Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Matemáticas
Escuela Profesional de Computación Científica

Implementación del modelo CVRP para optimizar rutas de recolección de residuos reciclables en la Asociación de Recicladores Cuidemos el Planeta, Lurigancho-Chosica, a través del sistema Reportrash

TESIS

Para optar Título Profesional de Licenciado en Computación Científica

AUTOR

Vladimir Ilich Demetrio OSCANOA CALLUPE

ASESOR

Dra. Rosa Luz MEDINA AGUILAR

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Oscanoa, V. (2024). *Implementación del modelo CVRP para optimizar rutas de recolección de residuos reciclables en la Asociación de Recicladores Cuidemos el Planeta, Lurigancho-Chosica, a través del sistema Reportrash*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Matemáticas, Escuela Profesional de Computación Científica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Vladimir Ilich Demetrio Oscanoa Callupe
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70943197
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0000-9203-6454
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Rosa Luz Medina Aguilar
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10048247
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0175-3894
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Edinson Raul Montoro Alegre
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09627181
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Martha Hilda Timoteo Sánchez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25702279
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rosa Luz Medina Aguilar
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10048247
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.3.4.1. Optimización numérica
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima

	Provincia: Lima Distrito: Cercado de Lima Av. Venezuela s/n cuadra 34. Lima 1-Perú Ciudad Universitaria. UNMSM. Latitud: -12.060186431587528 Longitud: -77.08213204783175
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023 - 2024
URL de disciplinas OCDE	Ciencias de la computación https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.02.01 Ciencias de la información https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.02.02

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS
Escuela Profesional de Computación Científica

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN COMPUTACION CIENTÍFICA (PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL 2024)

En la UNMSM – Ciudad Universitaria – Facultad de Ciencias Matemáticas, siendo las 13:05 horas del sábado 28 de setiembre del 2024, se reunieron los docentes designados como Miembros del Jurado Evaluador (PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL 2024): Dr. Edinson Raúl Montoro Alegre (presidente), Dra. Martha Hilda Timoteo Sánchez (miembro) y la Dra. Rosa Luz Medina Aguilar (miembro asesor), para la sustentación de la Tesis titulada: «IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CVRP PARA OPTIMIZAR RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS RECICLABLES EN LA ASOCIACIÓN DE RECICLADORES CUIDEMOS EL PLANETA, LURIGANCHO-CHOSICA, A TRAVÉS DEL SISTEMA REPORTRASH » presentado por el Bachiller VLADIMIR ILICH DEMETRIO OSCANOA CALLUPE, para optar el Título Profesional de Licenciado en Computación Científica.

Luego de la exposición de la Tesis, el presidente invitó al expositor a dar respuesta a las preguntas formuladas.

Realizada la evaluación correspondiente por los Miembros del Jurado Evaluador, el expositor mereció la aprobación ....sobresaliente...., con un calificativo promedio de 18 (dieciocho)

A continuación, los miembros del Jurado Evaluador dan manifiesto que el participante Bachiller VLADIMIR ILICH DEMETRIO OSCANOA CALLUPE, en vista de haber aprobado la sustentación de su Tesis, será propuesto para que se le otorgue el Título Profesional de Licenciado en Computación Científica.

Siendo las 13:52 horas se levantó la sesión firmando para constancia la presente Acta.

Dr. Edinson Raúl Montoro Alegre
PRESIDENTE

Dra. Martha Hilda Timoteo Sánchez
MIEMBRO

Dra. Rosa Luz Medina Aguilar
MIEMBRO ASESOR

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Rosa Luz Medina Aguilar en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N.º 001303-2024-D-FCM/UNMSM de la tesis cuyo título es "*IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CVRP PARA OPTIMIZAR RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS RECICLABLES EN LA ASOCIACION DE RECICLADORES CUIDEMOS EL PLANETA, LURIGANCHO-CHOSICA, A TRAVÉS DEL SISTEMA REPORTRASH*", presentado por el bachiller VLADIMIR ILICH DEMETRIO OSCANOA CALLUPE para optar el título profesional de licenciado en Computación Científica. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 6 % de similitud, nivel permitido para continuar con los tramites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional. Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Firma del asesor

DNI: 10048247

Nombres y apellidos del asesor: Rosa Luz Medina Aguilar



DEDICATORIA

A mis padres, Raúl y Angelica, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y su generosidad sin límites. Gracias por enseñarme el verdadero significado de la dedicación, el sacrificio y la integridad. Su ejemplo constante de esfuerzo y valores me ha guiado en cada paso. Este logro es tanto suyo como mío, y es un reflejo de los principios que me han transmitido.

A mi hermana Daniela, por ser mi confidente, mi amiga y mi mayor animadora. Tu alegría y apoyo constante me han dado fuerzas en los momentos más difíciles.

A mis abuelos maternos Cosme y Deodora, por su sabiduría, sus historias y su amor inagotable. Su ejemplo de vida me ha inspirado a seguir adelante con valentía y determinación.

IN MEMORIAM

A mis abuelos paternos, Virgilio y Mercedes,
cuyo amor y sabiduría continúan iluminando
mi camino, incluso en su ausencia física.
Su legado permanece en mi corazón y se
manifiesta en cada uno de mis logros.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por darme la fuerza que necesito para llegar a esta etapa de mi vida y por guiarme. Ha sido mi fuente constante de inspiración y esperanza su apoyo.

A mi alma mater, por brindarme una educación completa y por brindarme el conocimiento y las herramientas necesarias para convertirme en un profesional. Mi desarrollo personal y académico se ha basado en la educación que he recibido.

A mis docentes, por su dedicación, su paciencia y por compartir su sabiduría durante mi educación. Sus consejos y enseñanzas son invaluables y han dejado una marca duradera en mi trayecto académico.

A mis amigos de la universidad, por las experiencias compartidas, el apoyo constante y los momentos de camaradería que han hecho de este viaje algo memorable y enriquecedor. Vuestra amistad ha sido un pilar fundamental durante estos años.

A mi familia, por su amor incondicional y por nunca dudar de mí. Su fe en mis capacidades y su apoyo constante han sido una fuente de fortaleza y motivación. Cada logro alcanzado es también un reflejo de su confianza y aliento.

A todos aquellos que, de alguna manera, han contribuido a mi crecimiento y éxito, ya sea con su apoyo, su amistad o sus palabras de aliento. Mi sincero agradecimiento a cada uno de ustedes por ser parte de este viaje.

RESUMEN

Implementación del modelo CVRP para optimizar rutas de recolección de residuos reciclables en la Asociación de Recicladores Cuidemos el Planeta, Lurigancho-Chosica, a través del sistema Reportrash

En la actualidad, los problemas ambientales derivados de una gestión inadecuada de residuos sólidos, especialmente los residuos reciclables, representan desafíos significativos. La presente investigación, tiene como objetivo general demostrar que la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash contribuye a la optimización de rutas para la recolección de residuos reciclables en la ‘‘Asociación de Recicladores Cuidemos el Planeta’’, Lurigancho-Chosica. Para lograr esto, se establecieron tres objetivos específicos: Reducir el tiempo promedio de recolección, aumentar la cantidad promedio de residuos reciclables recolectados y mostrar de forma gráfica las rutas óptimas generadas. En lo que respecta a la metodología, se orientó bajo un enfoque cuantitativo, aplicada con un diseño preexperimental. Los resultados obtenidos indican que las rutas optimizadas reducen los tiempos de recolección en un 71.4 % y aumentan la cantidad de residuos reciclables recolectados en un 80.5 %. Estos resultados no solo demuestran la efectividad del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash en la mejora de las operaciones de reciclaje, sino que también proporcionan un marco para estrategias sostenibles de gestión de residuos que pueden aplicarse en otras asociaciones de recicladores con desafíos similares.

Palabras clave: modelo CVRP, ReporTrash, gestión de residuos, optimización de rutas.

