la principal causa de la limitación es la edad avanzada (52.1%), seguida de la enfermedad crónica (13.4%), enfermedad común (9.1%) y genético/congénito/de nacimiento (7.2%) (INEI, 2014).

### 1.1.3. Situación socioeconómica de las personas con discapacidad en el Perú

Un estudio sobre el “Impacto de la situación de discapacidad en la composición y en el costo final de la canasta básica de consumo familiar” realizado por la INEI (2017) refiere lo siguiente:

La proporción de hogares que consumen bienes y servicios vinculados a los rubros transportes y comunicaciones; esparcimiento, diversión y servicios de cultura; bienes y servicios de cuidados personales; vestido y calzado; gastos en transferencias; muebles y enseres; educación; y alimentos consumidos fuera del hogar, es superior en los hogares que no tienen integrantes con discapacidad en relación a aquellos que sí tienen integrantes con discapacidad. (p. 11)

Solo en el rubro de salud se observa una proporción mayor de gasto en hogares con integrantes con discapacidad, mientras que en los otros rubros son los hogares sin integrantes con discapacidad los que incurren en mayores gastos, lo cual según el INEI (2017) se explica porque los hogares que sí tienen integrantes con discapacidad consumen menos bienes, y en particular menos servicios de educación, transporte y comunicaciones. En promedio, mensualmente los hogares con personas con discapacidad gastan S/ 1 381, en cambio los hogares sin personas con discapacidad gastan S/ 1 625 mensuales.

Otro factor se debe a sus menores ingresos laborales promedios, que justifican un menor ingreso mensual al hogar y esto conlleva a un menor consumo. Esta información sugiere que la imposibilidad de acceder a ciertos servicios (entre ellos el transporte) limita el ejercicio de sus derechos, su bienestar y calidad de vida.

Respecto al acceso al mercado laboral, según INEI (2018c) la población sin discapacidad tiene una Población Económicamente Activa (PEA) de 73.7%, lo que equivale a 28.7 puntos porcentuales más que la PEA con discapacidad (45.0%); esta proporción indica una mayor empleabilidad en las personas sin discapacidad.

Como ilustra la figura 4, las dificultades principales que las personas con discapacidad tienen para conseguir empleo son la discriminación (23.1%), la capacidad (18.3%), lo subestiman (16.1%), no está preparado (7%), el costo elevado para acceder al transporte (5.2%) y la infraestructura no adecuada para esta población (3.7%) (INEI, 2014).



Figura 4. Dificultades para conseguir trabajo en personas con discapacidad.

Elaborado con datos de INEI (2014).

En cuanto al sector educación la mayoría de las personas con discapacidad presenta bajos niveles de educación. Así, el 13.9% no tiene nivel alguno de educación, el 0.3% inicial, el 32.0% estudió hasta primaria, seguido de 29.6% con educación secundaria, 3.2% superior no universitaria incompleta, 5.8% con superior no universitaria completa, el 4.3% con superior universitaria incompleta, 9.1% cuenta con educación universitaria completa, el 1.3% tiene maestría/doctorado y solo el 0.5% tiene educación básica especial (INEI, 2018b), vea la figura 5.

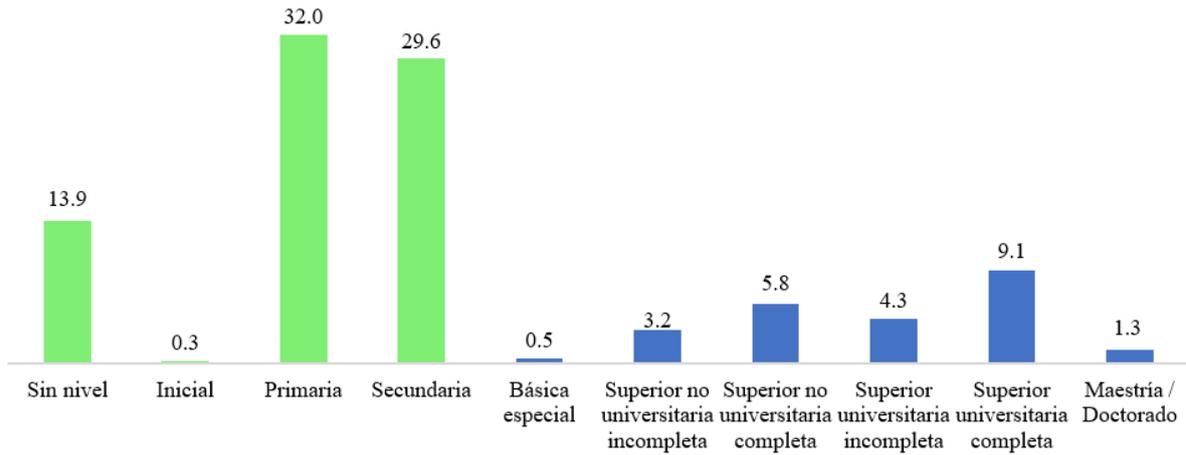


Figura 5. Nivel de educación alcanzado por la población con discapacidad de 15 años a más.

Elaborado con datos de INEI (2018b).

Según la ENEDIS realizada por la INEI (2014) un 40.6% de personas con discapacidad depende de otra persona para realizar sus actividades, lo cual incurre en un costo adicional por el pago a estas personas que puede llegar hasta más de S/ 800, vea la figura 6.

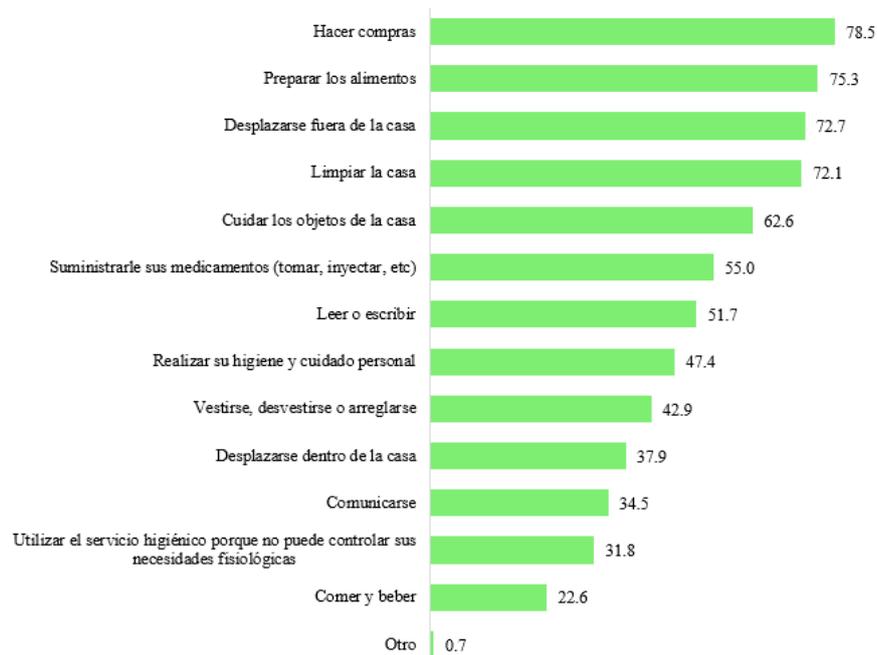


Figura 6. Pago mensual por el apoyo prestado a personas con discapacidad dependientes.

Elaborado con datos de INEI (2014).

Entre las principales tareas en las que las personas con discapacidad son dependientes se encuentran (vea la figura 7): hacer compras es la más frecuente con un 78.5%, esto reafirma la aparente inaccesibilidad hacia comprar bienes que se mencionó anteriormente sobre los menores gastos en la canasta básica que realizaban los hogares con alguna persona con discapacidad. Por

otro lado, un aspecto que tiene cercana relación con el tema de estudio de esta tesis es que un porcentaje importante (72.7%) necesita ayuda para desplazarse fuera de la casa (INEI, 2014).



*Figura 7.* Tareas en las que las personas con discapacidad son dependientes.

Elaborado con datos de INEI (2014).

#### **1.1.4. Situación de accesibilidad para personas con discapacidad en el Perú**

También de la ENEDIS se obtuvo un registro de los espacios urbanos que las personas con discapacidad perciben como lugares de difícil acceso o desplazamiento: el 29.3% considera a los establecimientos de salud, el 23% los paraderos, el 21.3% los mercados, el 18.9% los centros de rehabilitación, el 18.8% los bancos y entidades financieras, entre los principales (INEI, 2014), vea la figura 8.

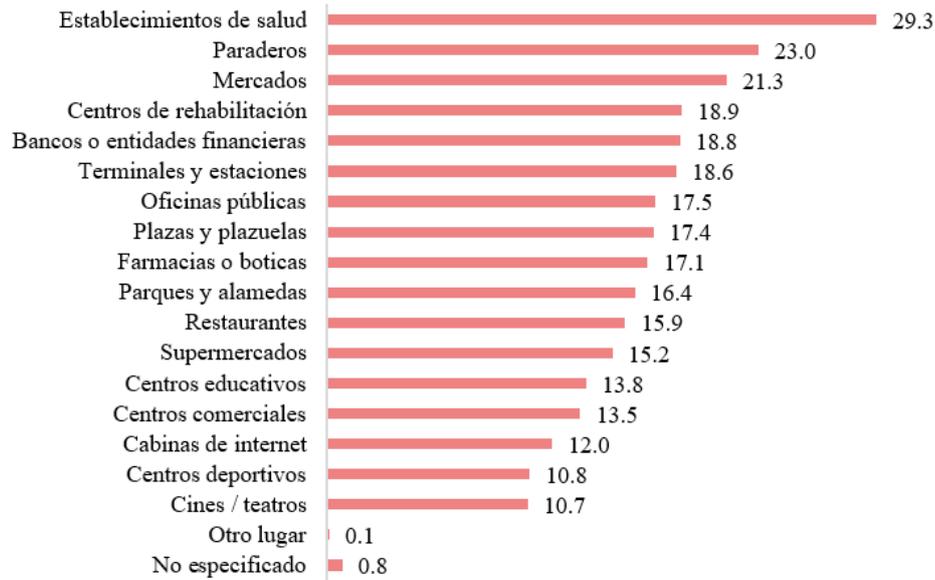


Figura 8. Personas con discapacidad que tienen dificultad para ingresar o desplazarse en establecimientos públicos.

Elaborado con datos de INEI (2014).

En cuanto al medio de transporte más utilizado se observa que todos los tipos de discapacidad coinciden que el desplazamiento a pie es el medio de transporte más usual, principalmente por las personas que presentan discapacidad para oír (57.5%), para relacionarse con los demás (56.3%) y para ver (53.5%) (INEI, 2014), más detalles en la figura 9.

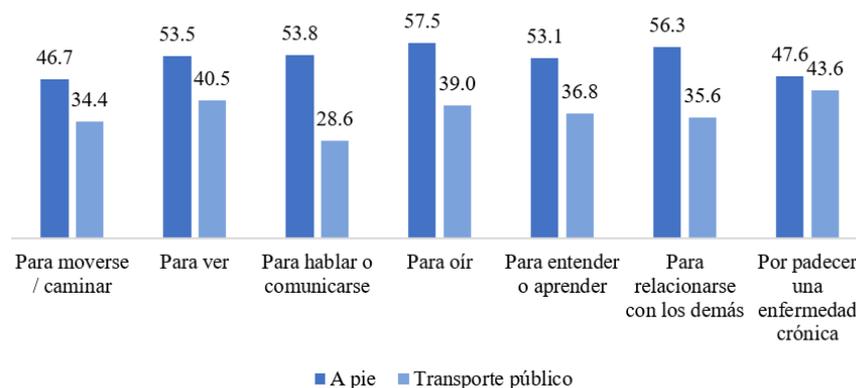


Figura 9. Tipo de desplazamiento por tipo de discapacidad.

Elaborado con datos de INEI (2014).

También ENEDIS (INEI, 2014) informa que un gran porcentaje de la población con discapacidad considera que las vías por las que debería transitar se encuentran en mal estado (72.3%), el resto de porcentajes se muestra en la figura 10.



Figura 10. Estado de las vías por las cuales las personas con discapacidad se desplazan.

Elaborado con datos de INEI (2014).

Este porcentaje alto es parecido en cada tipo de discapacidad, un 72.6% de las personas con discapacidad visual también considera que las vías por las que transita no son las adecuadas o están en mal estado (INEI, 2014), vea la figura 11.

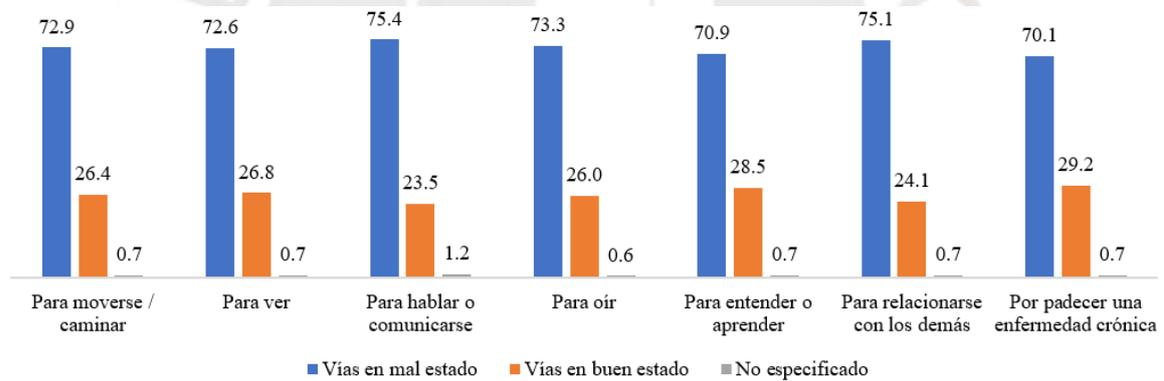


Figura 11. Percepción del estado de las vías donde las personas con discapacidad se desplazan según tipo de discapacidad.

Elaborado con datos de INEI (2014).

Por otro lado, el 47.2% de personas con discapacidad afirmó que no existen rampas de acceso, puertas ni pasadizos adecuados (INEI, 2014), vea la figura 12.

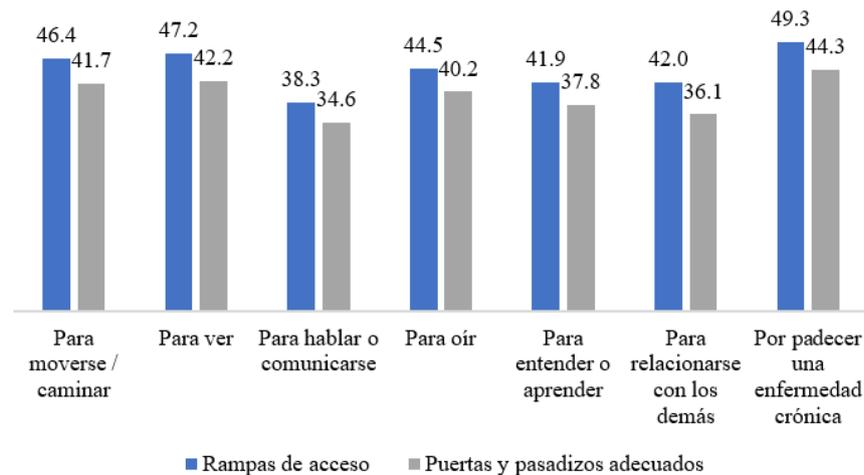


Figura 12. Percepción de infraestructura adecuada en construcciones de uso público según tipo de discapacidad.

Elaborado con datos de INEI (2014).

En contraste con lo que revela la ENEDIS, es oportuno señalar que Fanucci, Roncella, Iacopetti, Donati y Giannelli (2014) afirman que la movilidad autónoma es una actividad difícil para las personas con discapacidad visual, dado que constantemente tienen que prestar mucha atención sobre la posición actual en la que se encuentran y sobre la dirección a la que se están dirigiendo. También Fanucci et al. (2014) indican que una de las técnicas que utilizan personas invidentes para transitar es la creación de un mapa mental donde logran referenciar su ubicación mediante la advertencia de elementos reconocibles como árboles, edificios, semáforos, entre otros. Finalmente, los resultados de la encuesta de ENEDIS no sugieren una situación que contribuya a mejorar la movilidad autónoma de los discapacitados del Perú.

### 1.1.5. Situación de las instituciones encargadas de apoyar a las personas con discapacidad en el

#### Perú

Según el INEI (2014) un gran porcentaje de la población con discapacidad no tiene conocimiento de alguna institución que brinde apoyo para personas en su condición, como lo son CONADIS (Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad) u OMAPED (Oficinas

Municipales de Atención a las Personas con Discapacidad). Solo un 17.3% conoce de estas instituciones, dentro de las cuales CONADIS con un 61%, Defensoría del Pueblo con 43.5% y OMAPED con 24.1% son las más conocidas. Este desconocimiento podría estar relacionado con el bajo nivel educativo al que las personas con discapacidad tienen acceso.

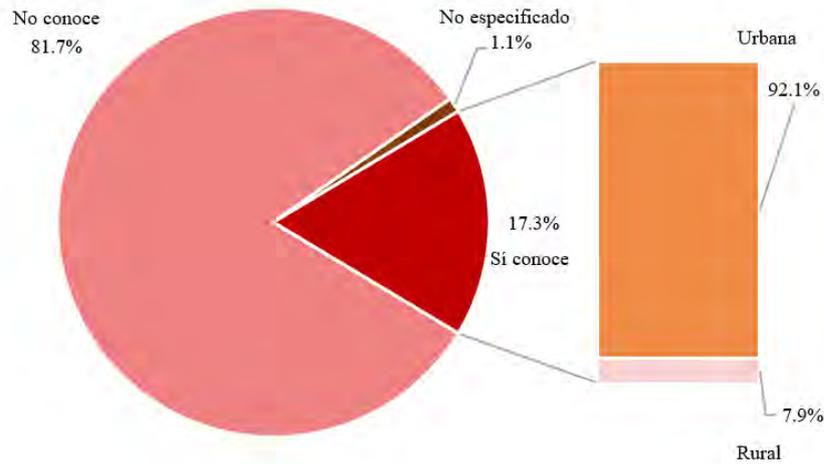


Figura 13. Conocimiento de organismos, instituciones o asociaciones de apoyo a la persona con discapacidad.

Elaborado con datos de INEI (2014).

Del total de la población con discapacidad solo un 4.3% se encuentra registrado en CONADIS. Se podría presumir que en estas instituciones no se cuenta con la información suficiente de la población con discapacidad para plantear los objetivos que podrían resolver las problemáticas de las personas con discapacidad.