ABSTRACT

Implementation of the CVRP model to optimize recyclable waste collection routes in the Association of Recyclers Let's Take Care of the Planet, Lurigancho-Chosica, through the Reportrash system

Currently, environmental problems arising from inadequate solid waste management, especially recyclable waste, represent significant challenges. The general objective of this research is to demonstrate that the implementation of the CVRP model through the ReporTrash system contributes to the optimization of routes for the collection of recyclable waste in the ''Association of Recyclers Let's Take Care of the Planet'', Lurigancho-Chosica. To achieve this, three specific objectives were established: Reduce the average collection time, increase the average amount of recyclable waste collected, and graphically show the optimal routes generated. Regarding the methodology, it was oriented under a quantitative approach, applied with a pre-experimental design. The results obtained indicate that the optimized routes reduce collection times by 71.4 % and increase the amount of recyclable waste collected by 80.5 %. These results not only demonstrate the effectiveness of the CVRP model through the ReporTrash system in improving recycling operations, but also provide a framework for sustainable waste management strategies that can be applied in other waste pickers' associations with similar challenges.

Keywords: CVRP model, ReporTrash, waste management, route optimization.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria III

Agradecimientos IV

Resumen V

Abstract VI

Índice de cuadros XI

Índice de figuras XIII

Introducción 1

1. Planteamiendo del Problema 2

1.1. Situación Problemática 2

1.2. Formulación del Problema 9

1.2.1. Problema General 9

1.2.2. Problemas Específicos 9

1.3. Objetivos de la Investigación 9

1.3.1. Objetivo General 9

1.3.2. Objetivos Específicos 10

1.4. Justificación de la investigación 10

1.4.1. Teórica 10

1.4.2. Práctica 10

1.4.3. Metodológica 11

1.4.4. Económica 11

1.4.5. Social 11

1.5. Delimitación de la investigación 12

1.5.1. Espacial 12

1.5.2. Temporal 12

1.5.3. Conceptual 12

2. Marco de Referencia **13**

2.1. Revisión de Literatura 13

2.2. Conceptos Clave 16

2.2.1. Residuos Sólidos 16

2.2.2. Teoría de Grafos 16

2.2.3. Problema del Agente Viajero - TSP 18

2.2.4. Modelo VRP 21

2.2.5. Modelo CVRP 22

2.3. Hipótesis 26

2.3.1. Hipótesis General 26

2.3.2. Hipótesis Especificas 26

2.4. Definición de variables 26

2.4.1. Variable Independiente 26

2.4.2. Variable Dependiente 26

3. Metodología de Investigación **28**

3.1. Diseño de Investigación 28

3.1.1. Enfoque 28

3.1.2. Alcance 28
3.1.3. Diseño 28
3.2. Población y Muestra 29
3.2.1. Población 29
3.2.2. Muestra 30
3.3. Instrumentos de Recolección de Datos 33
3.4. Análisis de Datos 33

4. Planteamiento de la Solución 34

4.1. Justificación de la Solución 34
4.2. Alcances y Limitaciones 35
4.2.1. Alcance del Proyecto 35
4.2.2. Limitaciones y Restricciones 35
4.3. Análisis de la Solución 36
4.3.1. Descripción Solución Propuesta 36
4.3.2. Diagrama de Arquitectura 36
4.3.3. Diagrama de Procesos Mejorado (BPMN) 37
4.4. Obtención de Requerimientos 39
4.4.1. Requerimientos Funcionales 39
4.4.2. Requerimientos No Funcionales 40
4.5. Modelamiento UML 41
4.5.1. Diagrama Casos de Uso 41
4.5.2. Documentación Casos de Uso 42

5. Diseño del Sistema 50

5.1. Diseño Físico de BBDD 50
5.1.1. Atributos Principales 50
5.1.2. Entidades y Relaciones 51
5.2. Desarrollo de Prototipos de Alta Fidelidad 52
5.2.1. Descubrimiento de Problemas 53
5.2.2. Diseño de Experiencia de Usuario (UX) 53
5.2.3. Diseño de la Interfaz de Usuario (UI) 56

6. Resultados **60**
6.1. Descripción del Escenario 60
6.1.1. Subescenario 1 60
6.1.2. Subescenario 2 62
6.2. Generación de Rutas con el Modelo CVRP 64
6.3. Análisis de Resultados 76

7. Conclusiones **81**

8. Recomendaciones **82**

Bibliografía **83**

ÍNDICE DE CUADROS

1. Composición de Residuos Sólidos Domiciliarios 2023 5
2. Residuos recolectados para valorización 2023 6
3. Cantidad de Vivienda Ocupada - Distrito de Lurigancho 29
4. Relación de Usuarios participantes 31
5. Requerimientos Funcionales 39
6. Requerimientos No Funcionales 40
7. CU 01 - Registro de Usuarios 42
8. CU 02 - Registro de Recicladores 43
9. CU 03 - Inicio de Sesión 44
10. CU 04 - Registrar reciclaje 44
11. CU 05 - Procesar Información de reciclaje 45
12. CU 06 - Optimizar rutas de recolección 46
13. CU 07 - Asignar rutas a recicladores 46
14. CU 08 - Monitorear Progreso de Recolección 47
15. CU 09 - Confirmar Recolección al Cliente 48
16. CU 10 - Calificar Servicio de Recolección 48
17. CU 11 - Elaborar reportes de reciclaje 49
18. Entidades y Relaciones de la BBDD 51
19. Relación del primer grupo de 20 usuarios 61
20. Matriz de Distancia - Subescenario 1 62

21. Relación del segundo grupo de 20 usuarios 63

22. Matriz de Distancia - Subescenario 2 64

23. Ruta generada 01 - Vehículo_01 65

24. Ruta generada 02 - Vehículo_02 66

25. Ruta generada 03 - Vehículo_03 68

26. Ruta generada 04 - Vehículo_04 69

27. Ruta generada 05 - Vehículo_01 70

28. Ruta generada 06 - Vehículo_02 72

29. Ruta generada 07 - Vehículo_03 73

30. Ruta generada 08 - Vehículo_04 75

31. Resumen del total de rutas generadas 77

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Países con la tasa más elevada de reciclaje a nivel mundial (2022) 3
2. Países a nivel Latinoamérica con mayor porcentaje de Reciclaje (2022) 4
3. Ubicación del distrito de Lurigancho 7
4. Área de acumulación de basura 8
5. Ejemplo de un grafo 17
6. Ejemplo de un Grafo dirigido 18
7. Ejemplo Problema del Agente Viajero 19
8. Ejemplo del modelo VRP 21
9. Ejemplo del Problema de las Rutas de Vehículos Capacitados (CVRP) 22
10. Arcos salientes de un subconjunto S 24
11. Algoritmo del Modelo CVRP 25
12. Plano de Localización de Usuarios 32
13. Arquitectura de Software de ReportTrash 37
14. Diagrama de proceso de Sistema ReporTrash 38
15. CU Sistema ReporTrash 42
16. Diagrama BBDD del Sistema ReporTrash 52
17. User Flow – Registro / Inicio de sesión / Recuperación de contraseña de Usuarios 54
18. User Flow: Reporte de residuos reciclables por los usuarios 55
19. User Flow: Notificación de rutas y recolección de recicladores 56
20. Dashboard del Sistema ReporTrash 57

21. Login y Registro de usuario 58

22. Reporte de residuos reciclables 58

23. Ruta para recolección de residuos reciclables 59

24. Mapa de Ruta Generado 01 66

25. Mapa de Ruta Generado 02 67

26. Mapa de Ruta Generado 03 68

27. Mapa de Ruta Generado 04 70

28. Mapa de Ruta Generado 05 71

29. Mapa de Ruta Generado 06 72

30. Mapa de Ruta Generado 07 74

31. Mapa de Ruta Generado 08 76

32. Mapa de rutas generadas 80

INTRODUCCIÓN

Actualmente, enfrentamos una grave problemática ambiental debido a la inadecuada gestión de los residuos sólidos, en particular aquellos biodegradables y reciclables que no se separan adecuadamente conllevando a que terminen en rellenos sanitarios y vertederos. En el distrito de Lurigancho, aunque la gestión de residuos es deficiente y la educación sobre reciclaje es limitada, existen hogares que poseen conocimientos sobre la segregación de residuos. Sin embargo, la falta de información sobre los centros de acopio impide una gestión adecuada. Por otro lado, los recicladores enfrentan importantes desafíos en su labor diaria, ya que carecen de información de los hogares que segregan sus residuos, y la falta de rutas definidas para la recolección dificulta aún más su trabajo. Esta desorganización no solo reduce la eficiencia de los recicladores, sino que también impide una gestión de residuos más efectiva en el distrito.

En este contexto, la investigación tiene como objetivo demostrar que la implementación del modelo CVRP mediante el sistema ReporTrash contribuirá a la optimización de rutas para la recolección de residuos reciclables en la Asociación de Recicladores Cuidemos el Planeta Lurigancho Chosica. Asimismo permitirá establecer una conexión efectiva entre los hogares y los recicladores a través del sistema ReporTrash

Este proyecto de investigación está organizado en siete capítulos. El capítulo 1 introduce el planteamiento del problema y los objetivos de la investigación. El capítulo 2 revisa la literatura relacionada con la optimización de rutas de recolección de residuos. El capítulo 3 describe la metodología de investigación utilizada. El capítulo 4 presenta los planteamientos de la solución. El capítulo 5 muestra el diseño del sistema, abordando los prototipos de alta fidelidad del sistema. El capítulo 6 muestra los resultados y análisis obtenidos al implementar el modelo CVRP. Finalmente, el capítulo 7 discute las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 1

PLANTEAMIENDO DEL PROBLEMA

1.1 Situación Problemática

Actualmente, nos enfrentamos a una preocupante problemática ambiental derivada por la ineficiente administración de los residuos sólidos, siendo así que el reciclaje juega un papel fundamental. La acumulación de residuos, especialmente aquellos biodegradables y reciclables que no son separadas adecuadamente, ha dado lugar a una creciente contaminación global. Este fenómeno no solo afecta negativamente al medio ambiente, sino también impacta directamente al deterioro de la salud pública.

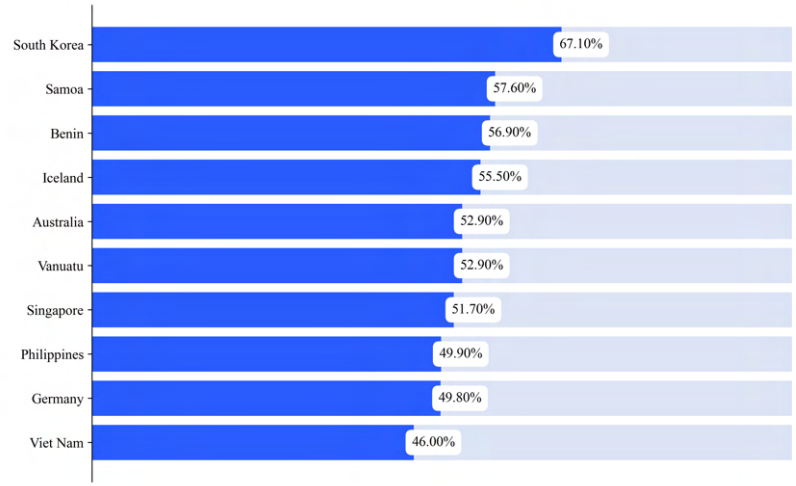
Según el reporte "What a Waste 2.0" (Banco Mundial, 2018) señala que anualmente a nivel mundial la producción de desechos sólidos municipales equivalen a 2,010 millones de toneladas y se prevé que en los siguientes 30 años se generarán 3,400 millones de toneladas de desechos sólidos anuales. Asimismo, durante la celebración del Día Internacional de Cero Desechos 2024 (Naciones Unidas, 2024), destacaron que anualmente las personas generan residuos sólidos urbanos alrededor de 2,100 y 2,300 millones de toneladas, y aproximadamente 2,700 millones de pobladores carecen de accesibilidad al recojo de residuos. Que, previendo así para el año 2050 se tendría una producción de 3,800 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos anuales.

Bajo este contexto, el (Yale University, 2022), destaca que, a nivel global, el país que lidera el reciclaje de material posconsumo reciclable es Corea del Sur alcanzando un 67.10 %, seguido por Samoa que alcanza un 57.60 % como se puede observar en la Figura 1. Teniendo asi que (Sintac, 2023), en su publicación señala que a nivel mundial, los países que tienen un índice alto en reciclar son Alemania, Austria, Corea del Sur, Eslovenia, Países Bajos y Suiza.

Países que reciclan más del 50 % de los residuos que generan, lo que demuestra su alta significando así que reciclan más del 50 % de residuos que producen.

Figura 1

Países con la tasa más elevada de reciclaje a nivel mundial (2022)



Nota: Se muestra los 10 de países con el mayor porcentaje de reciclaje de material posconsumo reciclable a nivel mundial, utilizando datos del Índice de Desempeño Ambiental (2022). Elaboración propia.

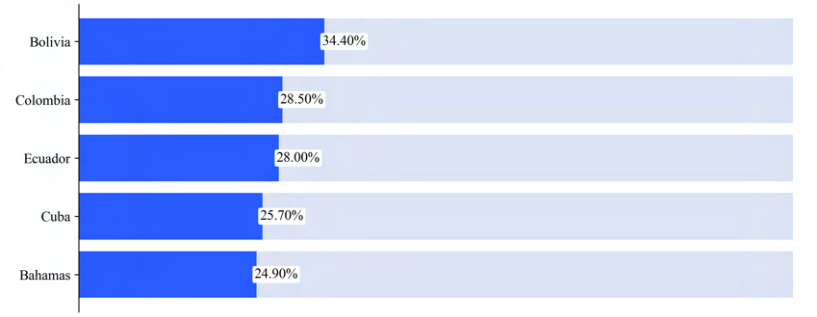
En este sentido, en el año 2005, la UNESCO proclamó que todos los 17 de mayo se celebrará el "Día Mundial del Reciclaje" con la finalidad de fomentar una mayor conciencia para todos los ciudadanos, en especial para quienes extraen la materia prima y la transforman en productos. Buscando impulsar la concientización sobre las prácticas de reciclaje para promover la incorporación del Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 (ODE12), que este se enfoca en la producción y consumo responsable.

Asimismo, segun (Yale University, 2022), en América Latina y el Caribe, Bolivia se destaca como el país líder en alcanzar una alta tasa de reciclaje en material posconsumo reciclable que equivale al 34.4 %. Le sigue Colombia con un 28.5 %, como se detalla en la Figura 2. Por otro lado, de acuerdo con (Kolibri, 2022), América Latina y el Caribe, diariamente son generados 541 mil toneladas de desechos municipales, con una proyección para el 2050 que

este aumente en un 25 % si continuamos con el modelo de producción lineal. De estos residuos que son generados diariamente, menos del 1 % se convierte en recursos mediante compostaje, incineración, mientras que solo el 4,5 % se recicla.

Figura 2

Países a nivel Latinoamérica con mayor porcentaje de Reciclaje (2022)



Nota: Se muestra los 5 de países con el mayor porcentaje de reciclaje de material posconsumo reciclable a nivel Latinoamérica, utilizando datos del Índice de Desempeño Ambiental (2022). Elaboración propia.

A nivel nacional, (Cristóbal García et al., 2022), señala que el Perú presenta niveles superiores en eliminación de residuos mediante vertido en comparación con otros países en América Latina y el Caribe. A pesar de ello, el país está enfrentando una serie de desafíos con la administración de residuos, debido a la falta de infraestructura en algunas regiones. Y en un reporte publicado por (USAID, 2023), indica que el Perú genera más de 21.600 toneladas de residuos diarios, que equivale 0.81 kilogramos de residuos per cápita. Visibilizando así que 1.8 % de estos son reciclados. En resultado a esto, (Flores Vizarreta, 2018) estima que al rededor del 15 % de los desechos sólidos producidos anualmente a nivel nacional son reciclados. Estos resultados ocurren, en gran parte, debido a que la gran mayoria de los habitantes incumplen las regulaciones establecidas por el Estado, ya sea por el desconocimiento o por falta de compromiso. Por lo tanto, es imperativo incrementar la concienciación donde el reciclaje sea la alternativa más factible para la gestión de estos. Por otro lado, en el Perú el concepto de

reciclaje y su desarrollo no son muy claros en la población. Esto porque los medios de comunicación tanto, estales como privadas no les dan mucha importancia a estos temas, teniendo como resultado que la población desconoce lo que significa “reciclaje” y la forma de como contribuir. En ese sentido, (Sanmartín Ramón et al., 2017) define de una forma sencilla el reciclaje como, “proceso de tratamiento en la que una materia prima o producto utilizado se desarrolle para ser reincorporada a una etapa de producción o consumo”.