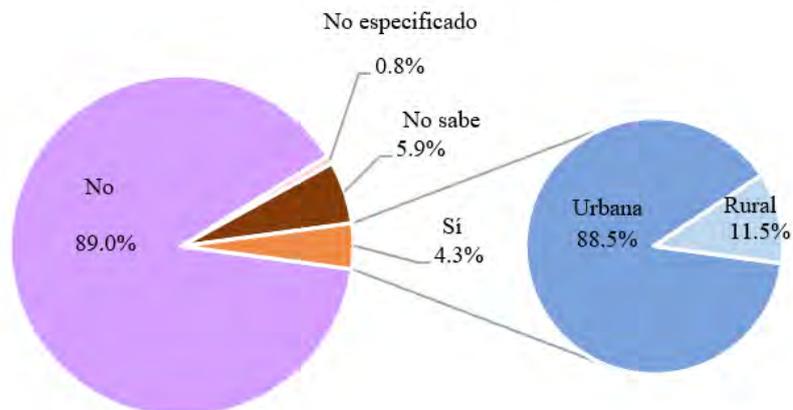


Figura 14. Personas con discapacidad inscritas al CONADIS.

Elaborado con datos de INEI (2014).

## 1.2. Iniciativas a favor de las personas con discapacidad

Para lograr las metas de los ODS se están desarrollando iniciativas en diversos países. Por ejemplo, un aporte crucial para incrementar la igualdad de oportunidades y reducción de la desigualdad de resultados (meta 3 del ODS Reducción de las desigualdades) es la tecnología de asistencia para personas con discapacidad (ONU, 2019). Según la OMS (2018) estos productos de asistencia tienen como objetivo principal mantener o mejorar el funcionamiento y la independencia de un individuo y, por lo tanto, promover su bienestar. Según Parette y Peterson-Karlan (2007) los elementos de asistencia tecnológica permiten que las personas con discapacidad accedan a las experiencias educativas y también apoyan al usuario en sus metas de aprendizaje. Estos elementos beneficiarán a la sociedad en distintos aspectos: económica, social y ambientalmente, por eso se debe priorizar el desarrollo y el acceso de la asistencia tecnológica para que todos tengan acceso a ella (Tebbutt et al., 2016). Aragón (2020) refiere en su revisión de literatura sobre la problemática de tránsito de personas con discapacidad visual que Dos Santos, Medola, Cinelli, García y Sandnes (2020) indican que es probable que algunas tecnologías como bastones electrónicos para detección de obstáculos beneficien a las invidentes en su movilidad; en cuanto a dispositivos para navegación Cheraghi, Namboodiri y Walker (2017) señala que el dispositivo *GuideBeacon* beneficia a las personas invidentes con una reducción de entre 30-50% del tiempo de navegación; por último, Kose y Vasant (2018) menciona que los sistemas basados en inteligencia artificial, *Big Data*, *Internet of Things* y algoritmos de ruteo han demostrado tener potencial para guiar al invidente de manera segura y autónoma.

Otras medidas correctivas para cumplir las metas 2, 3 y 7 del ODS Ciudades y comunidades sostenibles sobre accesibilidad al transporte y áreas verdes, y la urbanización inclusiva, es la creación de leyes, actas y homogeneizar o crear políticas sobre la accesibilidad de los espacios públicos. Según la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad [CDPD], (2017) se debe regular el cumplimiento de instalaciones con elementos accesibles para personas

con discapacidad, en el ejemplo de Japón las normas de accesibilidad se aplican en los edificios y sistemas de transporte público, es por esta razón que se pueden encontrar señaléticas en braille dentro de las instalaciones para el uso de personas con discapacidad visual.

A nivel local, en Perú se reconocen los principios establecidos por la Convención de las Naciones Unidas sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad, por esta razón se desarrolló el Plan de Igualdad de Oportunidades para Personas con Discapacidad 2009-2018 el cual según el Ministerio de la Mujer y Desarrollo Social (2009) tiene como objetivo “proteger y fomentar el disfrute pleno de los derechos de las personas con discapacidad en condiciones de igualdad, promoviendo el respeto a su dignidad inherente.”(p.3). Este plan busca beneficiar a las personas con discapacidad, para ello recopila información sobre las necesidades y problemas de esta población vulnerable para luego plantear una solución con el Estado.

En cuanto a legislaciones, desde el año 2012 rige la Ley 29973 la cual tiene la finalidad de establecer el marco legal para todo aquello relacionado a la vida y protección de derechos de una persona con discapacidad (Congreso de la República, 2012). Dicha norma tiene como objetivo que las personas con discapacidad puedan ser incluidas en la vida política, económica, social, cultural y tecnológica. La ley presenta un reglamento entre los cuales se destacan espacios públicos accesibles: diseño urbano, ambientes y rutas, estacionamientos, transportes públicos, entre otros. También se cuenta con la norma A.120 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019), donde se tiene como objetivo prever ambientes, mobiliaria y rutas accesibles que posibilite el desplazamiento de cualquier persona, garantizando así el derecho a la accesibilidad que tienen las personas. A pesar que menciona la instalación de pisos podotáctiles<sup>3</sup>, no se mencionan especificaciones para su adecuada construcción. Por otro lado, según un estudio realizado por (Vilcanqui, 2017)<sup>4</sup>, la instalación de pisos podotáctiles no beneficia o ayuda a las personas

---

<sup>3</sup> Aragón (2020) presenta una revisión de la literatura sobre superficies podotáctiles donde refiere que se necesita consultar a los usuarios invidentes sobre su conocimiento del elemento para que pueda ser utilizado correctamente.

<sup>4</sup> La investigación se realizó mediante entrevistas a profundidad y entrevistas itinerarias a nueve personas, lo cual no es representativo a la población total de personas con discapacidad visual en la ciudad de Lima.

invidentes en su tránsito, esto a causa de un desconocimiento del correcto uso de la superficie y al uso inadecuado del bastón sobre la superficie que ocasiona que el bastón se atasque en las ranuras. En el caso de los semáforos sonoros instalados en distritos como Lima, La Molina y Miraflores; (Vilcanqui, 2017) refiere que las personas con discapacidad visual no los utilizan debido a una desconfianza generada por el incumplimiento de las leyes de tránsito que tienen los conductores. Entre las principales entidades que se encargan de garantizar la protección de los derechos de las personas con discapacidad se encuentran el Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad (CONADIS) y las Oficinas Municipales de Atención a las Personas con Discapacidad (OMAPED). Estas entidades trabajan de manera coordinada para realizar actividades que estén orientadas al fortalecimiento de capacidades a favor de las personas con discapacidad (Municipalidad de Lima, s.f.). Sin embargo, no se ve una actividad relacionada con la movilización de personas con discapacidad visual.

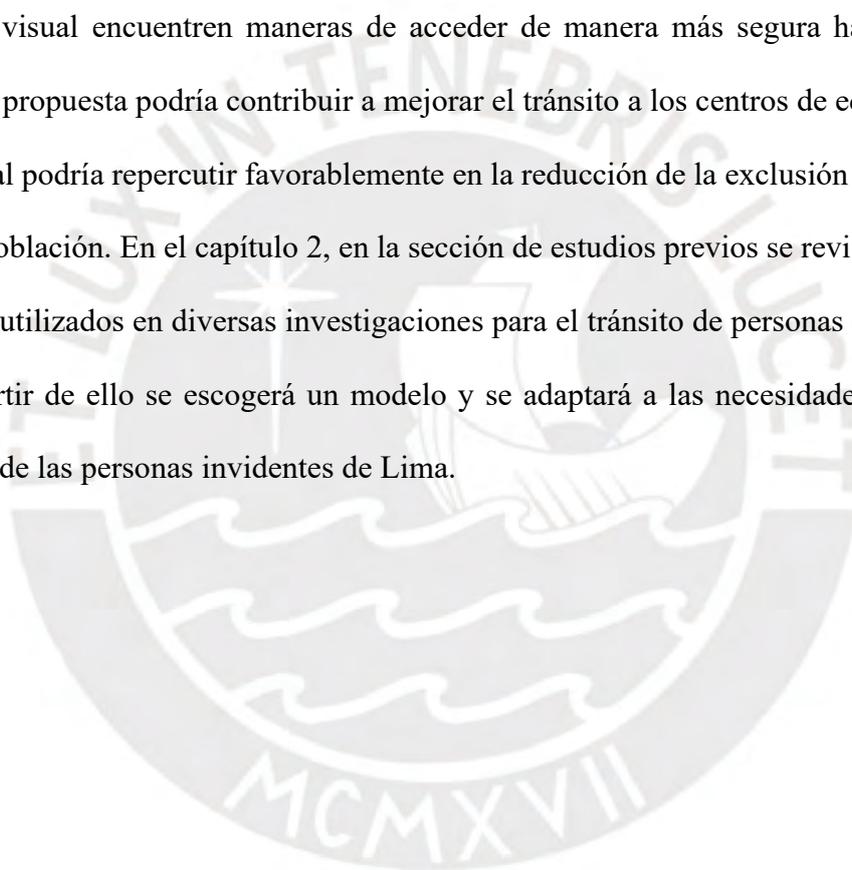
### **1.3.Diagnóstico**

Según el INEI (2018b) en Lima Metropolitana hay más de medio millón de personas con discapacidad visual, y con la evidencia presentada se presume que no se ha realizado la implementación necesaria para la accesibilidad de personas con discapacidad visual que no pueden moverse de manera segura e independiente a través de la ciudad.

Con base en la literatura revisada se puede observar que las personas con discapacidad es una población desatendida en el Perú, además estas personas presentan dificultades para encontrar un trabajo, reciben un menor sueldo, incurren en mayores gastos en cuanto a salud, dependen de otra persona para realizar ciertas actividades (no son independientes) y no pueden acceder a espacios públicos. En particular para las personas con discapacidad visual moverse a través de la ciudad hacia los espacios públicos resulta un problema muy desafiante debido a la mala infraestructura y las vías en mal estado que no les permite acceder de manera segura a estos espacios. La

discapacidad visual es la discapacidad que más prevalece en el Perú y teniendo en cuenta que su origen más frecuente es la edad avanzada, se puede presumir que será un problema de gran interés socioeconómico porque es una población que incrementará cada vez más.

Por otro lado, la literatura reseñada también revela que un factor que genera obstáculos en los discapacitados para acceder a un empleo es la distancia entre su residencia y el centro de labores. Esta tesis se enfoca en una contribución para aliviar las dificultades de tránsito en el espacio urbano de Lima a través del diseño de una propuesta de solución que contribuya a que las personas con discapacidad visual encuentren maneras de acceder de manera más segura hacia los espacios públicos. Esa propuesta podría contribuir a mejorar el tránsito a los centros de educación, salud y laboral, lo cual podría repercutir favorablemente en la reducción de la exclusión que aqueja a este sector de la población. En el capítulo 2, en la sección de estudios previos se revisarán modelos de optimización utilizados en diversas investigaciones para el tránsito de personas con discapacidad visual y a partir de ello se escogerá un modelo y se adaptará a las necesidades de seguridad y accesibilidad de las personas invidentes de Lima.



## Capítulo 2. Propuesta de modelo

### 2.1. Estudios previos

En los modelos para planificación de rutas se llega al óptimo al encontrar la ruta más corta o más rápida; sin embargo, para las personas con discapacidad visual la seguridad en el tránsito de esta ruta resulta ser de mayor importancia, una ruta más segura podría ser la más adecuada (Cohen, 2017). Particularmente para las personas ciegas, la seguridad es un requerimiento necesario para transitar, por ello prefieren evitar lugares bulliciosos como en ocasiones son los cruces peatonales o lugares con afluencia de personas y tal vez estarían dispuestos a aceptar una ruta larga pero segura (Völkel, Kühn, & Weber, 2008). Por su parte Swobodzinski y Raubal (2009) afirman lo siguiente:

A diferencia de las personas sin discapacidad visual, la minimización de la distancia no gana importancia por sí sola, sino en combinación con otros criterios de selección de ruta que las personas con discapacidad visual logran detectar mediante el bastón. (p. 1316)

Este requerimiento de seguridad como objetivo se ha planteado en otros modelos, por ejemplo, Chen, Lin, Liu, Zhang y Yue (2015) proponen un modelo basado en orientación mediante objetos, donde dependiendo de la naturaleza del objeto (objeto útil u obstáculo) se puede seguir o evitar una ruta. De manera similar la solución para navegación de peatones invidentes planteado por Duarte, Cecilio, Silva y Furtado (2014) sugiere la construcción de un grafo con pesos relacionados a la distancia y a las preferencias del usuario, pero también se busca encontrar la ruta con menor costo.

En su búsqueda para entender sobre estas necesidades y dificultades que tiene los peatones invidentes a la hora de transitar por la ciudad, Cohen (2017) realizó entrevistas para identificar qué tipo de rutas consideraban más fáciles y más difíciles de recorrer. Los resultados mostraron que los peatones con discapacidad visual prefieren rutas con características como:

- Complejidad: una ruta con muchos giros y curvas puede confundir al peatón, por ello se prefieren rutas que sean directas.
- Hitos: que la ruta incluya lugares como restaurantes, semáforos, árboles y paraderos resultan de utilidad para los peatones ciegos (pueden detectarlos mediante otros sentidos); sin embargo, deben permanecer en la misma ubicación en el transcurso del tiempo sino pierden su utilidad.
- Señales peatonales accesibles: se prefiere la presencia de elementos de apoyo para que les indique cuándo cruzar la calle, por ejemplo, semáforos sonoros.
- Carreteras: el sonido que emiten en las carreteras les sirve para orientarse y detectar el sentido de dirección de los vehículos.
- Obstáculos: prefieren evitar calles con multitudes, los espacios compartidos con autos o bicicletas también resulta peligroso para ellos.
- Intersecciones: resultan complejos para las personas con discapacidad visual porque pueden generar varias dificultades, como por ejemplo, de visibilidad, geometría de la intersección y problemas en el control del tráfico. La primera dificultad consiste en que un conductor podría no ver a un peatón mientras dobla en una esquina; la segunda dificultad se refiere a intersecciones que se forman por la unión de varias calles que vienen de distintas direcciones y que podrían confundir al peatón; por último, en algunas intersecciones no hay semáforos sonoros, lo que no permitiría al peatón ciego identificar los patrones que le permiten decidir cruzar la pista.
- Diferencias en las necesidades: algunos peatones con discapacidad visual tienen opiniones divididas sobre priorizar la seguridad en vez de la distancia; también depende del elemento de apoyo que están utilizando, pues la complejidad de una avenida no es de mucha relevancia para una persona con discapacidad visual que tiene un perro guía como elemento de apoyo a diferencia de una persona con discapacidad visual que utiliza bastón.

Estos resultados permiten sugerir que, para plantear los requerimientos de las personas con discapacidad visual a la hora de transitar por una calle, se debe realizar un cuestionario para recopilar las necesidades más representativas de cada población. En la sección 2.2.3. se muestran los resultados de una encuesta realizada a personas con discapacidad visual en la ciudad de Lima, que permite esclarecer el panorama.

Según Vanclooster, Van de Weghe y De Maeyer (2016) para obtener una ruta óptima para un peatón no solo basta con calcular la ruta más corta; según las necesidades del peatón se puede necesitar de rutas rápidas o rutas simples.

A continuación se presenta algunos modelos de optimización utilizados en investigaciones previas. En algunos casos consideraron los requerimientos de las personas con discapacidad visual, mientras que en otros no fueron tomados en cuenta.

### **2.1.1. Algoritmo de Dijkstra utilizado en un ruteo para personas con discapacidad visual utilizando función de costos multicriterio**

Con base en entrevistas realizada a expertos Cohen (2017) definió cuatro criterios que tienen una mayor importancia en las rutas para una persona con discapacidad visual. La importancia de estos criterios es cuantificada en porcentajes e incluida en una función de costos multicriterio, donde el valor de esta función no está medido en unidades monetarias sino en términos de accesibilidad, donde un valor más bajo significará una ruta más accesible y segura; a partir de ello, la función de “costos” es incluida en un modelo de optimización que encontrará la ruta con el menor “costo” (Cohen, 2017). A continuación, se muestra los criterios definidos y en qué consiste esos “costos” no monetarios:

- **Distancia:** los peatones invidentes prefieren recorrer una distancia corta, el costo de este criterio será medido mediante la longitud del tramo.

- Complejidad: para un peatón invidente resulta complejo una ruta con muchos giros, Cohen (2017) define un giro complejo cuando el ángulo entre dos tramos consecutivos es mayor a  $45^\circ$ . El costo de este criterio fue medido en la cantidad de giros complejos en los tramos.
- Hitos: los hitos son elementos importantes para informar a un invidente sobre el lugar en el que se encuentra. Son elementos detectados mediante otros sentidos diferentes al de la vista como la audición u olfato (se pueden detectar elementos como paraderos, supermercados, estaciones de tren o restaurantes mediante estos sentidos). El costo de este criterio fue medido en la cantidad de hitos en los tramos.
- Tipo de vía: mide la accesibilidad de un tramo con la presencia de elementos de apoyo como señales peatonales accesibles, semáforos y pisos podotáctiles. Cohen (2017) definió niveles de accesibilidad de una vía donde el nivel más bajo tiene un valor como 1 y es considerado como una “vía adecuada” porque cuenta con todos los elementos de apoyo; en cambio el nivel más alto tiene como valor 6 y es considerado como una “vía a evitar” porque no cuenta con elementos de apoyo y tiene obstáculos (como parques o cruces peatonales sin semáforos).

Los valores de los criterios distancia, complejidad y tipo de vía con un nivel alto, incrementan el valor de la función de costos, por el contrario, los criterios de hitos y un valor bajo de tipo de vía, reducen el valor de la función de costos e incrementan la accesibilidad de la ruta.

Se realizó una normalización de los criterios con el objetivo de que todos tuvieran el mismo rango de valores y así evitar la distorsión del rango de resultados que pudo generar los valores del criterio de distancia. Los valores de los criterios de distancia, complejidad, tipo de vía e hitos se representan mediante el *score*  $s_n^i$  y el valor normalizado será representado mediante el valor  $w_n^i$  (donde  $i$  indica el número de identificación del tramo y  $n$  el criterio). A continuación, se muestra la normalización realizada.

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1^i = \frac{s_1^i}{\max(|s_1^1| \dots |s_1^n|)} * 10 \\ \vdots \\ w_4^i = \frac{s_4^i}{\max(|s_4^1| \dots |s_4^n|)} * 10 \end{array} \right\}$$

Posterior a esta normalización los usuarios invidentes definen los pesos de importancia según su preferencia (donde un peso con un valor mayor indica una mayor importancia), estos pesos se denotan como  $a_n$  y con ello se calcula la función de costos  $W^i$ , a continuación, se muestra la ecuación de la función de costos.

$$W^i = a_1 w_1^i + a_2 w_2^i + a_3 w_3^i + a_4 w_4^i$$

Se utilizó la herramienta *Open Street Map* para mapear las zonas que fueron utilizadas como prueba. La ventaja de esta herramienta es que cuenta con una gran base de datos de las características de las calles de la ciudad, se puede mapear los hitos como restaurantes, paraderos, estaciones de tren o supermercados. Además, esta herramienta también brinda información sobre las señales peatonales accesibles, semáforos y pisos podotáctiles que sirven para calificar un tramo con un nivel de accesibilidad para el criterio de tipo de vía. En la figura 15 se muestra las zonas mapeadas por la herramienta.