En el distrito de Lurigancho, según la publicación hecha en por el Ministerio del Ambiente en su portal (SIGERSOL, 2024) el 2023 se tuvo una producción per cápita de residuos domiciliarios equivalentes a 0.53 kg/hab/día y una generación total de residuos sólidos de 60,192.640 t/año, de los cuales la generación de residuos inorgánicos equivale al 24.32 % de su totalidad (Tabla 1).

Tabla 1

Composición de Residuos Sólidos Domiciliarios 2023

Residuos	**Total (t/año)**	**%**
1. Residuos aprovechables	46.564,98	77.36
1.1 Orgánicos	31.926,22	53.04
1.2 Inorgánicos	14.638,76	24.32
Papel y cartón	5.591,87	9.29
Vidrio	1.450,62	2.41
Metales	1.799,74	2.99
Treta Pak	349,11	0.58
Plástico (PET, PEAD, PEBD, PP)	5.447,42	9.05
2. Residuos no aprovechables	13.627,59	22.64

Nota: Fuente: SIGERSOL para el distrito de Lurigancho, 2023

Según el reporte anual publicado por SIGERSOL, el distrito de Lurigancho registro en el 2023 la recolección de 91,181.37 toneladas de residuos sólidos designados a disposición final. Además, tal como se describe en la Tabla 2, se recolectaron 1,035.17 toneladas de residuos inorgánicos que asignados para valorización. Estos últimos obtenidos con una frecuencia de recolección de una vez cada 15 días.

Tabla 2

Residuos recolectados para valorización 2023

Residuos	Total (t/año)
Orgánicos	307,70
Inorgánicos	1.035,19

Nota: Fuente: SIGERSOL para el distrito de Lurigancho, 2023

De lo expuesto, una valorización del panorama actual en el distrito de Lurigancho permitió identificar una problemática en el campo del reciclaje, la cual viene afectando tanto a los hogares comprometidos en la segregación de residuos como a las Asociaciones de recicladores, ya sean formales o informales. Por un lado, en los hogares donde realizan la separación de residuos como papeles, cartón, botellas de plástico y vidrio enfrentan dificultades para encontrar centros de acopio cercanos donde puedan llevar sus residuos reciclables, esto debido a la falta de centros de reciclaje cercanos y en algunos de los casos desconocen la ubicación de estos centros de acopio. Por el otro lado, las Asociaciones de recicladores carecen de información sobre los hogares que reciclan en el distrito de Lurigancho, que conlleva la búsqueda diaria de residuos reciclables, a menudo en condiciones insalubres como la exploración en los contenedores de basura, por lo que, al llevar a cabo esta labor corren el riesgo de estar expuestos a infectarse de enfermedades infecciosas y en algunos casos daños físicos; debido a que en su mayoría no cuentan con las herramientas adecuadas, poniendo así en

peligro sus vidas, por ello, es fundamental una coordinación entre hogares que reciclan y centros de reciclaje, identificando sus ubicaciones para diseñar rutas de recolección, con el objetivo de evaluar la capacidad y la demanda en cada ruta y mejorar la experiencia de los recolectores en la recolección de residuos. En la figura 3 se presenta el mapa de ubicación del distrito de Lurigancho.

Figura 3

Ubicación del distrito de Lurigancho



Nota: Mapa ubicación política del distrito de Lurigancho.

En esta investigación, se llevarán a cabo pruebas piloto en colaboración con la "Asociación de Recicladores Cuidemos el Planeta", Lurigancho-Chosica. Desde este punto en adelante nos referiremos a ella como (**ARCPL**), asociación ubicada en el distrito de Lurigancho, la cual su ingreso mensual es la compraventa de residuos reciclables. La asociación está conformada por 16 recicladores, con conocimiento en la gestión de residuos reciclables, que usan 4 Motocar de carga para realizar su proceso de recolección diaria.

La gestión logística y las unidades de recolección se llevan a cabo desde la sede de la asociación, Av. Carapongo. Desde ese punto, los recicladores recorren la ciudad siguiendo sus propios criterios subjetivos, buscando áreas con acumulación de basura, como se muestra en la figura 4, así como aquellas calles donde conocen de la existencia de hogares que reciclan. Estos

recicladores recorren la ciudad todos los días a partir de 9:00 a.m. a 4:00 p.m. bajo su esquema de rutas informal y subjetivo y llegan a recolectar un promedio de 200 kilos totales diario de residuos reciclables. Este esquema tiene algunas desventajas, como la falta de conocimiento de los hogares que tienen residuos reciclables y el hecho de que los recicladores frecuentemente toman las rutas que creen convenientes en ese momento en lugar de seguir una ruta predefinida.

Figura 4

Área de acumulación de basura



Nota: Fotografía tomada en la Av. Terrazas de Caraponguillo (2024).

De esta manera, el problema puede ser resumido que el recorrido de los recicladores está organizado sin fundamentos científicos que puedan asegurar la cobertura de todos los hogares con residuos reciclables en el distrito de Lurigancho. Por lo tanto, esto genera una menor efectividad en la recolección de residuos reciclables.

A partir del ánalisis inicial, se observa que la recolección de los residuos reciclables por los recicladores de la ARCPL, expresa desafíos auténticos y urgentes; esta problemática analizada proporciona el contexto crucial para el avance de la investigación, en la cual se plantea una iniciativa para optimizar la efectividad de la recolección de residuos reciclables a travez de

la implementación del modelo de problema de ruteo de vehículos con Capacidad (**CVRP**, por sus siglas en inglés) a través del sistema ReporTrash que sera el medio para la visualización de las rutas óptimas que aseguren una cobertura de todos los hogares con residuos reciclables.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

PG: ¿En qué medida la implementación del modelo CVRP optimizará las rutas de recolección de residuos reciclables a través del sistema ReporTrash en la ARCPL?

1.2.2 Problemas Específicos

PE1: ¿En qué medida la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash, reducirá el tiempo de recolección de residuos reciclables en la ARCPL?

PE2: ¿En qué medida la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash, aumentará la cantidad promedio de recolección de residuos reciclables en la ARCPL?

PE3: ¿De qué manera la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash, generará graficos de rutas óptimas para la visualizacion de la ARCPL?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

OG: Demostrar que la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash contribuira en la optimizacion de rutas para la recolección de residuos reciclables en la ARCPL.

1.3.2 Objetivos Específicos

OE1: Disminuir el tiempo promedio de recoleccion de residuos reciclables con la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash, en la ARCPL.

OE2: Aumentar la cantidad promedio de recolección de residuos reciclables con la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash, en la ARCPL.

OE3: Mostrar de forma grafica las rutas óptimas obtenidas con la implementación de modelo CVRP a travéz del sistema ReporTrash.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1 Teórica

Esta investigación contribuirá a optimizar la recolección de residuos reciclables de los recicladores del distrito de Lurigancho con la implementación modelo CVRP a través del sistema ReporTrash, lo cual implicara su revisión y la adaptación a la realidad local, incluyendo procesos de cálculos previos, que esto nos permitirá enrutar todos los hogares con residuos reciclables y a su vez la reducción en tiempo de recolección y mejorar la eficiencia en la implementación de recursos usados por los recicladores.

1.4.2 Práctica

La optimización de la recolección de residuos reciclables conducirá a una mejora significativa en los ingresos económicos y las condiciones de trabajo de los recicladores en el distrito de Lurigancho. Asimismo, contribuirá en incrementar tanto la eficiencia como la efectividad del servicio, en beneficio de los hogares.

1.4.3 Metodológica

Este estudio proporcionará un recurso de consulta invaluable para individuos vinculados al campo de computación científica u áreas similares que busquen comprender el modelo CVRP para la optimización de rutas, así como la subsiguiente disminución de los gastos asociados con la prestación del servicio.

1.4.4 Económica

Al finalizar la investigación, la asociación de recicladores contara con un eficiente sistema de gestión de rutas de recolección de residuos reciclables, así como un mayor conocimiento de la cantidad de residuos reciclables generados en los hogares.

1.4.5 Social

Desde la perspectiva social, la presente investigación tiene el propósito de mejorar tanto la eficiencia en la recolección de residuos reciclables como el bienestar de la población. Al tener una óptima gestión de rutas se aumentará la eficiencia de los recicladores, beneficiando su situación económica y la contribución de minimizar la cantidad de residuos depositados en vertederos, además de optimizar el proceso de recolección, se podrá incrementar la economía de los hogares, promoviendo así una economia circular. En conjunto, esta investigación busca elevar el bienestar de los residentes del distrito de Lurigancho mientras se fomenta un enfoque más sostenible hacia la gestión de residuos.

1.5 Delimitación de la investigación

1.5.1 Espacial

Este estudio se realizó en la Asociación de Recicladores “Cuidemos el Planeta Lurigancho” localizada en el distrito de Lurigancho, dentro del contexto de la recolección de residuos reciclables producidos por los hogares. Los datos empleados proviene de un registro realizado por la asociación de recicladores.

1.5.2 Temporal

La implementación del modelo CVRP con el propósito de optimizar la recolección de residuos reciclables en el distrito de Lurigancho se ejecutó desde octubre de 2023 hasta julio de 2024.

1.5.3 Conceptual

Desde un enfoque conceptual, el estudio se fundamentó en diversas metodologías surgidas en el contexto de una gestión eficaz de rutas, teniendo el propósito de optimizar las rutas de recolección de residuos reciclables para los recicladores. Se hizo especial énfasis en el modelo CVRP, el cual es un tema tradicionalmente abordado en la carrera de computación científica.

Capítulo 2

MARCO DE REFERENCIA

2.1 Revisión de Literatura

Bravo, Durand, Lozano y Velluttini (2023), desarrollaron la tesis denominada "Modelo prolab: Ayni, aplicativo móvil que conecta a las familias y recicladores para la gestión de residuos sólidos reaprovechables". Teniendo como objetivo de investigación conectar familias con recicladores en fomentar una sensibilidad en el reciclaje para gestionar adecuadamente los residuos sólidos aprovechables en el Perú. Se validó su viabilidad económica y social, demostrando su capacidad para generar beneficios tanto económicos como sociales. Este modelo de negocio alcanzaría un valor actual neto de S/.2,110.591 con una tasa interna de retorno de 58.30% en un plazo de 5 años. Ademas, se estima un valor actual neto social de S/.2,076.492 considerando las ventas proyectadas para el mismo período.

Huarcaya, Noriega, Sifuentes, Suárez y Tirado (2022), construyeron la tesis titulada "Propuesta de negocio sostenible de reciclaje integrando recicladores y hogares mediante la aplicación EcoVave". El objetivo fue desarrollar un modelo de negocio donde la aplicación EcoVave sea un enlace entre los recicladores y los hogares originadores de residuos. Con el uso de metodologías ágiles lograron identificar la respuesta al problema resultando ser acogido por los participantes a lo largo del proceso. Concluyendo que desde las familias de Lima Metropolitana existe un interés en adoptar una economía circular, dispuestas a participar en la separación adecuada de los residuos en sus domicilios con una gestión responsable para ayudar a mejorar la calidad de vida de los recicladores y un beneficio económico.

Muñoz (2021), en su investigación de tesis titulado "Optimización de rutas para la recolección de residuos sólidos del cantón Latacunga". Se planteo desarrollar un modelo que

pueda optimizar todas las rutas de recolección de residuos sólidos en Ecuador, desde una perspectiva metodológica esta investigación es cuantitativa de naturaleza aplicada. En la que se plantea un modelo matemático Para reducir los costos de operación y maximizar las rutas de recolección y transporte de residuos sólidos de la empresa EPAGAL, el proyecto propuso una técnica de ruteo de vehículos con capacidad limitada. Se implementó una heurística precisa mediante software de optimización después de analizar las rutas actuales y crear un modelo matemático. En consecuencia, se logró un ahorro real del 11.51 % y un ahorro teórico del 30.81 %, lo cual mejoró la eficiencia y disminuyó el impacto ambiental.

Jiménez y Villoslada (2021), llevaron a cabo la tesis nombrada “Impacto del aplicativo móvil TrashTec en el reciclaje tecnológico en el distrito de Cajamarca”, teniendo como proposito de investigación es establer la influencia del aplicativo "TrashTec” en el reutilizar o recuperar componentes de dispositivos electrónicos y tecnológicos del distrito mencionado, teniendo como estudio de investigación cuantitativo aplicando la metodología ágil Kanban. Al usar la aplicacion en la ciudad de Cajamarca llegaron a reciclar un promedio de 50kg de reciclaje electrónico. Esto resultó a una valoracion positiva de todos los usuarios que utilizaron la aplicación TrashTec, destacando el tiempo de respuestas, capacidad de adaptación y una interfaz sencilla.

Añazco y Sánchez (2021), realizaron la tesis titulada “Aplicación web móvil aplicando la metodología SCRUM para mejorar la recolección de material reciclable en la asociación de reciclaje unidos por un ambiente limpio y ordenado de Trujillo”, con el objetivo de mejorar la recolección de papeles, plastico entre otros materiales reciclables por parte de la asociación de reciclaje a travéz de una aplicación web adaptable empleando la metodología SCRUM, por lo que realizó una estudio aplicado con una metodología experimental pura. En sus hallazgos se evidenció que la integración de la aplicación web móvil, permitirá que los recicladores ubicaran

de una forma exacta las ubicaciónes de las viviendas registrados en la asociación. Concluyendo que el aplicativo permite reducir gran parte del tiempo de entrega de reciclaje de los ciudadanos hacia el reciclador.

Raggio (2021), en su trabajo de investigación titulado “Un modelo y método metaheurístico, considerando elementos estocásticos para la recolección de residuos electrónicos en ciudades”, cuyo objetivo fue evaluar y diseñar un modelo para mejorar la actividad de traslado y recolección mediante la aplicación de metaheurísticas para aminorar los costos de asociados a la recolección y las emisiones generados por los vehículos. El desarrollo de la investigación se realizó bajo la metodología no exploratoria, descriptiva y cualitativa. Se implemento el Modelo de "Búsqueda Local Iterada y Recocido Simulado"., que trae consigo dos métodos como evaluar la capacidad del vehículo según las restricciones y verificar su capacidad, todo esto de forma aleatoria en el muestreo. En su resultado, el autor expuso las soluciones estadísticamente idénticas, y que estas soluciones hace que los costos se incrementan conforme se consideran mayores probabilidades de cobro. El autor determino que el método metaheurístico propuesto es tan efectivo como un método exacto, especialmente cuando los resultados se obtienen rápidamente para mejorar eficientemente las rutas de recolección de desechos electrónicos.

Gonzaga y Ydrogo (2020), realizaron su proyecto de investigación titulado “Propuesta de un aplicativo móvil para el reciclaje de plástico, basado en la metodología ágil de software-scrum, en el distrito de San Borja, de la ciudad de Lima, Perú”. Su meta fue desarrollar una aplicación móvil de reciclaje de plástico, metodológicamente es una investigación descriptiva transversal. Teniendo un resultado factible y viable para el reciclaje de plástico por una población de 256 personas, concluyendo los autores que para optimizar el proceso de reciclado en el distrito de San Borja, se combinarán los sectores involucrados en la gestión del

reciclado para trabajar de manera integrada con los distintos sectores.

2.2 Conceptos Clave

2.2.1 Residuos Sólidos

De acuerdo con (DIGESA, 2004) los residuos sólidos son materiales que se pueden encontrar en estados semisólidos, sólidos y en algunos casos liquidos, siendo estos producidos por un usuario, en cantidades determinadas por el usuario o lo que determine el reglamentado, con la intención de pevenir riegos que puedan afectar en la salud de los pobladores. Además, estos son clasificados como: comerciales, domiciliarios, de limpieza o espacios públicos, industriales.