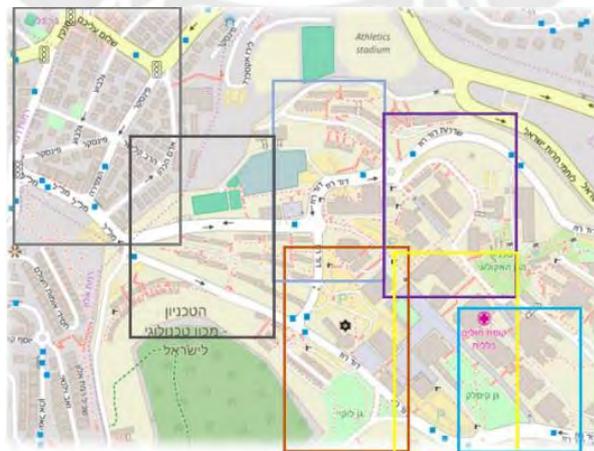


Figura 15. Zonas mapeadas con la herramienta *Open Street Map*.

Tomado de Cohen (2017).

Una vez calculados el valor de los tramos con la función de costos multicriterio se utilizó el algoritmo de Dijkstra para encontrar la ruta con el menor costo. Se realizaron ruteos de prueba con personas con discapacidad visual en el campus universitario de Technion en Israel y una prueba piloto en la ciudad de Nueva York. La figura 16 muestra las rutas obtenidas por el algoritmo Dijkstra.

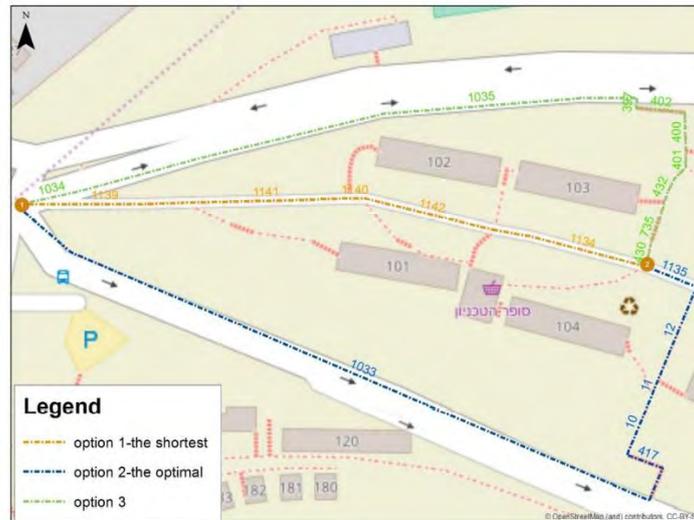


Figura 16. Las posibles rutas trazadas por el algoritmo Dijkstra.

Tomado de Cohen (2017).

Las personas con discapacidad visual que participaron en ambas pruebas indicaron que la ruta óptima (la más accesible) era más simple y sencilla para transitar porque no había presencia de obstáculos en ella, e incluso mencionaron que esta facilidad les hizo percibir que la ruta óptima tenía una menor longitud que la ruta corta. Cohen (2017) destaca de su investigación los siguientes puntos:

- Los criterios obtenidos mediante la entrevista a los expertos generaron rutas que satisfacen las necesidades de un peatón invidente.
- Esta solución permite a los peatones invidentes ser independientes en su tránsito por la ciudad.

- Las evaluaciones realizadas a personas con discapacidad visual en las pruebas de ruteo mostraron que las rutas que el algoritmo encontró eran más largas, pero más seguras, sin obstáculos y con tramos más accesibles.

### 2.1.2. Algoritmo multiobjetivo basado en *Artificial Bee Colony* (ABC) para planificación de rutas

El modelo de Fang et al. (2017) presenta múltiples objetivos a optimizar con el algoritmo ABC. Los autores, además de la distancia, consideraron objetivos de seguridad para el tránsito de peatones en la noche como la iluminación de la ruta y la afluencia de la gente en el camino. Si bien la investigación no fue hecha para peatones con discapacidad visual, el autor afirma que es adaptable para distintas necesidades que pueda tener cada peatón.

Para el objetivo de cobertura de iluminación se definió una variable ( $C$ ) como longitud de cobertura de la luz de la carretera  $i$ .

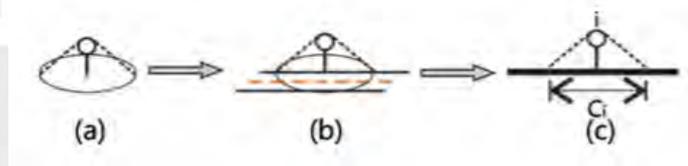


Figura 17. Cobertura de luz de un camino.

Tomado de Fang et al. (2017).

La afluencia de peatones en una ruta fue delimitada con una variable ( $r$ ) ratio de ocurrencia a lo largo de un segmento  $i$ , que es el número de peatones por unidad de longitud de un camino durante un tiempo determinado.

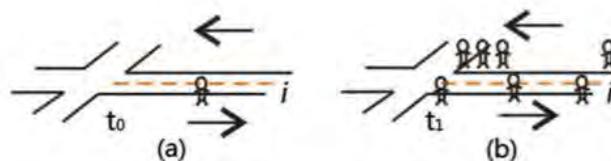


Figura 18. Ratio de afluencia de gente en el camino.

Tomado de Fang et al.(2017)

A continuación, se muestra el modelo multiobjetivo que fue definido en la investigación de Fang et al. (2017):

$$\min D = d(O, v_0) + \sum_{i=1}^{i < n-1} d(v_i, v_{i+1}) + d(v_n, D),$$

$$\max RL = \sum_{j=1}^{j < m} c(rl_j),$$

$$\max R = \sum_{i=1}^{i < n-1} r(e_i),$$

Donde  $O$  y  $D$  representan origen y destino respectivamente,  $v_i$  refiere a los nodos,  $e_i$  a las conexiones entre los nodos;  $rl_j$  son los postes de luz en las vías y  $c(rl_j)$  representa la cobertura de esos postes de luz;  $d$  es la distancia entre dos nodos;  $r(e_i)$  es el ratio de ocurrencia del segmento  $e_i$ .

La primera ecuación representa la minimización de la distancia en la ruta desde el origen hacia el destino, la segunda y tercera representan la maximización de la cobertura de iluminación y el ratio de afluencia de la gente en esa vía.

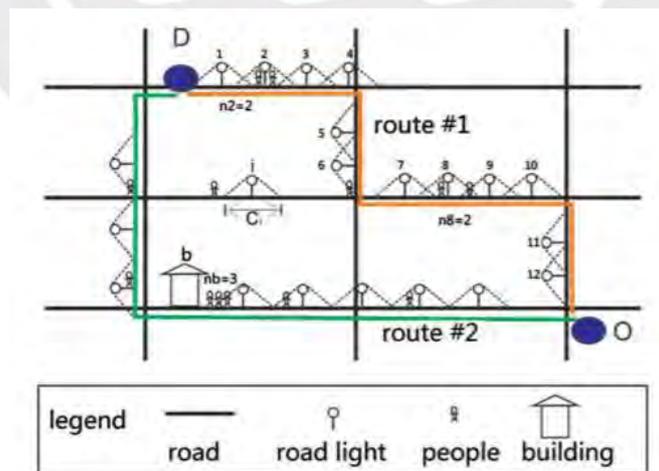


Figura 19. Ejemplo de rutas para llegar de un punto de origen a un punto de destino.

Tomado de Fang et al. (2017).

En este modelo se realizaron modificaciones como la aplicación de la frontera de Pareto para que el algoritmo solo pueda elegir como una nueva solución un resultado que mejore la frontera y así se logre satisfacer los tres objetivos al mismo tiempo, además de delimitar los vecindarios de búsqueda del algoritmo ABC; esto se realizó con el fin de que el algoritmo no genere como solución, rutas por las que no era físicamente posible transitar.

Los resultados de este modelo demostraron que el algoritmo modificado genera soluciones con un buen equilibrio entre los tres objetivos. Las tres primeras rutas obtenidas estaban cerca de los ejes de sus objetivos correspondientes, mientras que otras dos rutas resultaron las óptimas al encontrarse en la frontera de Pareto y cumpliendo con un buen balance entre los tres objetivos. Fang et al. (2017) afirman que este algoritmo ABC modificado puede generar las soluciones más adecuadas que cumplan con los múltiples requisitos que cumplan con las necesidades de los peatones.

### 2.1.3. Estrategias de ruta multicriterio utilizando el algoritmo de Dijkstra (*RouteCheckr*)

Völkel y Weber (2008) desarrollan una planificación de ruta personalizada. Para satisfacer las necesidades en el tránsito de ciegos o personas con discapacidad visual se incluyeron dos criterios en la función de costos: seguridad y distancia. Luego se optimiza siguiendo los pasos del algoritmo de Dijkstra. A continuación, se muestra el costo definido para las rutas:

$$C_{path} = \sum_{i=1}^S w_i c_i$$

La función de coste incluye un número de criterios ( $S$ );  $w_i$  se refiere al peso que se le asigna a un criterio  $c_i$ . La variable  $w_i$  también se puede calcular utilizando un valor  $r_i$  que representa un valor de importancia de un criterio frente a otro, por ejemplo, si un usuario considera un criterio  $c_1$  con un valor de importancia tres ( $r_1 = 3$ ) sobre un criterio  $c_2$  con importancia dos ( $r_2 = 1$ ) el valor de  $w_i$  para cada criterio será proporcional a esta relación y luego la sumatoria siguiente  $\sum w_i = 1$ ;

para este caso sería  $w_1 = 0.75$  y  $w_2 = 0.25$ . En el ejemplo mostrado en la figura 20 se utilizan solo dos criterios: seguridad cuyo valor se encuentra en el primer elemento del vector y la distancia cuyo valor se encuentra en el segundo elemento. Völkel y Weber (2008) indican que una parte importante del proceso es la normalización de los valores de longitud a la escala de los valores de seguridad para que se puedan comparar las diferentes rutas.

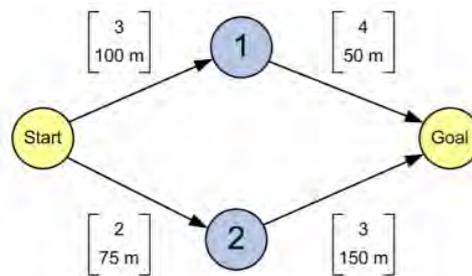


Figura 20. Gráfica con los pesos para cada camino.

Tomado de Völkel y Weber (2008).

El algoritmo Dijkstra utilizado busca en cada tramo de la ruta y compara las opciones, es por eso que en cada iteración del algoritmo los valores deben normalizarse.

Los resultados de este ejemplo mostraron que al asignar el mismo peso a cada criterio (0.5) la ruta más corta era la que prevalecía sobre la ruta de seguridad. Para evitar que el resultado sea tan invariable, el problema se adapta añadiendo escalas de 5 puntos de Likert a cada criterio, donde las preferencias se reflejarán mediante los pesos correspondientes a cada criterio en la función de costos como se observa en la figura 21.

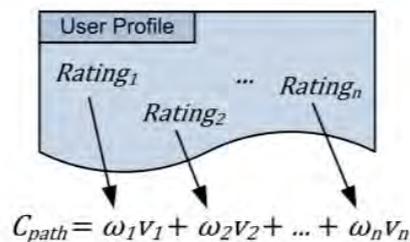


Figura 21. Asignación de pesos en la función de coste.

Tomado de Völkel y Weber (2008).

Esta metodología se puede aplicar a un número mayor de criterios; sin embargo, Völkel y Weber indican que “se debe tener un límite para la cantidad de criterios, caso contrario la influencia de la calificación del usuario para un criterio disminuirá.” (p. 189).

Los autores recomiendan el uso de tres o cuatro criterios, y para el caso de personas con discapacidad visual los criterios de longitud, seguridad, cantidad de elementos que le permiten orientarse y una calificación brindada por el mismo usuario.

#### **2.1.4. Selección de ruta para peatones ciegos utilizando el algoritmo Dijkstra**

En el estudio realizado por Kammoun, Dramas, Oriolaand y Jouffrais (2010) también utilizaron el algoritmo Dijkstra para encontrar el óptimo de la función score ( $S$ ), la cual está definida por otras dos funciones llamadas función de beneficios ( $P$ ) y función de costos ( $C$ ).

Por un lado, en la función de costos ( $C$ ), Kammoun et al. (2010) incluyeron cuatro variables definidas por cuatro tipos de categorías asignadas a objetos:

- Puntos de interés ( $POI$ ): son lugares de destino, además pueden ser lugares que le permiten orientarse a un peatón invidente en su tránsito.
- Hitos ( $LM$ ): son lugares que permiten al invidente identificar su posición, similar a los elementos que pertenecen a un mapa mental definido por Fanucci et al. (2014).
- Áreas de tránsito ( $WA$ ): son los tramos por los que los peatones pueden transitar como las aceras y los cruces peatonales (en la figura 22 se presentan en la leyenda como *Sidewalks* y *Pedestrian crossings*).
- Puntos visuales ( $VP$ ): son puntos de referencia que están geolocalizados y registrados en la base de datos del proyecto.

Se destaca que, dependiendo de la naturaleza de cada objeto, pueden ser catalogados en más de una de estas categorías porque, por ejemplo, para un usuario un centro comercial podría ser un hito y también un punto de interés.

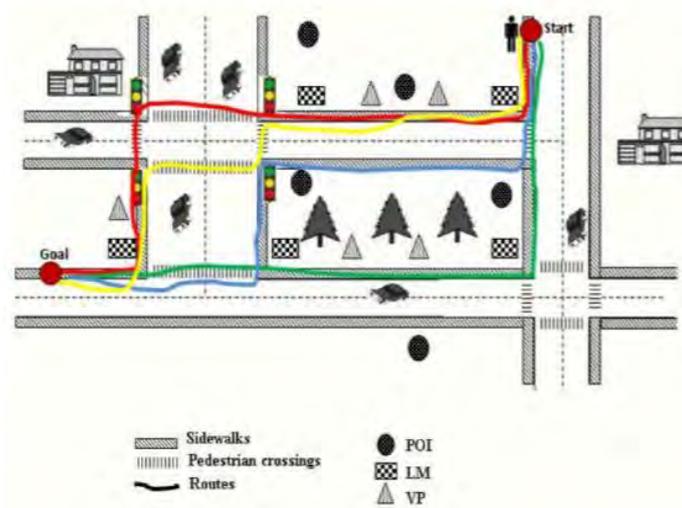


Figura 22. Las rutas brindadas según la preferencia de *POI*, *LM* o *VP*.

Tomado de Kammoun et al. (2010).

Por otro lado, en la función de beneficios ( $P$ ), Kammoun et al. (2010) definen dos tipos de beneficios: del usuario y del sistema. El beneficio del usuario ( $Up$ ) depende de la presencia de  $POI$  y  $LM$  en su ruta, en cuanto al beneficio del sistema ( $Sp$ ) depende de la presencia de  $VP$ . De manera similar a lo presentado en el modelo de la sección 2.1.3. se le otorgan pesos tanto a los beneficios como a los objetos de la función de costos. En el caso de los beneficios, el del usuario invidente es considerado más importante que el beneficio del sistema; y se le asignó un peso de 2 ( $X = 2$ ) al primero y 1 ( $Y = 1$ ) al segundo en el beneficio total ( $P$ ). En cuanto a las categorías de  $POI$ ,  $LM$  y  $VP$  se les asignó un peso de 2, 1 y 0.5, respectivamente. Los beneficios para cada parte se presentan a continuación.

$$P = \sum_i^j [(X * Up), (Y * Sp)]$$

$$Up = \sum_i^j [(2 * POI), LM]$$

$$Sp = \sum_i^j (VP * 0.5)$$

Por otro lado, en la función de costos el autor identificó los tres factores más importantes en la selección de un camino para ciegos: el ancho de la acera ( $SW$ ), la presencia de un cruce peatonal ( $PC$ ) y la longitud del camino ( $SL$ ). En el caso del ancho de la acera se le asignó un costo dependiendo de la amplitud de esta, los costos se muestran en la figura 23.

Ancho de la acera	< 5m	< 4m	< 3m	< 2m	< 1m
Costo	1	2	3	4	5

Figura 23. Pesos asignados al ancho de las aceras.

Tomado de Kammoun et al. (2010).

Se considera un tramo como peligroso cuando incluye un cruce y se considera aún más peligroso si el tramo no cuenta con cruce peatonal ni semáforos, por esta razón son penalizados en el modelo. Por otro lado, en el caso de la longitud (por ejemplo, un camino largo) es penalizado con un costo de 5, las otras longitudes de los tramos se penalizarán de manera proporcionada.

Kammoun et al. (2008) formularon una función de costos, donde se asignaron pesos diferentes a los factores. Finalmente, la ruta óptima se selecciona resolviendo la función *score* con el algoritmo Dijkstra. A continuación, se muestra la función *score*.

$$S(i, j) = P(i, j) - NC(i, j)$$

Kammoun et al. (2010) recomiendan realizar un estudio con usuarios invidentes para asignar los pesos correspondientes a los beneficios, pues en esta investigación se realizó de manera arbitraria. También plantean implementar el aprendizaje automático en las tareas de navegación, de esta forma la optimización de rutas podría cambiar según la preferencia del usuario definido por el perfil.

### 2.1.5. Planificación de rutas para personas ciegas con *Particle Swarm Optimization* (PSO)

En la investigación realizada por Yusof, T., Toha, y Yusof, H. (2015), los autores proponen utilizar el algoritmo PSO. Patle, Pandey, Parhi y Jagadeesh (2019) indican que, si bien el algoritmo imita el comportamiento de un conjunto de animales como cardúmenes de peces y bandadas de aves, no es necesaria la presencia de un líder para dirigir el grupo porque la dirección del grupo estará determinada por el elemento que se encuentre más cerca al objetivo (como se observa en la figura 24). De manera análoga cada partícula del algoritmo PSO representa una posible solución que intentará dirigirse hacia un objetivo (Patle et al.,2019).

Según Yusof et al. (2015) en su estudio se prefirió utilizar PSO a otros algoritmos como Dijkstra o A\*, pues consume menos tiempo y resulta ser más indicado en problemas donde la dimensión es muy grande.

Respecto al funcionamiento del algoritmo PSO Yusof et al. (2015) indica:

En este algoritmo se inicia con una cantidad de partículas (o individuos) que se mueve dentro de una región para buscar la solución óptima. Cada partícula tiene una velocidad individual  $V_i$  y una posición individual  $P_i$ , se deberá mover hacia la posición local óptima  $P_i$  y la posición global óptima  $P_g$ . Para la posición global óptima,  $X'_i$  es la posición óptima de todo el enjambre. La resolución de este problema es iterativo, y en cada iteración se van actualizando la velocidad y posición de cada partícula. (p. 82)

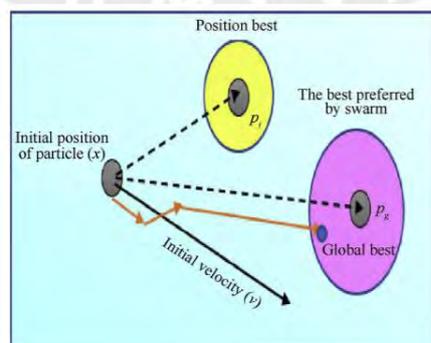


Figura 24. Funcionamiento del algoritmo PSO.

Tomado de Patle et al. (2019)

Las variables velocidad y posición que se actualizan en cada iteración se muestran a continuación.

$$V'_i = wV_i + c_1r_1(P_i - X_i) + c_2r_2(P_g - X_i)$$

$$X'_i = X_i + V'_i$$

Los parámetros  $c_1$  y  $c_2$  son constantes conocidas como coeficientes de aceleración,  $r_1$  y  $r_2$  son números aleatorios, mientras que el parámetro  $w$  es conocido como peso de inercia.

La función en este modelo buscará minimizar el costo de la distancia. Para este caso no se han considerado dentro de la optimización los otros requerimientos de las personas con discapacidad visual y se asume que los nodos que definen los caminos no tienen obstáculos que impidan un adecuado desplazamiento. La función de costos a optimizar se muestra a continuación.

$$F(x) = \sum_{j=1}^{n_i-1} C_{sg}$$

$C_{sg}$  representa el costo de la ruta del nodo inicial al nodo final.

El algoritmo propuesto se resume en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la distancia entre puntos utilizando la fórmula euclidiana.
2. Se inicia en un punto origen y un punto de destino.
3. Se inician los parámetros, también las posiciones y velocidades.
4. En cada iteración se actualizarán los parámetros como velocidad, posición de cada partícula, además se calculará el valor de la función  $F$  y se actualizarán  $P_i$  y  $P_g$  en caso el valor de la función  $F$  sea mejor que en la anterior iteración.

En la simulación se realizaron 100 iteraciones, donde se obtuvo un resultado óptimo de una distancia de 456 metros a partir de la vigésima segunda iteración. Como una propuesta de mejora Yusof et al. (2015) consideran que se deberán incluir parámetros adicionales para personas invidentes.

### 2.1.6. Utilización del algoritmo A\* para un sistema de navegación para personas con discapacidad visual

En la propuesta de sistema realizada por Martínez-Sala, Losilla, Sánchez-Aarnoutse y García-Haro (2015) se utilizó el algoritmo A\* para la búsqueda de la ruta óptima. De manera similar que en caso el caso del algoritmo PSO presentado en la sección 2.1.5., el algoritmo A\* solo se encarga de encontrar la ruta más corta. Otros elementos electrónicos como los *beacons* son los encargados de detectar y evitar obstáculos para que la ruta sea segura y accesible.

El algoritmo A\* empieza seleccionando el nodo menos distante al destino (catalogado como nodo fuente), a partir de ello los nodos que son adyacentes al seleccionado tendrán posibilidades para ser escogidos como el siguiente nodo de la ruta. Luego, la distancia se calculará utilizando el método de Manhattan, esta heurística ahorra tiempo en la búsqueda de la ruta porque analiza primero los caminos más probables y descarta los caminos que no son tan convenientes. Si bien existen posibilidades que el método escogido no encuentre la ruta óptima, normalmente el algoritmo obtendrá una ruta casi tan corta como la solución.

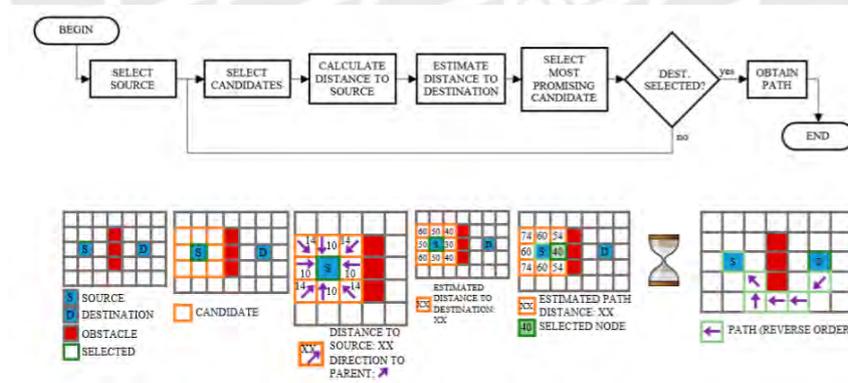


Figura 25. Flujo de trabajo del algoritmo A\* en el sistema.

Tomado de Martínez-Sala et al. (2015).

Algunas consideraciones para el tránsito de las personas con discapacidad fueron la implementación de dos configuraciones para los nodos, los cuales permiten una mayor anchura del camino y contar con una distancia mínima entre el usuario y los obstáculos presentes en el ambiente para evitar tropiezos o choques.

Finalmente, de esta revisión de la literatura sobre los modelos se pueden considerar dos tipos de planteamiento: construir un problema de programación lineal como uno de múltiples objetivos o crear una función de costos adecuada para optimizarla con un algoritmo clásico de ruteo como Dijkstra, A\* o PSO. El principal objetivo implicaría maximizar la seguridad o minimizar la inaccesibilidad de la ruta; sin embargo, queda pendiente la inclusión de otros posibles objetivos que sean requerimientos de la población de personas con discapacidad visual en Lima Metropolitana.

## **2.2. Estudios del problema de movilidad de personas con discapacidad visual en Lima Metropolitana**

De los estudios previos revisados en la literatura se propone utilizar como base las propuestas de las investigaciones de Cohen (2017), Völkel y Weber (2008) y Kammoun et al. (2010). Estas investigaciones, a diferencia de las demás que se enfocan principalmente en la distancia y evitar obstáculos, sí consideran las necesidades de las personas con discapacidad visual en la planificación de sus rutas. Los instrumentos de recolección de información considerados para la investigación de esta tesis fueron: la revisión de literatura sobre las dificultades que pueden sufrir los invidentes en Lima Metropolitana; entrevistas a profundidad con expertos en movilidad (en adelante “coordinadores”) del Centro de Rehabilitación de Ciegos de Lima (CERCIL), y encuestas realizadas a personas con discapacidad visual que viven en la ciudad de Lima. A continuación, se detalla cada uno de los instrumentos mencionados.

### **2.2.1. Movilidad urbana, espacio público y ciudadanos sin autonomía en Lima**

Según el estudio de movilidad urbana realizado por Cabrera (2019), existen diversas técnicas para que un invidente pueda navegar a través de la ciudad, entre ellas se menciona el uso de mapas

mentales como lo definió Fanucci et al. (2014). Una de las técnicas que se enseñan con mayor frecuencia en los centros de rehabilitación para personas con discapacidad visual es la técnica que consiste en desplazarse junto a la fachada de los edificios. La desventaja de esta son las barreras físicas con las que los invidentes se topan, tales como el diseño urbano defectuoso u obstáculos en las veredas. Estos obstáculos pueden clasificarse como “elevados” (las puertas de garajes, ramas de árboles y quioscos) o “de nivel” (tapas de buzones, automóviles estacionados en veredas, entradas a estacionamientos, cabinas de teléfonos, ambulantes y postes de luz). También Cabrera (2019) señala que estas técnicas por sí solas no conducen al invidente al destino final, suelen ser las personas de alrededor las que los ayudan a ubicarse y encontrar la ruta adecuada; es por esta razón, que el autor sugiere que debe recopilarse la mayor cantidad de información posible de la zona a transitar para llevar a cabo la etapa de capacitación en la cual usualmente los invidentes son acompañados por un conocido.

### **2.2.2. Estudio cualitativo**

En esta tesis para comprender y analizar los criterios más importantes que se utilizan para escoger una ruta accesible para personas con discapacidad visual, se realizaron entrevistas a dos coordinadores de orientación y movilidad de CERCIL. En estas entrevistas se abordaron temas de relevancia para la investigación tales como, las preocupaciones que tienen los peatones ciegos cuando transitan por distintas rutas en un entorno urbano; los desafíos que atraviesan para llegar a su destino y las variables que, a su parecer, deberían ser tomados en cuenta para que una ruta se pueda considerar como accesible para invidentes.

Los principales conocimientos adquiridos a partir de estas entrevistas sobre los problemas y necesidades que tienen las personas con discapacidad visual en Lima se presentan a continuación:

- **Distancia:** un factor que en problemas de ruteo se busca sea el mínimo posible no se mide con el mismo criterio que en el caso del peatón invidente. Desde la posición de los coordinadores,

para las personas con discapacidad visual este factor no resulta de gran importancia pues prefieren una ruta segura a pesar de ser larga, a una que resulte corta, pero con una gran cantidad de obstáculos. Este criterio sobre la distancia definido por los coordinadores coincide con los criterios que de Cohen (2017), Swobodzinski y Raubal (2009) y Völkel et al. (2008) utilizaron en sus investigaciones, donde este factor no tenía relevancia por sí solo sino acompañado por otros factores de accesibilidad y seguridad.

- Esquinas: este aspecto se refiere a la cantidad de giros en todo el camino que un peatón invidente tiene que realizar en cada esquina para llegar a su destino. La opinión sobre la utilidad de este elemento difiere entre los coordinadores. Por un lado, como se observa en la figura 26 en ocasiones puede ser útil para ubicarse al final de una cuadra; por otro lado, como se observa en la figura 27 puede desorientar al invidente en lugares donde el borde no está bien delimitado.



*Figura 26.* El invidente identifica la esquina como intersección de calles.

Tomado del curso Espacio Público 1 dictado en la PUCP (2017).



*Figura 27.* El invidente no puede identificar un borde inadecuado en una intersección.

Tomado de Vilcanqui (2017)

- Barreras: son los obstáculos que en su mayoría fueron mencionados en el estudio de Cabrera (2019). Según la experiencia de los coordinadores, una de las barreras físicas más frecuentes con las que las personas con discapacidad visual suelen desorientarse, chocar, tropezar o inclusive accidentarse son las playas de estacionamiento que como se observa en la figura 28 no cuenta con señalización que le permita a un peatón invidente identificarla, entre otras barreras se encuentran las obras de construcción, garajes y parques; por esta razón deberían ser excluidos de una ruta accesible. Según Cohen (2017), obstáculos como parques o espacios compartidos por el peatón y los autos también deberían ser evitados en una ruta para peatones invidentes por una razón de seguridad.



*Figura 28.* Entrada de playa de estacionamiento sin señalización adecuada para invidentes.

Tomado de Vilcanqui (2017)

- Claves ambientales: son puntos de referencia que los invidentes utilizan para ubicarse y determinar su cercanía hacia su destino. En el caso de las personas con discapacidad visual las claves ambientales son detectados mediante otros sentidos que no son los de la vista, por ejemplo, los colegios que se pueden percibir por el sentido de la audición como se observa en la figura 29; el ruido que generan los centros comerciales como se observa en la figura 30; el olor que perciben de lugares como grifos, panaderías o mercados (olfato), o elementos no móviles que se detectan mediante el bastón como grifos contra incendios y quioscos (tacto). Los coordinadores recomiendan la presencia de estos elementos en la ruta del peatón invidente.



*Figura 29.* Colegio como clave ambiental detectada por el sentido de la audición.

Tomado del curso Espacio Público 1 dictado en la PUCP (2017).



*Figura 30.* Centro comercial como clave ambiental detectado por el sentido de la audición

Tomado de Vilcanqui (2017)

- Semáforos y paraderos: son elementos importantes que los invidentes necesitan identificar, pues como manifiestan los coordinadores, son estos lugares donde los discapacitados visuales encuentran mayores posibilidades de recibir la ayuda de otras personas para cruzar la calle (como se observa en la figura 31) y también para abordar un bus. Según Cabrera (2019) esta ayuda social recibida por las personas invidentes puede ser brindada en tres lugares: en los paraderos, en los vehículos de transporte público y en las calles (veredas y cruces peatonales).



*Figura 31.* Invidente solicita ayuda para cruzar en una intersección con semáforos y paraderos.

Tomado del curso Espacio Público 1 dictado en la PUCP (2017).

Es importante señalar que los aspectos previamente explicados son cuantificados como parámetros en la sección 2.6. y tomados en cuenta en el diseño del modelo que se propone en esta tesis. Los resultados de una ruta óptima se verán reflejados en la mayor o menor cantidad de estos parámetros presentes en la ruta escogida.

### **2.2.3. Encuesta realizada a personas con discapacidad visual en Lima**

Se realizó una encuesta a 15 personas<sup>5</sup> con discapacidad visual que viven en la ciudad de Lima con el fin de esclarecer el panorama sobre las necesidades de esta población para su tránsito.

Respecto a la preferencia de una ruta accesible y segura sobre una ruta corta para llegar a su punto de destino, el 93.3% de los encuestados prefiere una ruta accesible y segura. Esto confirma las sugerencias de Cohen (2017) y Völkel et al. (2008) que planteaban una ruta segura y accesible como la ruta óptima en vez de la ruta corta.

---

<sup>5</sup> La investigación se realizó mediante encuestas a quince personas lo cual no es representativo de la población total de personas con discapacidad visual en la ciudad de Lima.

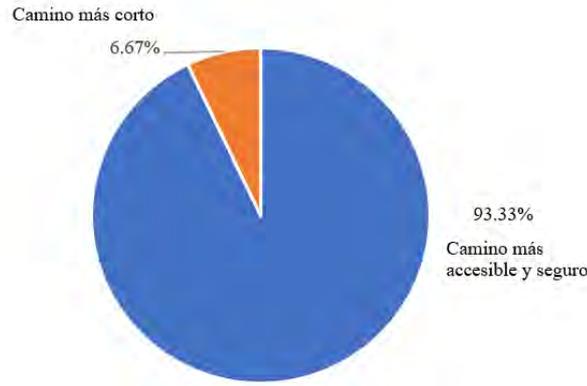


Figura 32. Preferencia de los encuestados por un tipo de camino.

Elaborado con los datos de la encuesta.

Se brindó la definición de claves ambientales a los encuestados y luego se realizó la consulta sobre las principales claves ambientales que ellos utilizan durante su tránsito por la ciudad. Como se visualiza en la figura 33, los centros comerciales son las claves ambientales que con más frecuencia detectan las personas con discapacidad visual, según los coordinadores se debe al sonido que genera la afluencia de gente en estos lugares. En segundo lugar, se encuentran las panaderías detectadas mediante el sentido del olfato. En tercer lugar, se encuentran las avenidas principales, según Cohen (2017) las avenidas principales o carreteras orientan a las personas invidentes con el sonido que generan los autos al avanzar hacia una dirección. Se puede observar que también se encuentran elementos como grifos o mercados que fueron sugeridos por los coordinadores (vea la sección 2.2.2), así como algunos elementos de apoyo (semáforos sonoros, pisos podo táctiles) que fueron mencionados en la revisión de la literatura de Aragón (2020).

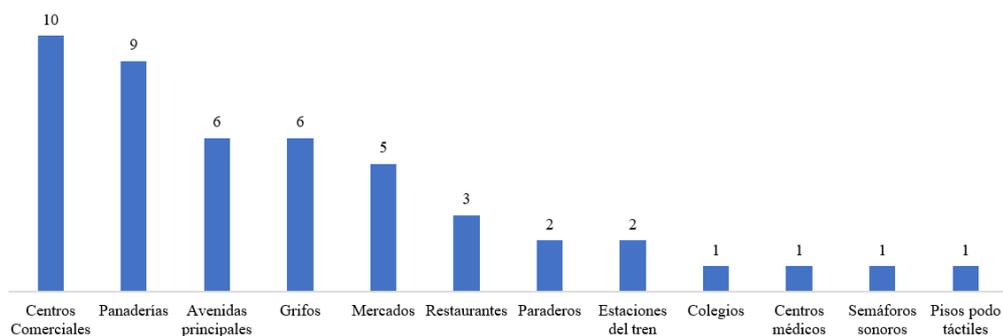


Figura 33. Claves ambientales más frecuentes para personas invidentes.

Elaborado con los datos de la encuesta.

En cuanto a los obstáculos que se encuentran en su camino, los encuestados refieren que las playas de estacionamientos son los elementos más frecuentes que les impiden transitar cómodamente, seguido de las obras de construcción y puertas levadizas.

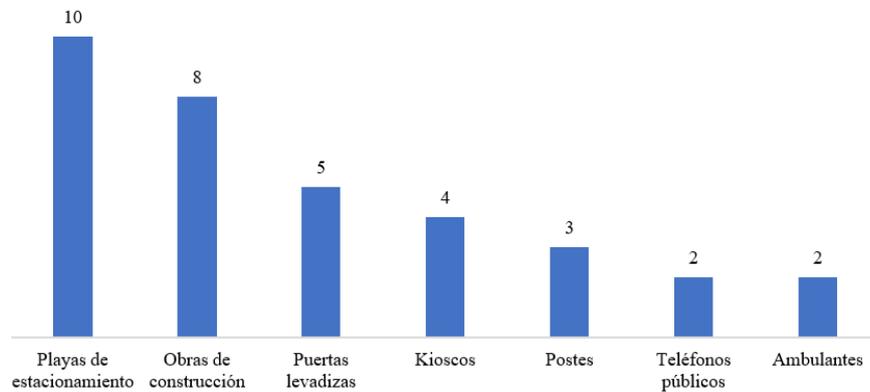


Figura 34. Obstáculos más frecuentes para personas invidentes.

Elaborado con los datos de la encuesta.

En esta misma encuesta se consultó sobre la utilidad de los paraderos y semáforos como lugares probables donde una persona con discapacidad visual puede solicitar ayuda a otras personas para que los oriente o ayude a cruzar la pista. La totalidad de los encuestados respondió que alguna vez recibió ayuda en estos lugares y también que los consideran como lugares de apoyo, así como lo sugirieron los coordinadores en la sección 2.2.2

Respecto al uso de señales peatonales accesibles como semáforos sonoros y pisos podo táctiles, el 66.7% de los encuestados indica que estas señales les ayudan a orientarse, mientras que el resto de la población indica que no les genera confianza.

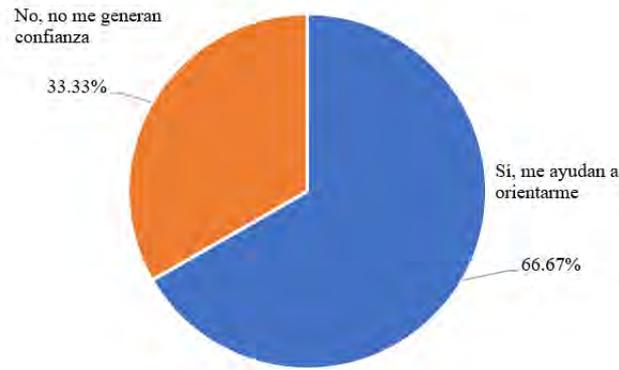


Figura 35. Uso de las señales peatonales accesibles para personas invidentes.

Elaborado con los datos de la encuesta.

Los encuestados sugieren en su mayoría una mayor sensibilización de las demás personas sin discapacidad sobre la problemática de tránsito accesible para personas con discapacidad visual, en ocasiones los encuestados no pueden acceder a algunos lugares debido a que presentan obstáculos como ambulantes en la acera, veredas mal construidas o estacionamientos de carros. Los encuestados también sugieren la instalación de elementos de apoyo como semáforos sonoros y pisos podotáctiles siempre y cuando estos se instalen en los lugares correctos, no en lugares donde hay vueltas en “U” o “L” porque representa un peligro para ellos.