Asimismo, la (OEFA, 2016) manifiesta que los residuos sólidos igual que cualquier otro material son consecuencia del uso o consumo de un recurso en actividades sean doméstico, industrial, comercial, institucional desechado por un generador.

como se indica el principio de residuo es variable y sujeto a cambios al paso del tiempo. Además, los residuos sólidos se pueden categorizar segun su tipo de gestión, composición, origen de la siguiente forma:

- **Residuos orgánicos:** Provenientes de materiales biológicas con una descomposición natural (Oldenhage, 2016).
- **Residuos inorgánicos:** No provienen de materiales biológicos, no se descomponen naturalmente, como plástico, metal, vidrio (Oldenhage, 2016).

2.2.2 Teoría de Grafos

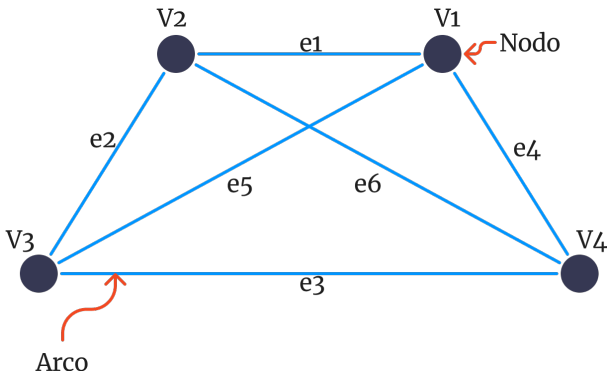
Los grafos son una estructura matemática crucial en el estudio del problema del agente viajero. Un grafo G es un par $G = (N, A)$, donde está compuesta por N que son los nodos (o

vértices) que representan entidades o elementos individuales y A, arcos (aristas) que representan las relaciones de los nodos, siendo estas dirigidos o no dirigidos, ponderados o no ponderados (West, 2001).

Un grafo dirigido es aquel en que sus arcos es una tupla ordenada de nodos N. Estas se denotadas por $e = \{u, v\} \neq \{v, u\}$, lo que indica que el arco e sale del nodo u y termina en el nodo v, marcando el sentido con una flecha, como se puede ver en la Figura 5. En cambio, en un grafo no dirigido, los arcos que une los nodos u y v no tienen un sentido (Barrero et al., 2010).

Figura 5

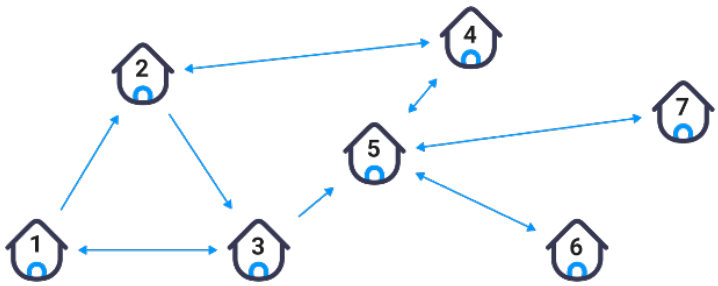
Ejemplo de un grafo



Una de las aplicaciones que son importantes en la teoría de grafos involucran "viajar" por el grafo. Un camino o trayectoria de un nodo v_0 a un nodo final v_n es una secuencia de arcos que es denotada la longitud del camino. En la Figura 6, tenemos un ejemplo de un grafo dirigido, donde se tiene un camino unidireccional desde la casa 1 hacia la casa 2. Para retornar a la casa 1 desde la casa 2, es necesario seguir el camino desde la casa 2 a la casa 3 y luego a la casa 1. Sin embargo, se nota que entre las casas 2 y 4 se tiene un camino bidireccional, lo que indica que podemos tomar ese camino.

Figura 6

Ejemplo de un Grafo dirigido



2.2.3 Problema del Agente Viajero - TSP

Es un problema común con el ciclo de Hamilton clasificado como un problema de complejidad NP-completo, significa que la cantidad de posibles soluciones crece de manera exponencialmente conforme aumenta el número de nodos, es decir, ciudades a visitar, y de manera ágil supera las capacidades de cálculo en equipos potentes (Villalobos, 2010). Por lo que, si un viajero que desea visitar n ciudades exactamente una vez cada una, comenzando desde cualquier ciudad y regresando a la misma; asumiendo que conoce la distancia entre las ciudades, cuál sería el orden de ciudades a visitar con el proposito de reducir la distancia total recorrida (Stockdale, 2011).

Formulación matemática

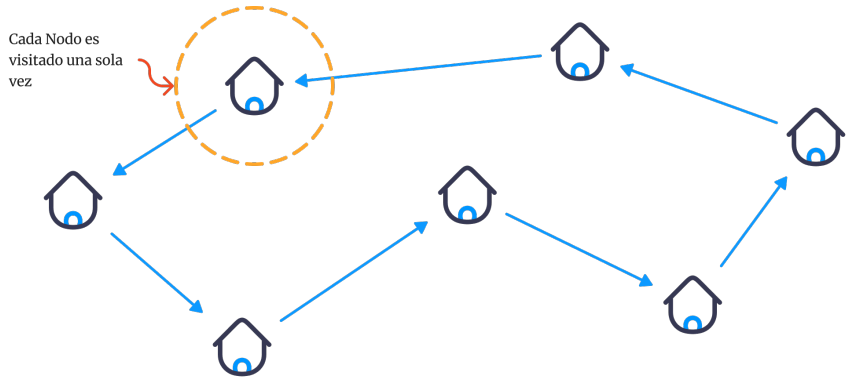
El TSP a lo largo del tiempo ha tenido diferentes planteamientos. Tradicionalmente, los grafos son empleados para representar a las ciudades y las distancias entre ellas, sin embargo, también se utiliza la programación lineal entera para un enfoque adicional en la resolución del problema.

Consideremos el caso de un grafo completo y dirigido $G = (N, A)$, donde $N = \{1, 2, \cdots, n\}$ conjunto de nodos, A conjunto de arcos, c_{ij} costo por utilizar el arco (i, j) y x_{ij} la variable binaria vinculada a la decisión de utilizar el arco (i, j) en la solución. Para ello

tomaremos a la Figura 7 donde construiremos un tour de manera arbitraria donde cada nodo es visitado por cada arco por única vez, es decir el vehículo que realiza el tour entra y sale de un nodo.

Figura 7

Ejemplo Problema del Agente Viajero



A continuación, se plantea el modelo completo del problema. Donde la función objetivo será expresada de la siguiente manera:

$$min \sum_{(i,j)\in A} c_{ij} \tag{2.1}$$

Sujeto a:

$$min \sum_{i\in N, i\neq j} x_{ij} = 1 \qquad (\forall i \in N) \tag{2.2}$$

$$min \sum_{j\in N, j\neq i} x_{ij} = 1 \qquad (\forall i \in N) \tag{2.3}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad (\forall (i,j) \in N) \tag{2.4}$$

Lo que queremos lograr con el valor a optimizar y las condiciones, es modelar un tour que pase por todas las ciudades exactamente una vez, que no existan ciclos internos y que la

distancia sea mínima. Por otro lado, las condiciones representadas en las ecuaciones (2.2) y (2.3) verifica que cada una de las ciudades se visite una sola vez además en la ecuación (2.4) definimos que estas variables sean binarias. Sin embargo, es necesario añadir una restricción que garantice que se están optimizando es decir que las soluciones son solo tours y no se admiten sub-tours, para ello el modelo DFJ (modelo de Danzing, Fulkerson y Jhonson) muestra una restricción para la eliminación de sub-tours

Modelo DFJ

El modelo que plantea donde se tiene como función objetivo es expresada de la siguiente manera:

$$min \sum_{(i,j)\in A} c_{ij} \tag{2.5}$$

Sujeto a:

$$min \sum_{i\in N, i\neq j} x_{ij} = 1 \qquad (\forall i \in N) \tag{2.6}$$

$$min \sum_{j\in N, j\neq i} x_{ij} = 1 \qquad (\forall i \in N) \tag{2.7}$$

$$min \sum_{i\in S, j\in S, j\neq i} x_{ij} \leq |S| - 1 \qquad (\forall S \subset N, 2 \leq |S| \leq n-2) \tag{2.8}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad (\forall (i,j) \in N) \tag{2.9}$$

Este modelo con sus restricciones nos entrega una solución óptima para el problema del agente viajero. Sin embargo, su aplicación presenta una dificultad que radica para n nodos, la cantidad de restricciones de eliminación de sub-tours que se deben incluir, siendo esto proporcional a $2^n - 2n - 2$. Es decir que la cantidad de restricciones (y el tamaño del problema a resolver)

crece en forma exponencial (Solari Carbajal, 2019).