De la encuesta realizada se rescata la información tanto de las claves ambientales como de los obstáculos y la confirmación de la utilidad de los semáforos y paraderos en rutas para personas con discapacidad visual. Esta información servirá para complementar la definición de los parámetros del modelo que se propone en esta tesis.

### 2.3. Planteamiento del problema

El objetivo de esta investigación es encontrar la ruta más accesible para las personas con discapacidad visual. Según Cohen (2017) una ruta es considerada como accesible cuando en esta se incluyen hitos (lo que los coordinadores de CERCIL los definen como claves ambientales) y se evitan obstáculos para que las personas con discapacidad visual puedan orientarse, transitar y

acceder a sus lugares de destino. Además, según refieren los coordinadores en la entrevista, una ruta accesible debe incluir puntos de ayuda (como semáforos y paraderos) donde los invidentes pueden solicitar algún apoyo para ubicarse o para cruzar la pista, la ruta también debe incluir esquinas de aceras bien delimitadas para que el invidente pueda identificar el final de una cuadra. Según refieren Cohen (2017) y los coordinadores entrevistados en el estudio cualitativo, la distancia no es un parámetro que se deba priorizar en una ruta accesible para una persona con discapacidad visual. De la literatura revisada se tomará como base la investigación de Cohen (2017) que emplea una función de costos multicriterio para asignarle un valor a cada tramo de la ruta para, posteriormente, minimizar la suma de estos costos acumulados en la ruta mediante el algoritmo de Dijkstra. En la sección 2.6 de esta tesis se detalla qué aspectos abarca la determinación de cada valor del tramo de la ruta; se plantea esa metodología con el fin de asemejarse lo más posible a un escenario real que contempla las necesidades y los problemas que tienen las personas con discapacidad visual en Lima Metropolitana, incluye los conocimientos adquiridos en la entrevista de la sección 2.2.2 y la encuesta de la sección 2.2.3. para definir la función de costos de los tramos.

Las zonas escogidas para plantear el problema responden a las sugerencias de los coordinadores, quienes recomiendan que los lugares más importantes a los cuales las personas con discapacidad visual necesitan acceder son los hospitales nacionales, asimismo, como afirma el INEI (2014) son los establecimientos de salud en donde las personas con discapacidad tienen mayores problemas para acceder. Por otro lado, en esos hospitales se emite el certificado de discapacidad para que las personas con discapacidad visual puedan afiliarse a la CONADIS. En esta tesis se eligió el Hospital María Auxiliadora ubicado en el distrito de San Juan de Miraflores y el Hospital Arzobispo Loayza en el distrito de Cercado de Lima por sugerencia de los coordinadores de CERCIL.

## 2.4. Metodología de trabajo

La metodología muestra los procedimientos para encontrar una ruta óptima y más accesible para una persona invidente en Lima Metropolitana.

1. La importancia de cada variable en la ruta del peatón invidente se calcula mediante un porcentaje asignado por el usuario. Las preferencias de cada persona con discapacidad visual difieren según la experiencia que tenga y la técnica o herramientas que utiliza para desplazarse (Cohen, 2017). En esta investigación se utilizan los porcentajes asignados por los coordinadores de movilidad de CERCIL y se muestran más adelante en la tabla 1.
2. Se realiza la recopilación de datos de mapeo de las zonas donde se aplicará el modelo. Se utilizará la herramienta *Open Street Map* (OSM) pues permite extraer información más detallada con respecto a la presencia de elementos en zonas urbanas. Se podrán mapear elementos importantes en la ruta accesible como obstáculos y claves ambientales. Se utiliza el lenguaje de programación *Python* mediante el paquete *OSMnx* para la extracción de los datos de georreferencia. En este mismo lenguaje se planteará el algoritmo para resolver el problema de la ruta con menor “costo”; es importante aclarar que ese “costo” no está medido en unidades monetarias, sino que es un parámetro que abarca varios aspectos como accesibilidad, seguridad, además de la distancia. Los dos primeros de acuerdo con la discusión presentada en esta tesis, son relevantes para la movilidad de los invidentes y así también lo califican Chen et al. (2015), Cohen (2017), Duarte et al. (2014), Kammoun et al. (2010) y Völkel y Weber (2008) en sus investigaciones.



Figura 36. Elementos alrededor del Hospital Arzobispo Loayza mapeado mediante OSM.

3. Luego de mapear los elementos importantes se asignará un vértice a cada intersección de las calles para construir un grafo  $G$ . En este punto se corrigen los posibles errores de conexión de nodos que pudo tener OSM y se corrobora la información de la ausencia o presencia de los obstáculos y claves ambientales mediante *Google Maps*. Con base en los resultados de las entrevistas realizada a los coordinadores de CERCIL, es necesario mapear las entradas de estacionamientos y parques como barreras; los centros comerciales, mercados y grifos o gasolineras como claves ambientales; los semáforos y paraderos como puntos de ayuda.

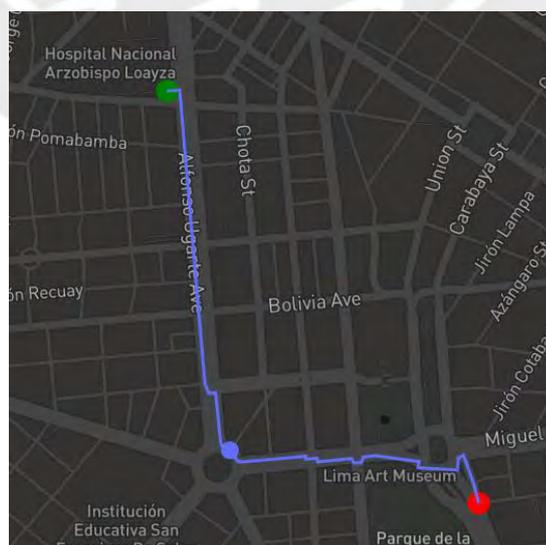


Figura 37. Ruta con nodos por corregir, extraído mediante el lenguaje de programación Python.

- Una vez que cada tramo esté identificado con los vértices del grafo  $G$  y con los elementos descritos en el estudio cualitativo se utilizará la función de costos multicriterio para asignarle un valor a cada tramo.

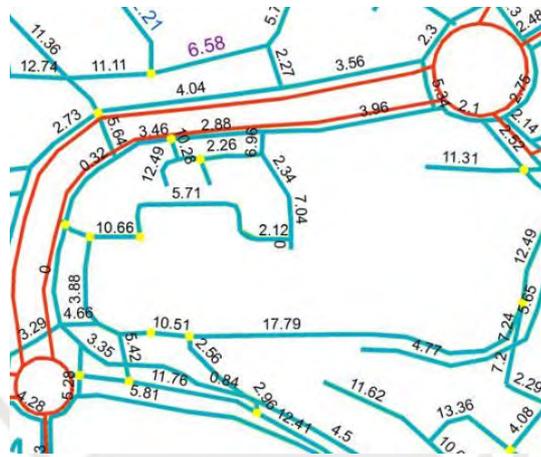


Figura 38. Tramos con el valor asignado mediante la función de costo multicriterio.

Tomado de Cohen (2017)

- Se construye el algoritmo Dijkstra como una función en *Python*, está recibirá como parámetros de entrada un diccionario con los valores de los tramos  $G$ , el vértice de partida u origen ( $v_1$ ) y el vértice final o de destino ( $v_m$ ). La función devolverá como objeto de salida la ruta y el valor del camino con la menor suma de costos.

```
def dijkstra_accesibilidad(G, v_1, v_m):
    "Funcionamiento algoritmo Dijkstra"
    return valor óptimo, ruta
```

Figura 39. Definición de la función que construirá el algoritmo de optimización.

## 2.5. Supuestos

- La ruta está libre de obstáculos como cabinas de teléfono, tapas de buzones o ambulantes en las veredas. Estos elementos no fueron considerados debido a su dificultad para ser

identificados en un mapa (en el caso de los ambulantes no son obstáculos estáticos), esto a pesar de ser considerados como los obstáculos más comunes y peligrosos por los invidentes.

2. Variables en tiempo real como la afluencia de gente, tráfico de vehículos y hora en la que se realiza el ruteo no se consideraron en la investigación.
3. La búsqueda de la ruta más segura se realiza cuando el invidente quiere dirigirse a un destino desconocido previamente. En contraste, cuando el destino sí es conocido o visitado habitualmente, las personas con discapacidad visual suelen seguir distintas técnicas que aprendió para dirigirse a su destino.

## 2.6. Formulación del modelo

Para encontrar una ruta que pueda ser transitada en Lima Metropolitana, se definirán los puntos de destino y origen que pertenecerán a una red de nodos conectados mediante arcos o tramos valorizados. Estos valores serán asignados mediante una función de costos multicriterio que medirá cuánto se adapta un tramo a las necesidades de un peatón invidente (accesibilidad). Los elementos que hagan inaccesible la ruta incrementarán el valor de la función, mientras que los elementos que ayuden al invidente a transitar por la ruta disminuirán el valor de inaccesibilidad de la función.

El objetivo será minimizar la suma de valores del tramo para que sea lo más accesible posible. A continuación, se definirán las variables y pesos necesarios para construir esta función de costos.

### Conjuntos e índices

$V = \{\text{Conjunto de vértices o nodos en el grafo}\}; i, j \in V$

$E = \{\text{Conjunto de tramos o arcos entre vértices}\}; (i, j) \in E$

$C = \{\text{Conjunto de costos de los tramos entre cada vértice}\}; c_{(i,j)} \in C$

### Variables de decisión

$$X_{ij} \left\{ \begin{array}{l} 1, \quad \text{se utiliza el tramo } \epsilon E \text{ que inicia en el nodo } i \in V \text{ y termina en el nodo } j \in V \\ 0, \quad \text{no se utiliza el tramo } \epsilon E \text{ que inicia en el nodo } i \in V \text{ y termina en el nodo } j \in V \end{array} \right\}$$

### Parámetros

Para esta función se definieron cinco parámetros con los conocimientos adquiridos a partir del estudio cualitativo de la sección 2.2.2, estos parámetros son cuantificados para luego ser incluidos dentro del modelo de optimización mediante una función de costos multicriterio:

1. Longitud del camino ( $p_1$ ): se mide en metros, mientras esta variable sea mayor tendrá un efecto incremental en la función de costos multicriterio.

$p_1(i,j)$ : distancia en metros que mide el tramo desde el nodo  $i \in V$  al nodo  $j \in V$ .

2. Presencia de esquina ( $p_2$ ): se mide como una variable dicotómica, en caso el tramo siguiente se desvíe en una esquina del tramo analizado tomará el valor de 1, caso contrario tendrá un valor de 0. Como se mencionó en la sección 2.2.2 del estudio cualitativo, los coordinadores difieren en su opinión sobre la utilidad de este parámetro en la orientación del invidente. Mientras que el coordinador 2 considera que una esquina orienta a un invidente porque le permite determinar el fin de una cuadra o tramo, el coordinador 1 opina que este elemento desorienta al invidente porque no todas las esquinas se delimitan correctamente (lo que puede llevar a que el invidente invada la pista) o porque el ángulo que forma la esquina desorienta al invidente (no todas las esquinas son perpendiculares y los invidentes se pueden fiar que están girando  $90^\circ$  en cada esquina rumbo a su destino). Dependiendo de la experiencia del invidente con este elemento el parámetro puede ser un obstáculo para transitar hacia su destino e incrementar la función de costo o ser un elemento útil y disminuir la función de costo multicriterio.

$$p_2(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{si el siguiente tramo } (i,j) \text{ es una esquina} \\ 0, & \text{si el siguiente tramo } (i,j) \text{ no es una esquina} \end{cases}$$

3. Barreras ( $p_3$ ): también se define como una variable dicotómica tomando el valor de 1 con la presencia de una barrera y el valor de 0 en su ausencia. Para esta investigación se define como barrera las entradas de playas de estacionamiento y los parques. Elementos importantes como obras de construcción fueron excluidos, pues no son obstáculos constantes en una ruta y son difíciles de identificar en los mapas. La presencia de este elemento también tendrá un efecto incremental en la función de costos multicriterio.

$$p_3(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{si en el tramo } (i,j) \text{ existe presencia de una barrera} \\ 0, & \text{si en el tramo } (i,j) \text{ no existe presencia de una barrera} \end{cases}$$

4. Claves ambientales ( $p_4$ ): es una variable dicotómica que define la presencia (con valor 1) o ausencia (con valor 0) de una clave ambiental en el tramo analizado. En esta investigación se define a las claves ambientales como centros comerciales, mercados y grifos o gasolineras. Los elementos como panaderías, kioscos no se tomaron en cuenta por su dificultad para identificar en un mapa. La presencia de esta variable disminuirá la función de costos multicriterio.

$$p_4(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{si en el tramo } (i,j) \text{ existe presencia de una clave ambiental} \\ 0, & \text{si en el tramo } (i,j) \text{ no existe presencia de una clave ambiental} \end{cases}$$

5. Puntos de ayuda ( $p_5$ ): esta variable dicotómica se refiere a la presencia (tomando el valor de 1) de semáforos o paraderos en la ruta. La presencia de esta variable disminuirá la función de costos multicriterio.

$$p_5(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{si en el tramo } (i,j) \text{ existe presencia de puntos de ayuda} \\ 0, & \text{si en el tramo } (i,j) \text{ no existe presencia de puntos de ayuda} \end{cases}$$

### Importancia de los parámetros

Se debe asignar un peso a cada variable para calcular el valor del tramo que une los nodos. Por esta razón, en la entrevista a profundidad realizada a los expertos se pidió a los coordinadores que, de manera individual, asignaran valores entre 0% y 100% (con una suma total de 100%) para cuantificar el peso de importancia de las variables. Se pidió la asignación de manera separada, porque cada coordinador consideraba distintos grados de importancia a cada variable. La tabla 1 muestra los pesos asignados a cada parámetro.

Tabla 1

*Calificaciones de importancia de cada variable en porcentaje asignado por los coordinadores de CERCIL*

Parámetro	Coordinador 1	Coordinador 2
Peso de importancia de la longitud del camino ( $c_1$ )	5%	5%
Peso de importancia de la presencia de esquina ( $c_2$ )	10%	60%
Peso de importancia de las barreras ( $c_3$ )	60%	10%
Peso de importancia de las claves ambientales ( $c_4$ )	15%	20%
Peso de importancia de los puntos de ayuda ( $c_5$ )	10%	5%

**Nota.** Información obtenida mediante entrevistas a profundidad.

Como se observa en la tabla 1 la percepción del parámetro más importante difiere según la experiencia adquirida por cada coordinador al momento de orientar a un invidente en su tránsito por la ciudad. Por lo tanto, se plantearán dos escenarios considerando los pesos que asignaron cada experto a los parámetros y se compararán las rutas determinadas por el algoritmo de optimización.

### **Función de costos multicriterio**

De esta forma la función de costos multicriterio para cada tramo  $(i, j)$  de la ruta se define de la siguiente forma:

$$c_{i,j} = c_1p_{1,i,j} + c_2p_{2,i,j} + c_3p_{3,i,j} + c_4p_{4,i,j} + c_5p_{5,i,j}$$

Donde  $c_1, c_2, c_3, c_4$  y  $c_5$  son las calificaciones asignadas por los coordinadores a la importancia (tabla 1) de cada parámetro ( $p_1, p_2, p_3, p_4$  y  $p_5$ ) en la ruta, esto puede diferir dependiendo de las preferencias del usuario invidente. De esta manera, la función de costos multicriterio permite la creación de un grafo en el que cada tramo tiene un valor adecuado a las características valoradas por las personas con discapacidad visual según lo sugerido por los coordinadores, los encuestados y Cabrera (2019). Este grafo permitirá identificar rutas que en lugar de solo ser las más cortas, se ajustan a las necesidades de las personas con discapacidad visual, son más seguras y permitirán a los peatones invidentes a navegar y orientarse fácilmente (Cohen, 2017). En la sección 2.7 se incluirá esta función de costos en el modelo de optimización para incluir los parámetros con sus respectivos pesos de importancia en la búsqueda de una ruta más segura y accesible.

### **Normalización de los criterios**

En las investigaciones de Cohen (2017) y Völkel y Weber (2008) se aplicó un proceso de normalización de los parámetros para evitar que los rangos de uno tengan un mayor impacto sobre otro. En este caso el parámetro  $p_1$  podría tener un rango muy amplio y una influencia muy grande

en la función de costos multicriterio, lo cual es opuesto al porcentaje de importancia calificado por los coordinadores (es el de menor importancia con un 5%).

Se aplicará una normalización tipo min-máx, de esta manera el parámetro  $p_1$  se encontrará en el mismo rango de valor (0 y 1) que el resto de parámetros.

$$p_{1i,j} = \left\{ \frac{p_{1i,j} - \min(p_1)}{\max(p_1) - \min(p_1)} \right\}$$

Al realizar la normalización y calcular el costo para cada tramo se encontró que la gran mayoría de los valores de los tramos resultó ser negativo, esto se debe a que los coordinadores asignaron pesos muy grandes (60%) a parámetros como esquinas y barreras. Por ello al valor de la función de costo multicriterio también fue normalizado mediante normalización tipo min-máx para que los valores de costo de los tramos sean positivos y mayores a cero (como se aplica en el algoritmo de Dijkstra).

## 2.7. Modelación matemática

Se diseña un grafo  $G = (V, E, C)$ , donde  $V$  representan los vértices de nodos, el uso de los tramos  $(i, j)$  se denotan por  $X_{ij}$  y  $C$  representa el costo de estos tramos. Los costos de estos tramos son los que incluyen los aspectos definidos por los coordinadores en la sección 2.6. al modelo. La red debe tener dos vértices específicos un origen (1) y un destino ( $m$ ) (donde  $1, m \in V$ ). El problema consiste en encontrar la ruta de costo mínimo iniciando en el vértice origen y terminando en el vértice destino, es decir se busca minimizar  $\sum c_{i,j}X_{i,j}$ .

El problema de la ruta más corta se puede plantear como el envío de una unidad de flujo del vértice origen 1 al vértice destino  $m$ , para esto el vértice origen oferta una unidad y la demanda del vértice destino también es uno. Entonces, el planteamiento se define de la siguiente manera:

*Función objetivo: Minimizar* 
$$\sum_{i,j \in V}^m c_{ij}X_{ij}$$

*Sujeto a:*

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} - \sum_{k=1}^m X_{ki} = 1 \quad \text{si } i = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} - \sum_{k=1}^m X_{ki} = 0 \quad \text{si } i \neq 1 \text{ y } i \neq m \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} - \sum_{k=1}^m X_{ki} = -1 \quad \text{si } i = m \quad (3)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, m$$

La función objetivo busca minimizar la suma de todos los costes  $c_{ij}$  multiplicado por cada tramo  $(i, j)$  utilizado donde  $X_{ij}$  es una variable dicotómica que representa la utilización de este tramo en la ruta. La restricción (1) permite que se genere una ruta a partir de 1 pues oferta una unidad de flujo; la restricción (2) permite un flujo de unidades entre los tramos que no son de origen y destino generando la ruta entre los puntos de origen y destino, asimismo, la unidad que visita el nodo  $i$  es también la que sale; la restricción (3) permite que la ruta termine en el destino  $m$  pues demanda una unidad de flujo. Este problema de encontrar la ruta con menor coste se resolverá con el algoritmo Dijkstra.

## 2.8. Aplicación del algoritmo Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra resuelve el problema de caminos mínimos, para este caso partirá de un vértice origen (1) a un vértice destino ( $m$ ) en un grafo dirigido ( $G$ ), donde cada costo del tramo es mayor a cero ( $c_{ij} \geq 0$ ). El algoritmo explora iterativamente los tramos más cortos del conjunto de vértices ( $V$ ), y cada vez que encuentra un nodo que genera la ruta mínima estimada lo añade al

conjunto de nodos solución, el algoritmo funciona en grafos con aristas que no tienen costo negativo (Cormen, Leiserson, Rivest, & Stein, 2009).

En esta investigación se utilizará el proceso definido para el algoritmo de Dijkstra según Coto (2003) y se explicará la implicancia de estos en la codificación del algoritmo en el lenguaje de programación *Python*:

**Paso 1:** debe existir un conjunto  $V$  de vértices para los cuales se tiene conocimiento de su distancia más corta hacia el origen.

En la función de *Python* (figura 40) se ingresará como input un diccionario  $G$  (figura 41) con los datos de los valores  $c_{ij}$  entre los vértices  $(i, j)$ , además de los nombres de los vértices de inicio (1) y destino ( $m$ ).

```
def dijkstra_accesibilidad(G, inicio, destino):
    valor_tramos_D = {}           #La ruta más corta será un valor que se actualizará mientras analiza las distintas rutas.
    predecesor = {}              #El predecesor se actualizará mientras se analicen los vértices.
    todos_los_vertices = G      #El algoritmo necesita analizar todos los vértices.
    infinito = 9999999           #Se define infinito como un número muy grande, más grande que los valores de los tramos.
    ruta_P = []                 #La ruta se actualizará con los vértices que pertenecen a la ruta óptima (accesible)
```

Figura 40. Inputs que ingresan a la función.

```
G = {'1': {'2': 542, '3': 328},
     '2': {'3': 145, '4': 438},
     '3': {'2': 434, '4': 823, '5': 245},
     '4': {'5': 745},
     '5': {'4': 932}}
```

Figura 41. Diccionario de Python que indica los costes entre vértices.

**Paso 2:** el conjunto de vértices  $V$  inicialmente contiene solo el vértice de inicio.

Inicialmente se le asigna el valor de 0 al vértice de origen mientras que los demás vértices tienen un valor grande denominado “infinito” (figura 42). En la función de *Python* se crea una variable “infinito” y se le asigna el número 9999999.

```

for vertice in todos_los_vertices:
    valor_tramos_D[vertice] = infinito #Al comienzo todos los valores de los tramos son infinito a excepción del vértice inicio.
valor_tramos_D[inicio] = 0 #El vértice inicio toma el valor de 0.

```

Figura 42. Asignación de etiquetas a los vértices en la primera iteración.

**Paso 3:** en cada iteración del algoritmo se agrega el vértice iterado al conjunto  $V$ , cuya distancia desde del vértice origen es la más corta posible.

En la función de *Python* se analizan todos los vértices (figura 43) que conforman el conjunto  $V$ .

```

while todos_los_vertices: #Se analizan todos los vértices.
    minVer = None
    for ver in todos_los_vertices:
        if minVer is None:
            minVer = ver
        elif valor_tramos_D[ver] < valor_tramos_D[minVer]:
            minVer = ver

```

Figura 43. Iteraciones de la función en cada vértice.

**Paso 4:** en cada iteración el algoritmo de Dijkstra utiliza un arreglo  $[D]$  el cual servirá para acumular la longitud del camino más corto de cada vértice. En el momento que el conjunto  $V$  incluya todos los vértices iterados, el arreglo  $[D]$  obtendrá la distancia más corta del origen a cada vértice de destino.

En la función de *Python* (figura 44) se definió una variable ( $\text{valor\_tramos\_D}$ ) que se actualiza cuando encuentra el camino más corto hacia un vértice.

```

for vertice_prueba, valor_accesibilidad in G[minVer].items(): #Se actualiza la ruta con el menor valor.
    if valor_accesibilidad + valor_tramos_D[minVer] < valor_tramos_D[vertice_prueba]:
        valor_tramos_D[vertice_prueba] = valor_accesibilidad + valor_tramos_D[minVer]
        predecesor[vertice_prueba] = minVer
todos_los_vertices.pop(minVer)

```

Figura 44. Actualización del arreglo  $D$ .

**Paso 5:** en este método se debe crear un arreglo  $[P]$  que almacenará los vértices que pertenecen a la ruta y por los que se tiene que recorrer.

En la función de *Python* la variable `ruta_P` almacena los vértices que pertenecen a la ruta óptima (figura 45).

```

vertice_actual = destino
while vertice_actual != inicio:      #Comienza a retroceder a través de los vértices para darnos la ruta hasta el vértice inicio.
    try:
        ruta_P.insert(0,vertice_actual)
        vertice_actual = predecesor[vertice_actual]
    except KeyError:
        print('La ruta no está conectada')
        break

```

Figura 45. Almacenamiento de los vértices de la ruta óptima en el arreglo P.

**Paso 6:** en caso todos los vértices hayan sido analizados se termina el algoritmo, en otro caso se sigue iterando.

Finalmente, toda la estructura del código que define la función de *Python* “`dijkstra_accesibilidad`” se muestra a continuación en la figura 46.

```

def dijkstra_accesibilidad(G, inicio, destino):
    valor_tramos_D = {}
    predecesor = {}
    todos_los_vertices = G
    infinito = 9999999
    ruta_P = []
    for vertice in todos_los_vertices:
        valor_tramos_D[vertice] = infinito
    valor_tramos_D[inicio] = 0

    while todos_los_vertices:
        minVer = None
        for ver in todos_los_vertices:
            if minVer is None:
                minVer = ver
            elif valor_tramos_D[ver] < valor_tramos_D[minVer]:
                minVer = ver

        for vertice_prueba, valor_accesibilidad in G[minVer].items():
            if valor_accesibilidad + valor_tramos_D[minVer] < valor_tramos_D[vertice_prueba]:
                valor_tramos_D[vertice_prueba] = valor_accesibilidad + valor_tramos_D[minVer]
                predecesor[vertice_prueba] = minVer
        todos_los_vertices.pop(minVer)

    vertice_actual = destino
    while vertice_actual != inicio:
        try:
            ruta_P.insert(0,vertice_actual)
            vertice_actual = predecesor[vertice_actual]
        except KeyError:
            print('La ruta no está conectada')
            break
    ruta_P.insert(0, inicio)
    if valor_tramos_D[destino] != infinito:
        print('El valor óptimo es ' + str(valor_tramos_D[destino]))
        print('La ruta es ' + str(ruta_P))

```

Figura 46. Algoritmo Dijkstra codificado en Python.

Esta función nos devuelve como resultado la ruta óptima con la menor suma de costos, definiendo una ruta que sea más accesible para un peatón invidente según las necesidades que el propio usuario sugirió.



### Capítulo 3. Discusión de los resultados

Este capítulo presenta la solución del modelo en los espacios públicos escogidos (el Hospital Arzobispo Loayza y el Hospital María Auxiliadora), la discusión de los resultados y las propuestas de gestión de tránsito accesible para invidentes. Se presentan soluciones del modelo con dos puntos de partida distinto, con el fin de señalar las ventajas que se obtuvo, así como las limitaciones que se generaron utilizando la metodología propuesta.

#### 3.1. Resolución del modelo con el Hospital Arzobispo Loayza como destino

El primer mapeo se realiza en los alrededores del Hospital Arzobispo Loayza, la figura 47 muestra en color celeste los tramos de los caminos que utilizan los peatones para transitar en esta zona, en cada intersección de los tramos se encuentra un nodo que será utilizado en el modelo. En el mapeo de esta zona se observó que una gran cantidad de elementos definidos en los parámetros como semáforos, paraderos, parques, playas de estacionamiento, mercados y centros comerciales están correctamente ubicados en el mapa definido por OSM.



Figura 47. Mapeo de los alrededores del Hospital Arzobispo Loayza

En adelante, en las soluciones se denota el punto de partida como un punto de color rojo y el punto de destino como un punto de color verde; la ruta corta (RC) se denota como una línea color celeste, la ruta más accesible según el coordinador 1 (RAC1) se denota como una línea color naranja y la

ruta más accesible según el coordinador 2 (RAC2) se denota como una línea color morado. Se presentarán las tres rutas en una misma figura para comparar la presencia de los elementos definidos en los parámetros.

### 3.1.1. Escenario 1

El primer escenario tiene como punto de partida la Estación Central del Metropolitano. A continuación, en la figura 48, se mostrarán los resultados que encontró el algoritmo Dijkstra para la ruta más corta (RC), para la ruta más accesible según el coordinador 1 (RAC1) y para la ruta más accesible según el coordinador 2 (RAC2).

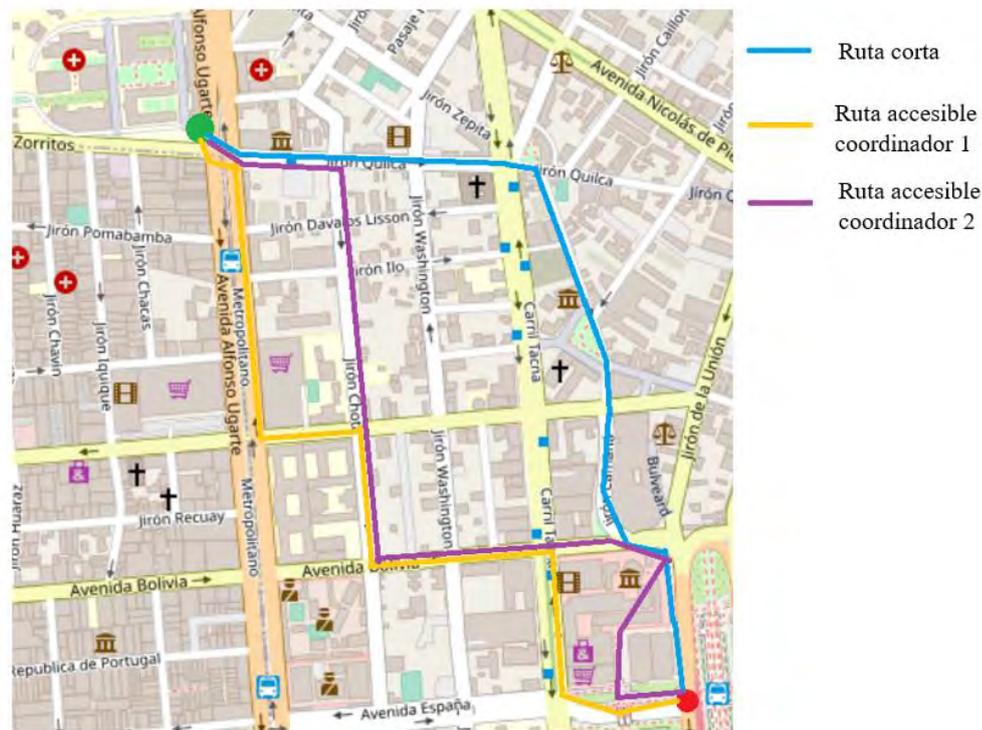


Figura 48. Rutas encontradas por el algoritmo para el escenario 1 del Hospital Arzobispo Loayza.

En la ruta corta se transita por tramos que pertenecen a parques (parque La Libertad) y por tres playas de estacionamientos, estos elementos definidos como barreras ( $p_3$ ) no permiten a las personas con discapacidad visual acceder a su lugar del destino, por ello estos tramos tendrán un costo mayor en el modelo con el fin de que el algoritmo los evite en las rutas accesibles.

En la RAC1 efectivamente se evita el parque que la ruta corta incluyó, además de evitar tres playas de estacionamientos que estaban incluidos en la ruta corta. Se obtienen más puntos de ayuda ( $p_5$ ) y menos barreras ( $p_3$ ) que la ruta corta.

En la RAC2 se evita el parque y las playas de estacionamiento que estaban incluidos en la ruta corta y la RAC1, Además, se obtienen más claves ambientales ( $p_4$ ) que en la ruta RAC1.

A continuación, se muestra la tabla 2 con una comparación de los resultados obtenidos por los parámetros definidos en la sección 2.6 para cada ruta.

Tabla 2

*Comparación de los parámetros obtenidos por ruta corta y rutas accesibles en el escenario 1 del Hospital Arzobispo Loayza*

Parámetro	RC	RAC1	RAC2
Longitud del camino ( $p_1$ )	1 345 m	1 493 m	1 700 m
Presencia de esquina ( $p_2$ )	11 esquinas	10 esquinas	12 esquinas
Barreras ( $p_3$ )	4 barreras	1 barrera	1 barrera
Claves ambientales ( $p_4$ )	2 claves	1 clave	2 claves
Puntos de ayuda ( $p_5$ )	6 puntos	10 puntos	9 puntos

Se puede observar que efectivamente la RC obtuvo la menor longitud, sin embargo, son las RAC1 y RAC2 las que tienen una mayor cantidad de elementos que ayudan a una persona a acceder a su lugar de destino (esquinas, claves ambientales y puntos de ayuda), mientras que la RC es la que tiene una mayor cantidad de barreras.

Respecto a la función de costo que mide la accesibilidad del camino, la RAC1 obtuvo un valor de 9.31 y la RAC2 obtuvo un valor 8.13.

De este escenario se concluye las rutas accesibles RAC1 y RAC2, a pesar de ser rutas con una mayor longitud, tienen elementos que permiten un tránsito más accesible para las personas con discapacidad visual porque tienen una mayor cantidad de elementos que ayudan en su tránsito y una menor cantidad de elementos que le impiden transitar de manera segura. Además, se concluye que la RAC2 es la ruta óptima (la ruta más accesible) porque el algoritmo calculó el menor valor (8.13) en esta ruta. Por otro lado, la ruta más larga es la RAC2 con 1 700 metros de longitud; sin embargo, esta ruta es la que evita la mayoría de las barreras y presenta el mayor número de esquinas.

### **3.1.2. Escenario 2**

El segundo escenario tiene como punto de partida el Centro Comercial Malvinas. A continuación, en la figura 49, se mostrarán los resultados que encontró el algoritmo Dijkstra para la ruta más corta (RC), para la ruta más accesible según el coordinador 1 (RAC1) y para la ruta más accesible según el coordinador 2 (RAC2).

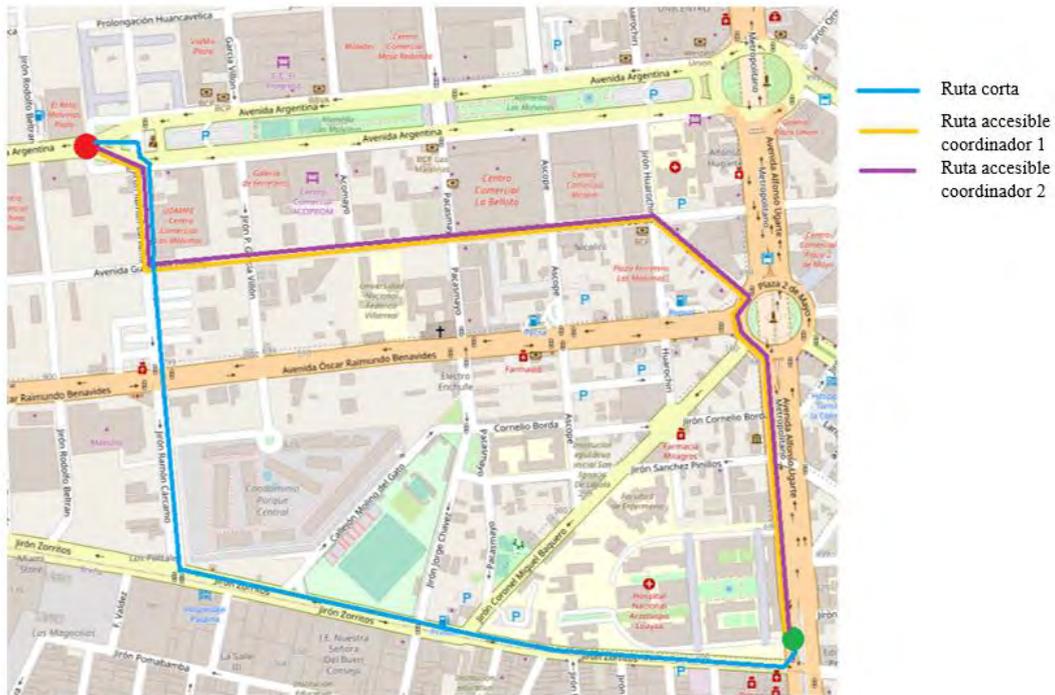


Figura 49. Rutas encontradas por el algoritmo para el escenario 2 del Hospital Arzobispo Loayza.

En la zona mapeada solo se observa un elemento de tipo barrera (playa de estacionamiento) para llegar al destino en las rutas obtenidos por el algoritmo, esta barrera pertenece a la RC. De igual manera que en el anterior escenario, este tramo tendrá un costo mayor en el modelo con el fin de que el algoritmo lo evite en las rutas accesibles.

En el escenario 2 la RAC1 y RAC2 coinciden a pesar que los pesos de importancia por cada coordinador son distintos, aun así en estas rutas se evitan todas las barreras existentes además de transitar por tres centros comerciales, los cuales son las claves ambientales utilizados con mayor frecuencia por las personas encuestadas en la sección 2.2.3. En todas las rutas se evitó el parque Coronel Miguel Baquero, el cual se encuentra a espaldas del Hospital Arzobispo Loayza.

A continuación, se muestra la tabla 3 con los resultados obtenidos por los parámetros definidos en la sección 2.6 para cada ruta.

Tabla 3

*Comparación de los parámetros obtenidos por ruta corta y rutas accesibles en el escenario 2 del Hospital Arzobispo Loayza*

Parámetro	RC	RAC1	RAC2
Longitud del camino ( $p_1$ )	1 592 m	1 621 m	1 621 m
Presencia de esquina ( $p_2$ )	8 esquinas	14 esquinas	14 esquinas
Barreras ( $p_3$ )	1 barreras	0 barrera	0 barreras
Claves ambientales ( $p_4$ )	2 claves	3 claves	3 claves
Puntos de ayuda ( $p_5$ )	4 puntos	3 puntos	3 puntos

Respecto a la función de costo que mide la accesibilidad del camino, la RAC1 obtuvo un valor de 7.84, en cambio la RAC2 obtuvo un valor de 6.97.

Para este escenario se concluye que las rutas accesibles RAC1 y RAC2, a pesar de ser rutas con una mayor longitud, tienen elementos que permiten un tránsito más accesible para las personas con discapacidad visual porque tienen una mayor cantidad de elementos que ayudan en su tránsito (esquinas y claves ambientales) y una menor cantidad de elementos que le impiden transitar de manera segura (barreras). Además, la RAC2 pueden ser considerada como la ruta óptima (la ruta más accesible) porque el algoritmo calculó el menor valor de costo (6.97) en esta ruta. Ambas rutas accesibles son un poco más largas que la ruta más corta, pero a su vez son más accesibles porque cuentan con una clave ambiental más y no tienen la barrera de la playa de estacionamiento entre sus tramos.