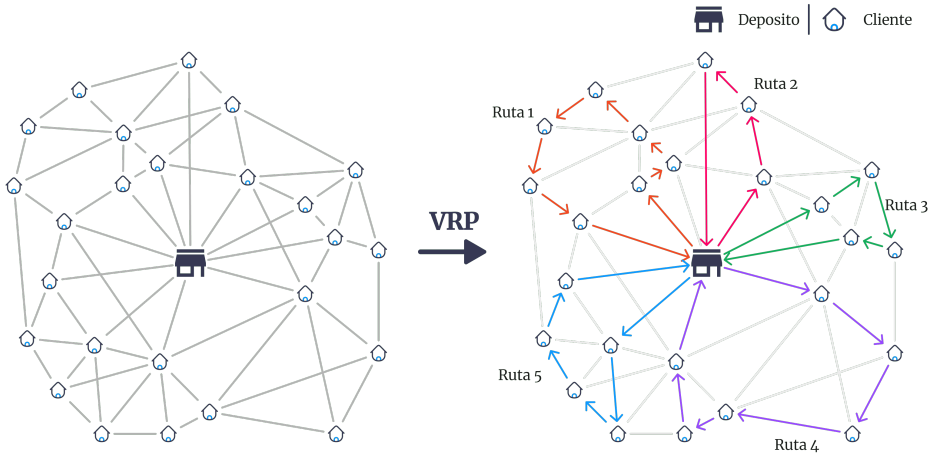
2.2.4 Modelo VRP

El desafio del modelo de enrutamiento de vehículos (VRP) consiste en establecer una serie de rutas para un grupo de vehículos que parten de un depósito y deben visitar un conjunto de hogares asignado a cada vehículo, asegurando que cada cliente tenga una sola visita. Con el proposito principal de disminuir la distancia total recorrida por los vehículos o el tiempo utilizado por ellos. Este escenario se ilustra en la Figura 8, donde se muestra un ejemplo con 25 hogares y una flota de 5 vehículos y las posibles rutas.

Al analizar la complejidad del VRP, esta pertenece a la clase de problemas NP-Completo, lo que implica que los recursos para su solución aumentan de manera exponencial conforme al tamaño del problema (Téllez et al., 2017).

Figura 8

Ejemplo del modelo VRP



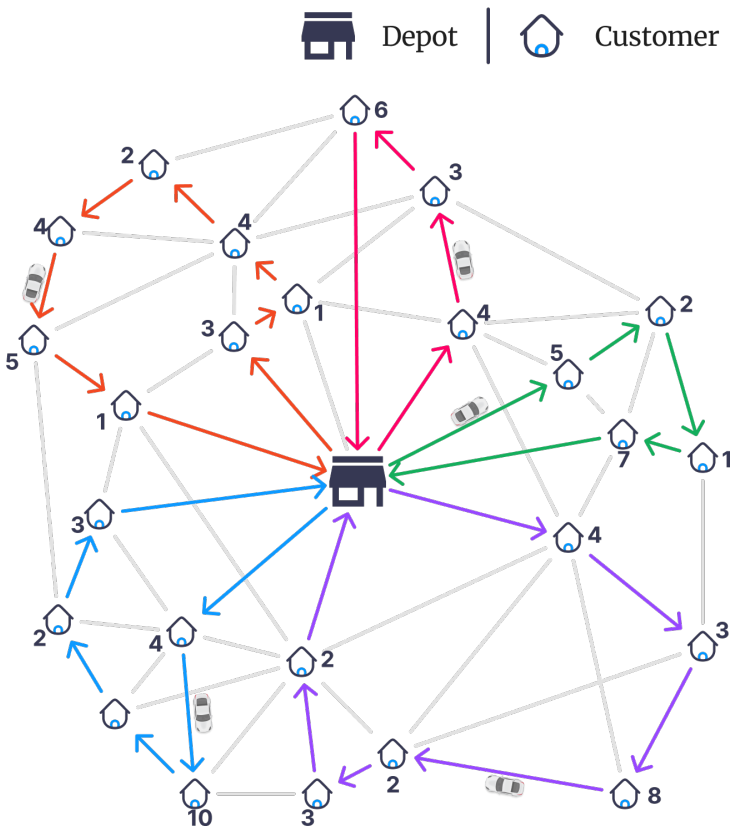
Nota: En este ejemplo se tiene como se generan las rutas al aplicar el modelo de VRP a un grupo de vehiculos.

2.2.5 Modelo CVRP

El Problema de Enrutamiento de Vehículos con Restricciones de Capacitad (CVRP), es la variante más estudiada dentro del VRP. Que figura como uno de los desafios más importantes en la optimización combinatoria. Consiste asi en encontrar rutas eficientes de vehículos limitados con una capacidad máxima. El objetivo de esta variante es minimizar los costos totales, al tiempo que se cumplen las restricciones en la capacidad de los vehículos y se visiten todos los hogares una sola vez como en la Figura 9 (Toth y Vigo, 2014).

Figura 9

Ejemplo del Problema de las Rutas de Vehículos Capacitados (CVRP)



Nota: Modelo CVRP en el que asignan rutas a 4 camiones que atenderán 25 hogares dispersos.

Planteamiento del problema

En el CVRP, las solicitudes de rutas implican organizar la distribución de productos desde un único depósito, denominado punto 0, hacia un conjunto de hogares, $N = \{1, 2, \ldots, n\}$.

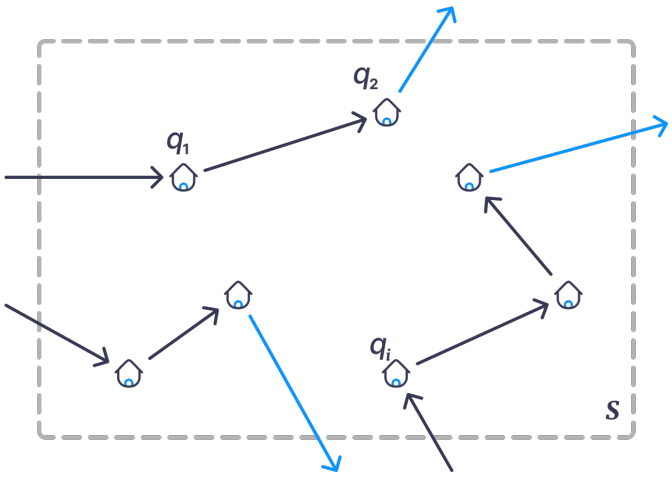
La cantidad que se debe entregar al cliente $i \in N$ es la demanda del cliente, que viene dada por un escalar $q_i \geq 0$. Se asume que la flota, representaba $K = \{1, 2, \ldots, |K|\}$ es homogénea, lo que implica que los vehículos $|K|$ están disponibles en el depósito, con una misma capacidad $Q > 0$ y operan con costos idénticos. Cada vehículo atiende a un subconjunto de hogares $S \subseteq N$ que comienza en el depósito, visita cada uno de los hogares en S una vez y finalmente regresa al depósito. Un vehículo que se mueve de i a j incurre en el costo de viaje c_{ij}. (Borcinova, 2017)

Formulación matemática del CVRP

Sea $G = (N, A)$ una red completa y dirigida donde $N = \{1, 2, \cdots, n\}$ es el conjunto de nodos y $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$ conjunto de arcos. El nodo 0 corresponde al depósito de un conjunto de vehículos con capacidad Q, y los nodos n restantes representan los hogares. Cada cliente $i \in N - \{0\}$ tiene una determinada demanda positiva $q_i \leq Q$. El coste de viaje no negativo c_{ij} está asociado a cada arco $(i, j) \in N$. La variable binaria x_{ij} asociada decide o no utilizar el arco (i, j) en la solución. La matriz de costos es simétrica, es decir, $c_{ij} = c_{ji}$ para todos los $i, j \in N, i \neq j$ que cumplen una desigualdad triangular, $c_{ij} + c_{jk} \geq c_{ik}$ para todos los $i, j, k \in N$ (Chen et al., 2006). Utilizando la menor cantidad posible de vehículos para cubrir todos los hogares $\left\lceil \frac{\sum_{i \in S} q_i}{Q} \right\rceil$. La restricción para eliminar los sub-tours será que la suma de los arcos salientes del subconjunto S, es decir, los vehículos que salen de cada cliente, como vemos en la Figura 10 las flechas de color azul que seria $\sum_{(i,j) \in \delta^+(S)} x_{ij}$, deben ser mayor o igual a $\left\lceil \frac{\sum_{i \in S} q_i}{Q} \right\rceil$.