### 3.2. Resolución del modelo con el Hospital María Auxiliadora como destino

El segundo mapeo se realiza en los alrededores del Hospital María Auxiliadora, de manera similar a la sección 3.1. la figura 50 muestra en color celeste los tramos de los caminos que utilizan los peatones para transitar a través de ciudad. Cabe recalcar que en esta zona no hay tantos elementos definidos por los parámetros como sí los había en el Hospital Arzobispo Loayza.



Figura 50. Mapeo realizado alrededor del Hospital María Auxiliadora.

De igual forma que en la sección 3.1, en las soluciones se denota el punto de partida como un punto color rojo y el punto de destino como un punto color verde; la ruta corta (RC) se denota como una línea color celeste, la ruta más accesible según el coordinador 1 (RAC1) se denota como una línea color naranja y la ruta más accesible según el coordinador 2 (RAC2) se denota como una línea color morado.

#### 3.2.1. Escenario 1

El escenario 1 tiene como punto de partida el Instituto Educativo San Juan. A continuación, se mostrarán los resultados que encontró el algoritmo Dijkstra para la ruta más corta (RC), para la ruta más accesible según el coordinador 1 (RAC1) y para la ruta más accesible según el coordinador 2 (RAC2).

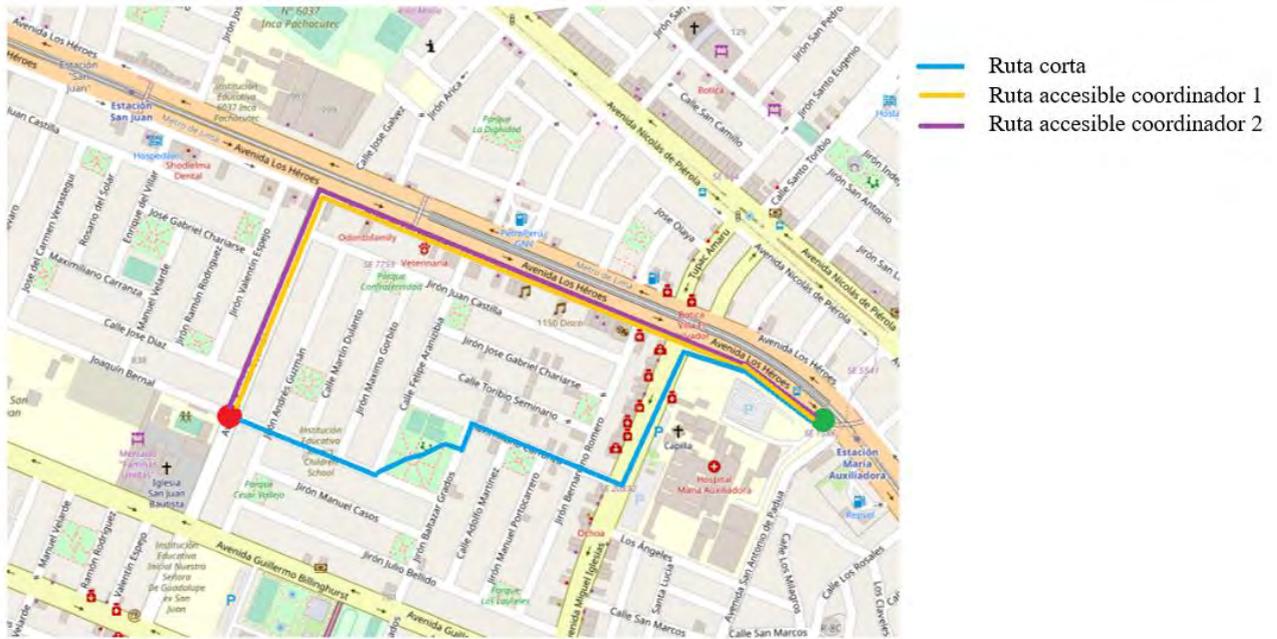


Figura 51. Rutas encontradas por el algoritmo para el escenario 1.

A través de la ruta corta se transitan por tramos que pertenece a dos parques, los cuales son elementos desorientadores porque son espacios amplios, estos tramos tendrán un costo mayor en el modelo con el fin de que el algoritmo lo evite en las rutas accesibles.

En este escenario la RAC1 y RAC2 coinciden, en estas rutas se evitan todas las barreras existentes (parques). No hay presencia de claves ambientales.

A continuación, se muestra la tabla 4 con los resultados obtenidos por los parámetros definidos en la sección 2.6 para cada ruta.

Tabla 4

*Comparación de los parámetros obtenidos por ruta corta y rutas accesibles en el escenario 1 del Hospital María Auxiliadora*

Parámetro	RC	RAC1	RAC2
Longitud del camino ( $p_1$ )	955 m	1 027 m	1 027 m
Presencia de esquina ( $p_2$ )	10 esquinas	4 esquinas	4 esquinas
Barreras ( $p_3$ )	3 barreras	0 barreras	0 barreras
Claves ambientales ( $p$ )	0 claves	0 claves	0 claves
Puntos de ayuda ( $p_5$ )	0 puntos	1 punto	1 punto

Respecto a la función de costo que mide la accesibilidad del camino, la RAC1 obtuvo un valor de 3.24, mientras que la RAC2 obtuvo un valor de 2.91.

Para este escenario se concluye que las rutas accesibles RAC1 y RAC2, a pesar de ser rutas con una mayor longitud, tienen elementos que permiten un tránsito más accesible para las personas con discapacidad visual porque tienen una mayor cantidad de elementos que ayudan en su tránsito (puntos de ayuda) y no tiene elementos que le impidan transitar adecuadamente (parques y playas de estacionamiento). Además, la RAC2 puede ser considerada como la ruta óptima (la ruta más accesible) porque el algoritmo calculó el menor costo (2.91) para esta ruta. Ambas rutas son más largas que la ruta más corta, pero a su vez son más accesibles pues cuentan con un punto de ayuda más y no tienen las barreras de los parques y playas de estacionamiento entre sus tramos.



extraña en la avenida José Carlos Mariátegui donde no se observa presencia de algún obstáculo o barrera que justifique dicho desvío.

A continuación, se muestra la tabla 5 con los resultados obtenidos por los parámetros definidos en la sección 2.6. para cada ruta.

Tabla 5

*Comparación de los parámetros obtenidos por ruta corta y rutas accesibles en el escenario 2 del Hospital María Auxiliadora*

Parámetro	RC	RAC1	RAC2
Longitud del camino ( $p_1$ )	1 033 m	1 046 m	1 173 m
Presencia de esquina ( $p_2$ )	9 esquinas	11 esquinas	14 esquinas
Barreras ( $p_3$ )	1 barrera	0 barreras	0 barreras
Claves ambientales ( $p_4$ )	0 claves	1 clave	2 claves
Puntos de ayuda ( $p_5$ )	2 puntos	2 puntos	1 punto

Respecto a la función de costo que mide la accesibilidad del camino, la RAC1 obtuvo un valor de 5.28, por su parte la RAC2 obtuvo un valor menor e igual a 4.75.

Para este escenario se concluye que las rutas accesibles RAC1 y RAC2, a pesar de ser rutas con una mayor longitud, tienen elementos que permiten un tránsito más accesible para las personas con discapacidad visual porque tienen una mayor cantidad de elementos que ayudan en su tránsito (esquinas y claves ambientales) y la RAC1 tiene una menor cantidad de elementos que impide a los invidentes transitar de manera segura (barreras). La RAC2 es la ruta óptima pues obtiene un

menor valor de la función de costo (4.75), tiene cinco esquinas adicionales y dos claves ambientales más que la ruta corta, además que no hay presencia de barreras en su camino.

### **Análisis de resultados**

A continuación se comparan las diferencias que hubo entre las rutas cortas y las rutas definidas por los coordinadores. Estas comparaciones dependerán de la utilidad de cada parámetro: para el caso de distancia se compara la distancia adicional que las rutas accesibles generan a comparación de la ruta corta; para el caso de las esquinas, claves ambientales y puntos de ayuda se compara la cantidad adicional de estos elementos que obtuvieron las rutas accesibles con respecto a la ruta corta; por último, para el caso de las barreras, se compara cuál de las rutas evitó más barreras que están incluidas en las rutas cortas. Además, se indica si estos resultados tuvieron sentido con los porcentajes de importancia asignados a los criterios por los coordinadores en la sección 2.2.2.

#### **Longitud del camino ( $p_1$ )**

Para la longitud del camino se considera negativo que una ruta sea más larga que la RC; sin embargo, de acuerdo con la literatura expuesta en esta investigación, ese parámetro tiene menor importancia en la determinación de la accesibilidad. En la figura 53 se observa la suma total de las longitudes de los cuatro escenarios para cada ruta; los resultados muestran que la longitud total de la RAC1 obtuvo 261 metros más de longitud que la ruta corta mientras que en el caso de la RAC2 obtuvo 596 metros más.

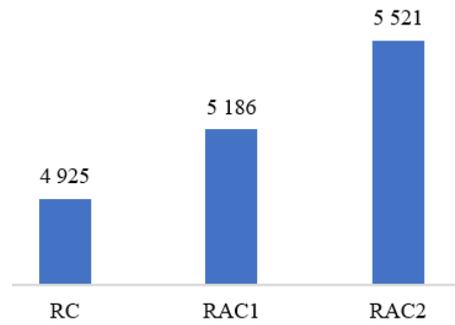


Figura 53. Comparación de la longitud total entre las rutas accesible con la ruta corta

En cada escenario el modelo obtuvo rutas accesibles más largas que la ruta corta, esto tiene sentido si consideramos que los coordinadores no le asignaron un peso alto al parámetro longitud (ambos propusieron el 5%).

#### Presencia de esquina ( $p_2$ )

En cuanto a esquinas en total si hubo una diferencia notoria entre la cantidad de este elemento presente en las rutas. Como se observa en la figura 54, en las RAC1 se obtuvo (en total) una esquina más que la RC, mientras que la RAC2 obtuvo seis esquinas más.

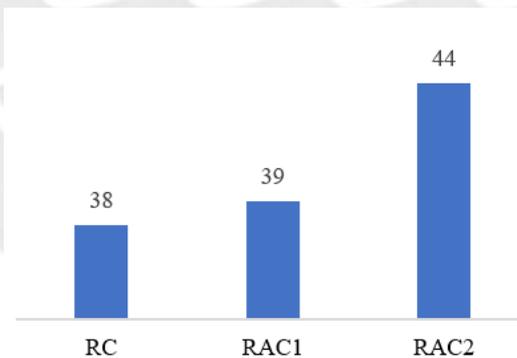


Figura 54. Comparación de cantidad de esquinas entre las rutas accesibles con las rutas cortas.

Esta diferencia tiene sentido al corroborar el peso que le asignó cada coordinador; como se explicó en el estudio cualitativo de la sección 2.2.2 para el coordinador 2 este es un elemento que ayuda a la persona con discapacidad visual a moverse, es decir, es un elemento que cumple con el objetivo de minimizar la función de costo y por esta razón se le asignó un peso de 60%. Por otro

lado, el coordinador 1 consideró que este elemento en realidad obstaculiza el tránsito del invidente (tiene una opinión contraria al coordinador 2), a partir de ello se consideró que este elemento incrementaba la función de costo y se le asigna un peso bajo (10%) comparado al coordinador 2, lo cual podría explicar por qué en la RAC1 no hay tantas esquinas adicionales como en la RAC2.

### Barreras ( $p_3$ )

Este parámetro es un elemento negativo dentro de la ruta accesible, por esa razón se debería evitar la mayor cantidad de barreras posibles de las rutas. Como se observa en la figura 55 ambas rutas accesibles (tanto RAC1 y RAC2) evitaron en total ocho obstáculos que la RC sí incluía.

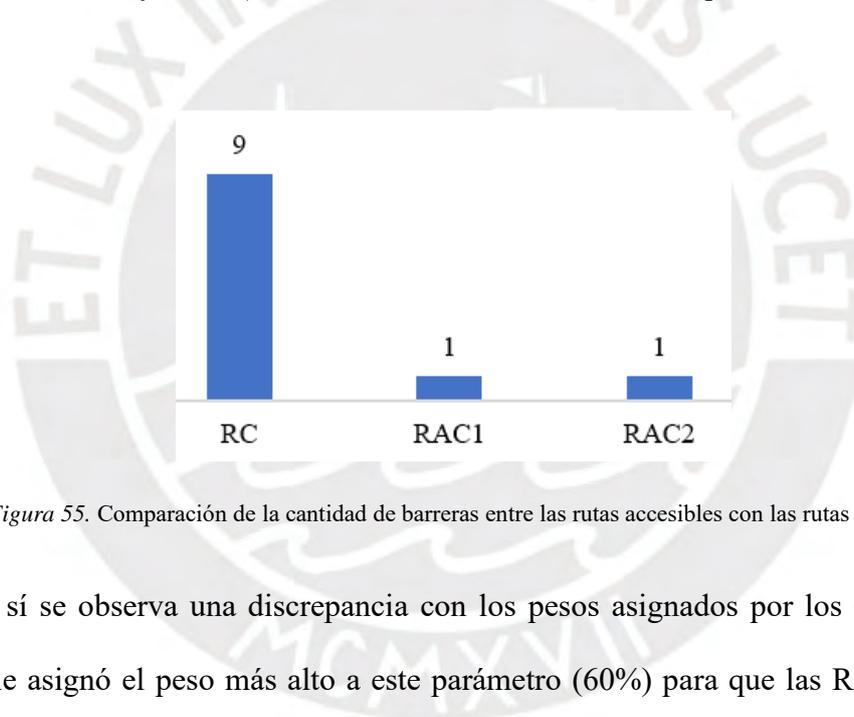


Figura 55. Comparación de la cantidad de barreras entre las rutas accesibles con las rutas cortas.

En este caso sí se observa una discrepancia con los pesos asignados por los coordinadores, el coordinador le asignó el peso más alto a este parámetro (60%) para que las RAC1 eviten estos elementos; sin embargo, las RAC2 que evitaron la misma cantidad de elementos de este tipo a pesar de haberle asignado un porcentaje no tan alto (10%). Se puede sugerir que la ambivalencia de los resultados podría tener como causa que en las zonas donde se calcularon las rutas (los escenarios alrededor del hospital María Auxiliadora) no había una presencia importante de estos elementos.

#### Claves ambientales ( $p_4$ )

Se considera que una ruta es más accesible cuando hay una mayor presencia de claves ambientales que sirvan como puntos de referencia para un peatón invidente. En total las RAC2 obtuvieron más claves ambientales adicionales que la RAC1 (figura 56).

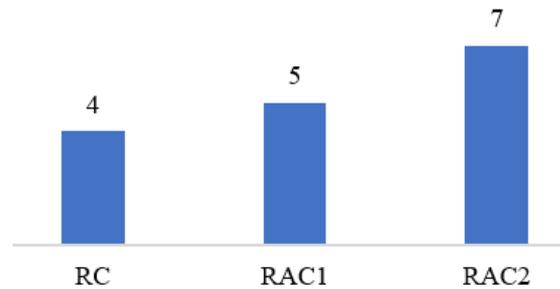


Figura 56. Comparación de cantidad de claves ambientales entre las rutas accesibles con las rutas cortas.

Para este caso los coordinadores no asignaron pesos muy distintos a este parámetro, el coordinador 1 le asignó un peso de 15% mientras que el coordinador 2 (cuyas rutas obtuvieron un par más de claves ambientales) le asignó un peso de 20%.

#### Puntos de ayuda ( $p_5$ )

Los puntos de ayuda son lugares que hacen más accesible una ruta, en total las RAC1 obtuvieron cuatro puntos de ayuda más que la RC, mientras que la RAC2 obtuvo dos elementos más que la RC (figura 57).

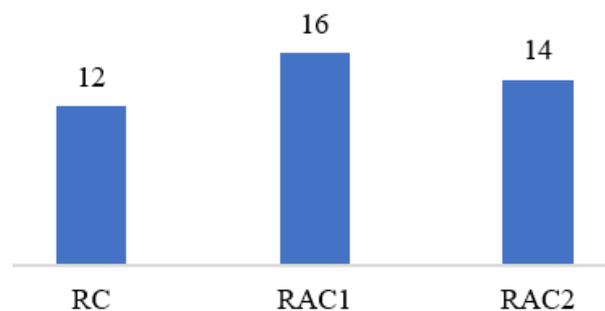


Figura 57. Comparación de cantidad de puntos de ayuda entre las rutas accesibles con las rutas cortas.

En este parámetro el coordinador 1 le asignó un peso de 10% y el coordinador 2 solo le asignó un peso de 5%, y como se puede observar las RAC2 son las que en total incluyeron más de estos elementos en sus caminos.

Como se puede observar de los escenarios evaluados para ambos hospitales, en ningún caso una ruta accesible definida por los coordinadores coincide con la ruta más corta. En la mayoría de los escenarios las rutas accesibles efectivamente contenían una mayor cantidad de semáforos, paraderos, centros comerciales y mercados en su camino; además, evitaban las barreras como parques y playas de estacionamiento, que como definieron Cohen (2017) y Cabrera (2019) son elementos que perjudican el tránsito y accesibilidad de la persona con discapacidad visual hacia su destino. En cuatro de los cinco criterios utilizados se observa una lógica entre la cantidad adicional de elementos útiles o en la cantidad excluida de elementos obstaculizadores y los pesos asignados por los coordinadores, se debería tomar en consideración lo propuesto por Völkel y Weber (2008) que afirman que un número elevado de criterios podría causar que la influencia del peso de importancia que asigna el usuario disminuya.

Por último, el algoritmo Dijkstra con la adaptación de la función de costos generó resultados óptimos en términos de seguridad y accesibilidad. Una posible mejora a esta propuesta sería la utilización de los otros modelos revisados en la literatura como *Particle Swarm Optimization*,  $A^*$  o plantearlo como un problema de múltiples objetivos y comparar los resultados obtenidos.

## Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

De la investigación realizada en esta tesis se reseña las siguientes conclusiones:

- Existen problemas de tránsito accesible para personas con discapacidad visual en Lima, tal como lo refirieron Cabrera (2019), los coordinadores de CERCIL y las personas invidentes encuestadas, las personas con discapacidad visual tienen dificultad para acceder a espacios públicos. Los principales motivos son los obstáculos que pueden encontrar en la vereda y también la poca educación vial de los conductores de automóviles, lo cual ocasiona que el invidente desconfíe en el uso de las señales peatonales accesibles que han sido diseñado para ellos. Esta problemática podría empeorar, porque tal como lo sugiere Blanco (2010), el crecimiento de esta población tiene una tendencia creciente y podría generar un problema de gran interés socioeconómico.
- La herramienta *Open Street Map* fue de utilidad para mapear rápidamente las zonas de análisis; sin embargo, parece que tiene un mayor registro en zonas céntricas (Hospital Arzobispo Loayza) que en zonas no tan céntricas (Hospital María Auxiliadora), pudieron existir elementos no mapeados que distorsionan los resultados.
- El modelo propuesto con cinco parámetros (longitud de camino, presencia de esquina, barreras, claves ambientales y puntos de ayuda) y optimizado mediante el algoritmo de Dijkstra, obtuvo mejores resultados en términos de accesibilidad que la ruta más corta. Sin embargo, se debe tomar en consideración lo referido por Völkel y Weber (2008) sobre una cantidad máxima de criterios, ellos recomiendan entre tres a cuatro criterios.
- Si bien los pesos de importancia asignado por los coordinadores ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ,  $c_5$ ) obtuvieron buenos resultados, se debe cotejar la optimalidad del modelo utilizando pesos asignados por los mismos usuarios porque cada persona con discapacidad visual puede tener distintas prioridades como lo sugieren Cohen (2017) y Kammoun et al. (2010).

- En esta tesis los pesos de importancia ( $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ ) asignados a los parámetros por cada coordinador permiten observar la diferencia de prioridades entre la RAC1 y RAC2. Por ejemplo, mientras que en la RAC1 el parámetro “claves ambientales ( $p_4$ )” se le asigna un peso de 15% en la RAC2 se le asigna un peso de 20%, esto se refleja en una cantidad menor de claves ambientales incluidas en la RAC1 (5 claves ambientales) a comparación de la RAC2 (7 claves ambientales). Del mismo modo con el parámetro “puntos de ayuda ( $p_5$ )”, donde la RAC1 tiene asignado un peso de 10% a comparación de un 5% asignado en la RAC2, y se observa que en RAC1 se incluyeron 16 puntos de ayuda a comparación de los 14 puntos de ayuda encontrados en RAC2.
- Las rutas accesibles obtenidas por el modelo lograron mejores resultados en los parámetros de accesibilidad definidos por los coordinadores. En primer lugar, en la longitud de camino ( $p_1$ ) se obtuvo hasta 596 metros adicionales a lo obtenido en las rutas cortas (este parámetro tiene una importancia menor según el criterio de los coordinadores y entrevistados); en segundo lugar, la cantidad de esquinas ( $p_2$ ), se obtuvo en total hasta seis esquinas adicionales que en las rutas cortas; en tercer lugar, la cantidad de barreras ( $p_3$ ), se lograron evitar ocho barreras que estaban incluidas en las rutas cortas; en cuarto lugar, las claves ambientales ( $p_4$ ), se obtuvo en total hasta tres claves ambientales adicionales que en las rutas cortas; por último, los puntos de ayuda ( $p_5$ ), se obtuvo hasta cuatro puntos de ayuda adicionales que en las rutas cortas.
- Con el modelo de programación lineal entera cuya función objetivo es minimizar la función de costos multicriterio de la ruta (asociado a accesibilidad) y que fue optimizado con el algoritmo de Dijkstra; se obtuvo rutas óptimas en términos de accesibilidad. Se evitaron elementos obstaculizadores mencionados por Cohen (2017) y Cabrera (2019) como playas de estacionamientos y parques, esto se consigue mediante el parámetro “barreras ( $p_3$ )” incluido en la función de costos multicriterio. Por otro lado, se consigue la inclusión de elementos que ayudan en la orientación y tránsito de las personas invidentes como esquinas, centros

comerciales, mercados, grifos, paraderos y semáforos también mencionados por Cohen (2017) y Cabrera (2019), y se consigue mediante la inclusión de los parámetros “esquinas ( $p_2$ )”, “claves ambientales ( $p_4$ )” y “puntos de ayuda ( $p_5$ )”.

#### 4.2. Recomendaciones

- De la revisión de la literatura de Aragón (2020) se recomienda implementar un sistema en base a tecnologías de *Internet of Things*, *Big Data*, Inteligencia Artificial, así como de algoritmos de optimización, la solución integrada debe abarcar varios aspectos de la problemática de tránsito de personas con discapacidad visual no solo de la ruta más accesible sino también de la detección de obstáculos.
- Se recomienda adaptar este modelo a zonas más amplias donde la diferencia de resultados podría ser más notoria, y así comprobar la eficiencia del modelo de optimización.
- Se recomienda obtener información sobre las variables en tiempo real que se encuentran presentes en la calle como la afluencia de personas, hora del día y tráfico. Esta información sería utilidad para que un modelo se adapte a las situaciones cambiantes que pueden presentar una zona y que el modelo de Dijkstra presentado no consideró. Para una problemática con esa información se recomendaría utilizar el modelo definido por Fang et al. (2017), el cual utilizaba múltiples objetivos para encontrar la ruta óptima.
- Las necesidades de las personas con discapacidad visual podrían variar dependiendo de la situación en la que se encuentran, se recomienda utilizar herramientas de aprendizaje automático como lo sugiere Kammoun et al. (2010) para que además de un modelo que busque una ruta accesible, se diseñe un modelo que pueda aprender a escoger una ruta adecuada según la experiencia que vaya adquiriendo en la práctica sobre las preferencias del usuario y así sugerir de antemano las rutas óptimas.

- Por último, se debe promover la educación vial en el país, muchos de los problemas que se encontraron en la sección 2.2. estaban relacionados a un mal comportamiento por parte de los peatones sin discapacidad visual y los conductores, quienes no respetan las normativas de tránsito y generan desconfianza en los peatones invidentes para transitar a través de la ciudad. La desconfianza hacia esto puede provocar que el usuario no se sienta a gusto con la solución y no la utilice, así como sucede en algunos casos con los semáforos sonoros.



## Bibliografía

- Aragón, M. (2020). *Revisión de la literatura de modelos de optimización para el tránsito de personas con discapacidad visual a través de rutas accesibles y seguras*. Trabajo de investigación, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Banco Mundial. (2018). *Entendiendo la pobreza*. Obtenido de Disability inclusion and accountability framework:  
<http://documents1.worldbank.org/curated/en/437451528442789278/pdf/126977-WP-PUBLIC-DisabilityInclusionAccountabilitydigital.pdf>
- Blanco, F. (2010). *Aspectos socioeconómicos de la discapacidad, la dependencia y el envejecimiento. Estudio econométrico para la ciudad autónoma de Ceuta* [Tesis doctoral, Universidad de Granada]. Obtenido de  
<https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/15442/19593132.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cabrera, F. (2019). *Movilidad urbana, espacio público y ciudadanos sin autonomía. El caso de Lima* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona]. Obtenido de:  
[https://ddd.uab.cat/pub/tesis/2019/hdl\\_10803\\_667392/icv1de1.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/tesis/2019/hdl_10803_667392/icv1de1.pdf)
- Chen, M., Lin, H., Liu, D., Zhang, H., & Yue, S. (2015). An object-oriented data model built for blind navigation in outdoor space. *Applied Geography*, 60, 84-94.  
 doi:10.1016/j.apgeog.2015.03.004
- Cheraghi, S. A., Namboodiri, V., & Walker, L. (2017). GuideBeacon: Beacon-based indoor wayfinding for the blind, visually impaired, and disoriented. *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications(PerCom)* (pp. 121-130). doi: 10.1109/PERCOM.2017.7917858

- Cohen, A. (2017). *Building a weighted graph based on OpenStreetMap data for routing algorithms for blind pedestrians*. [Tesis de investigación, Israel Institute of Technology].  
Obtenido de [https://socialhub.technion.ac.il/wp-content/uploads/2017/08/revise\\_version-final.pdf](https://socialhub.technion.ac.il/wp-content/uploads/2017/08/revise_version-final.pdf)
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2017). *Brechas, ejes y desafíos en el vínculo entre lo social y lo productivo*. Obtenido de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42209/1/S1700769\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42209/1/S1700769_es.pdf)
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018). *Panorama social de América Latina 2018*. Obtenido de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44395/11/S1900051\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44395/11/S1900051_es.pdf)
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2020a). *COVID-19 y las personas con discapacidad en América Latina y el Caribe: situación y orientaciones*. Obtenido de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46278/1/S2000645\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46278/1/S2000645_es.pdf)
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2020b). *Personas con discapacidad ante la enfermedad por coronavirus (COVID-19) en América Latina y el Caribe: situación y orientaciones*. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45491-personas-discapacidad-la-enfermedad-coronavirus-covid-19-america-latina-caribe>
- Congreso de la República. (2012). *Ley 29973 .Ley General de la Persona con Discapacidad*. Obtenido de <https://www.mimp.gob.pe/webs/mimp/herramientas-recursos-violencia/contenedor-dgcvg-recursos/contenidos/Legislacion/Ley-general-de-la-Persona-con-Discapacidad-29973.pdf>
- Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad. (2017). *Informe inicial que el Japón debía presentar en 2016 en virtud del artículo 35 de la Convención*. Obtenido de [https://tbinternet.ohchr.org/\\_layouts/15/treatybodyexternal/Download.aspx?symbolno=C-RPD%2fC%2fJPN%2f1&Lang=en](https://tbinternet.ohchr.org/_layouts/15/treatybodyexternal/Download.aspx?symbolno=C-RPD%2fC%2fJPN%2f1&Lang=en)

- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms* (Tercera ed.). Massachusetts, United States of America: MIT press.
- Coto, E. (2003). Algoritmos básicos de grafos. *Lecturas en Ciencias de computación*. Obtenido de:  
[https://www.researchgate.net/publication/228763429\\_Algoritmos\\_Basicos\\_de\\_Grafos](https://www.researchgate.net/publication/228763429_Algoritmos_Basicos_de_Grafos)
- Dos Santos, A., Medola, F., Cinelli, M., García, A., & Sandnes, F. (2020). Are electronic canes better than traditional canes? A comparative study with blind and blindfolded participants. *Universal Access in the Information Society:International Journal*, 1-11. doi:10.1007/s10209-020-00712-z
- Duarte, K., Cecilio, J., Silva, J. S., & Furtado, P. (2014). Information and assisted navigation system for blind people. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 7(5), 1-4. doi: 10.21307/ijssis-2019-062
- Fang, Z., Li, L., Li, B., Zhu, J., Li, Q., & Xiong, S. (2017). An artificial bee colony-based multi-objective route planning algorithm for use in pedestrian navigation at night. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(10), 2020-2044. doi:10.1080/13658816.2017.1346795
- Fanucci, L., Roncella, R., Iacopetti, F., Donati, M., & Giannelli, N. (2014). A mobility aid system for visually impaired people on the historical walls of Lucca city, Tuscany, Italy. *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation* (pp. 2-7). doi: 10.1109/MED.2014.6961317
- Huete, A., Sola, A., & Díaz, E. (2009). *El impacto de la crisis económica en las personas con discapacidad y sus familias* (Vol. 43). Comité Español de Representantes de Personas con Discapacidad. Obtenido de  
[http://riberdis.cedd.net/bitstream/handle/11181/3345/Impacto\\_crisis\\_economica\\_en\\_personas\\_con\\_discapacidad\\_y\\_sus\\_familias.pdf?sequence=1&rd=003138506332869](http://riberdis.cedd.net/bitstream/handle/11181/3345/Impacto_crisis_economica_en_personas_con_discapacidad_y_sus_familias.pdf?sequence=1&rd=003138506332869)

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2014). *Primera encuesta nacional especializada sobre discapacidad 2012*. Obtenido del sitio de Internet de la INEI

[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitaless/Est/Lib1171/ENEDIS%202012%20-%20COMPLETO.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1171/ENEDIS%202012%20-%20COMPLETO.pdf)

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Impacto de la situación de discapacidad en la composición y en el costo final de la canasta básica de consumo familiar*. Obtenido del sitio de Internet de la INEI:

<https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/investigaciones/invest.%20Teodoro%20Sanz.pdf>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018a). *Perfil sociodemográfico de la población con discapacidad, 2017*. Obtenido del sitio de Internet de la INEI:

[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitaless/Est/Lib1675/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1675/libro.pdf)

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018b). *Perfil sociodemográfico del Perú*. Obtenido del sitio de Internet de la INEI:

[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitaless/Est/Lib1539/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1539/libro.pdf)

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018c). *Perú: Caracterización de las condiciones de vida de la población con discapacidad, 2017*. Obtenido del sitio de Internet de la INEI:

[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitaless/Est/Lib1591/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1591/libro.pdf)

Kammoun, S., Dramas, F., Oriolaand, B., & Jouffrais, C. (2010). Route selection algorithm for blind pedestrian. *International Conference on Control, Automation and Systems* (pp. 2223-2228). doi: 10.1109/ICCAS.2010.5669846

- Karimi, H. A., & Ghafourian, M. (2010). Indoor routing for individuals with special needs and preferences. *Transactions in GIS*, 14(3), 299-329. doi: 10.1111/j.1467-9671.2010.01198.x
- Kose, U., & Vasant, P. (2018). Better campus life for visually impaired University students: intelligent social walking system with beacon and assistive technologies. *Wireless Networks*, 1-15. doi:10.1007/s11276-018-1868-z
- Martinez-Sala, A. S., Losilla, F., Sánchez-Aarnoutse, J. C., & García-Haro, J. (2015). Design, implementation and evaluation of an indoor navigation system for visually impaired people. *Sensors*, 15(12), 32168-32187. doi:10.3390/s151229912
- Ministerio de la Mujer y Desarrollo Social. (2009). *Plan de igualdad de oportunidades para las personas con discapacidad 2009 - 2018*. Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad - CONADIS. MIMDES. Obtenido de [https://www.trabajo.gob.pe/archivos/file/dnrt/discapacidad/PIO\\_PCD.pdf](https://www.trabajo.gob.pe/archivos/file/dnrt/discapacidad/PIO_PCD.pdf)
- Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. (2020). *Impacto anualizado del brote de la COVID-19 sobre la PEA ocupada en el Perú*. Obtenido de: [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1240402/Impacto\\_anual\\_COVID\\_19\\_Empleo.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1240402/Impacto_anual_COVID_19_Empleo.pdf)
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). Norma A120 - Accesibilidad Universal en Edificaciones. *Diario El Peruano*. Obtenido de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/modificacion-de-la-norma-tecnica-a120-accesibilidad-univer-resolucion-ministerial-no-072-2019-vivienda-1745938-1/>
- Municipalidad de Lima. (s.f.). *Municipalidad de Lima*. Obtenido de Departamento de Atención a Personas con Discapacidad-OMAPED: <http://www.munlima.gob.pe/departamento-de-atencion-a-personas-con-discapacidad-omaped>

Organización de las Naciones Unidas. (2019). *Disability and development report 2018:*

*Realizing the sustainable development goals by, for and with persons with disabilities.*

New York, Estados Unidos: Organización de Naciones Unidas. Obtenido del sitio de

internet de la ONU: [https://www.un-ilibrary.org/economic-and-social-](https://www.un-ilibrary.org/economic-and-social-development/disability-and-development-report-2018_a0b1b1d1-en)

[development/disability-and-development-report-2018\\_a0b1b1d1-en](https://www.un-ilibrary.org/economic-and-social-development/disability-and-development-report-2018_a0b1b1d1-en)

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.a). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido del

sitio de internet de Objetivos de Desarrollo Sostenible:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.b). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de:

Objetivo 10: Reducir la desigualdad en y entre los países:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/inequality/>

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.c). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de:

Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y

sostenibles: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

Organización Internacional del Trabajo. (2015). *Trabajo decente para personas con*

*discapacidad: promoviendo derechos en la agenda global de desarrollo*. Obtenido de

[https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_emp/---](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---ifp_skills/documents/publication/wcms_430938.pdf)

[ifp\\_skills/documents/publication/wcms\\_430938.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---ifp_skills/documents/publication/wcms_430938.pdf)

Organización Mundial de la Salud. (2011). *Informe Mundial sobre la Discapacidad*. Malta:

Organización Mundial de la Salud. Obtenido del sitio de internet de la OMS:

[https://www.who.int/disabilities/world\\_report/2011/es/](https://www.who.int/disabilities/world_report/2011/es/)

Organización Mundial de la Salud. (2018). *Tecnología de asistencia*. Obtenido del sitio de

internet de la OMS: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/assistive-](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/assistive-technology)

[technology](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/assistive-technology)

- Organización Panamericana de la Salud. (2018). *Indicadores de salud: Aspectos conceptuales y operativos*. Obtenido de:  
[https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/49058/9789275320051\\_spa.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/49058/9789275320051_spa.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2010). *Sickness, Disability and Work: Breaking the Barriers*. Paris, Francia: OECD Publishing. Obtenido de  
[https://www.oecd-ilibrary.org/social-issues-migration-health/sickness-disability-and-work-breaking-the-barriers\\_9789264088856-en](https://www.oecd-ilibrary.org/social-issues-migration-health/sickness-disability-and-work-breaking-the-barriers_9789264088856-en)
- Parette, H., & Peterson-Karlan, G. (2007). Facilitating student achievement with assistive technology. *Education and Training in Developmental Disabilities*, 42(4), 387-397.
- Patle, B. K., Pandey, A., Parhi, D. R., & Jagadeesh, A. (2019). A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. *Defence Technology*, 15(4), 582-606.  
 doi:10.1016/j.dt.2019.04.011
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2017). *Curso "Espacio Público I"*. Facultad de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Swobodzinski, M., & Raubal, M. (2009). An indoor routing algorithm for the blind: development and comparison to a routing algorithm for the sighted. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(10), 1315-1343.  
 doi:10.1080/13658810802421115
- Tebbutt, E., Brodmann, R., Borg, J., MacLachlan, M., Khasnabis, C., & Horvath, R. (2016). Assistive products and the sustainable development goals (SDGs). *Globalization and health*, 12(1), 79. doi:10.1186/s12992-016-0220-6
- Vanclooster, A., Van de Weghe, N., & De Maeyer, P. (2016). Integrating indoor and outdoor spaces for pedestrian navigation guidance: A review. *Transactions in GIS*, 20(4), 491-525. doi:10.1111/tgis.12178

- Vilcanqui, Y. (2017). *Autonomía, seguridad y movilidad desde el punto de vista de la persona en condición de discapacidad visual en la ciudad de Lima* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Obtenido de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/9393>
- Völkel, T., & Weber, G. (2008). RouteCheckr: personalized multicriteria routing for mobility impaired pedestrians. *Proceedings of the 10th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility* (pp. 185-192). doi: 10.1145/1414471.1414506
- Völkel, T., Kühn, R., & Weber, G. (2008). Mobility impaired pedestrians are not cars: Requirements for the annotation of geographical data. *International Conference on Computers for Handicapped Persons* (pp 1085-1092). doi: 10.1007/978-3-540-70540-6\_163
- Yusof, T. S., Toha, S. F., & Yusof, H. M. (2015). Path Planning for Visually Impaired People in an Unfamiliar Environment Using Particle Swarm Optimization. *Procedia Computer Science*, 76, 80-86. doi:10.1016/j.procs.2015.12.281
- Zuñiga, I. (2015). *Capacitación para personas con discapacidad* (Documento de proyecto, Comisión Económica para América Latina y El Caribe). Obtenido de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39364/1/S1500608\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39364/1/S1500608_es.pdf)