Figura 10

Arcos salientes de un subconjunto S



Modelo de flujo de vehículos

La variable de decisión binaria x_{ij} se define para indicar si el vehículo pasa por un arco (i, j) en una solución óptima. El modelo de programación lineal entera del CVRP se puede escribir como:

$$min \sum_{(i,j)\in A} c_{ij}x_{ij} \tag{2.10}$$

Sujeto a:

$$min \sum_{i\in\delta^+(i)} x_{ij} = 1 \qquad (\forall i \in N) \tag{2.11}$$

$$min \sum_{i\in\delta^-(j)} x_{ij} = 1 \qquad (\forall i \in N) \tag{2.12}$$

$$min \sum_{i\in\delta^-(0)} x_{0j} = |K| \tag{2.13}$$

$$min \sum_{i\in\delta^+(S)} x_{ij} \geq \left\lceil \frac{\sum_{i\in S} q_i}{Q} \right\rceil \qquad (\forall S \subseteq N, S \neq \emptyset) \tag{2.14}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad (\forall (i,j) \in N) \tag{2.15}$$

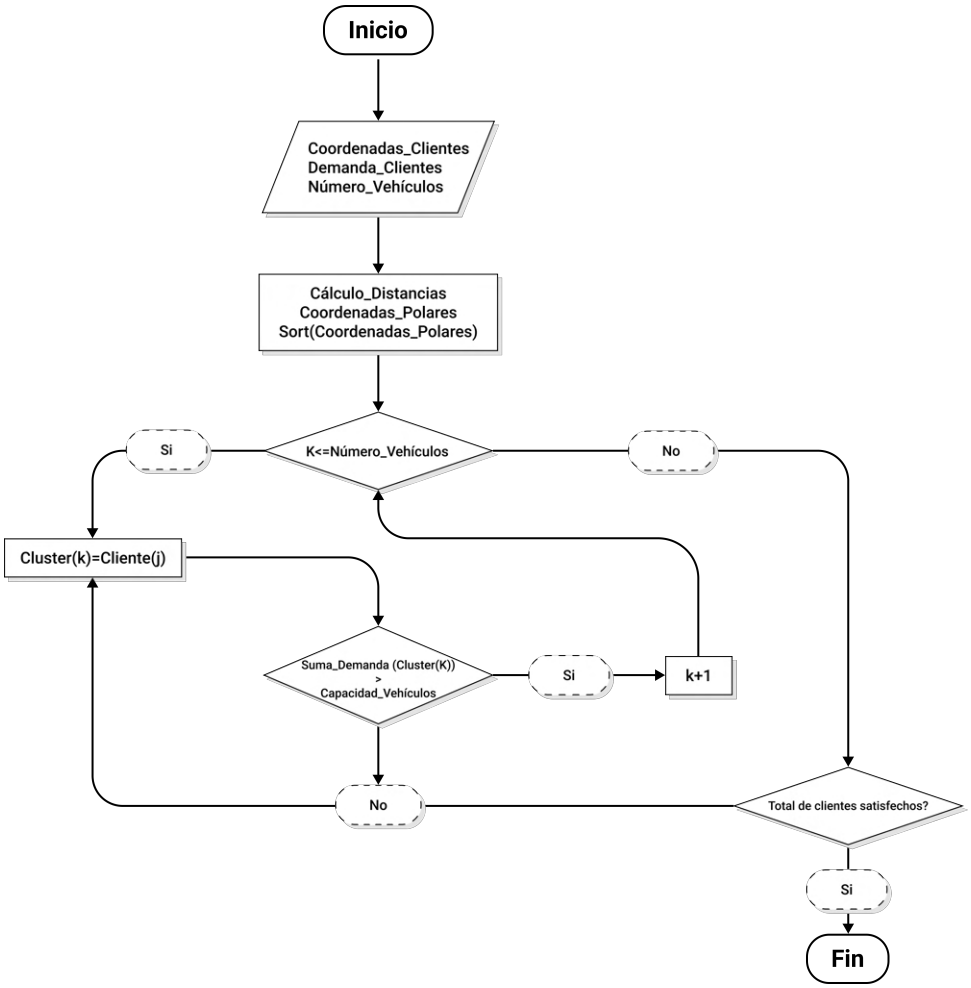
La función objetivo expresada por la ecuación (2.10) busca minimizar el costo total del recorrido de los vehículos. Las restricciones respecto al grado de entrada y salida expresadas en

las ecuaciones (2.11) y (2.12) garantizan que cada cliente sea visitado exactamente una vez por un vehículo. La ecuación (2.13) asegura que cada vehículo inicie su recorrido desde el depósito una sola vez y regula que la cantidad de vehículos que regresan al depósito igualen al número de vehículos que salieron. Finalmente la restricción de capacidad está impuesta en la ecuación (2.14), asegura que los vehículos no excedan su capacidad máxima Q al atender a los clientes. Por lo que esta restricción tiene una doble función la eliminación de sub-tours y asegurar el cumplimiento de restringir la de capacidad de los vehículos.

El algoritmo del modelo CVRP que sera aplicado en la implementación del resultado se muestra en la figura 11.

Figura 11

Algoritmo del Modelo CVRP



2.3 Hipótesis

2.3.1 Hipótesis General

H1: La implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash contribuye en la optimización de rutas de recolección de residuos reciclables llevada a cabo en la ARCPL.

2.3.2 Hipótesis Especificas

HE1: La implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash disminuye el tiempo promedio de recolección de residuos reciclables llevada a cabo en la Asociación de ARCPL.

HE2: La implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash aumenta la cantidad promedio de recolección de residuos reciclables llevada a cabo en la ARCPL.

HE3: La implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash genera gráficas de las rutas de recolección de residuos reciclables llevada a cabo por la ARCPL.

2.4 Definición de variables

2.4.1 Variable Independiente

Nuestra variable independiente es el Modelo CVRP. El modelo CVRP tiene el objetivo de planificar una ruta eficiente para los vehículos, cada uno con capacidades iguales, partiendo desde el centro de acopio y satisfaciendo la demanda de los hogares, sin exceder la capacidad de carga (Yuliza y Puspita, 2019).

2.4.2 Variable Dependiente

Nuestra variable dependiente es la Recolección de residuos reciclables. Siendo el proceso de trasladar los residuos reciclables desde el lugar de generación hasta su destino final

para el tratamiento o eliminación, incorporando además la recuperación de materiales reciclables que, aunque no se perciben técnicamente como desechos, son parte del flujo de residuos.

Capítulo 3

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Diseño de Investigación

3.1.1 Enfoque

En la presente investigación se emplea el enfoque cuantitativo, debido que se busca optimizar las rutas de recolección de residuos reciclables con la implementación del modelo CVRP. De acuerdo con (Sampieri et al., 2014), este enfoque cuantitativo se distingue por ser un proceso de investigación que busca recoletar datos para probar hipótesis con el propósito de identificar patrones de comportamiento y validar teorías. Por lo tanto, este enfoque brinda una base sólida para evaluar la eficiencia del modelo propuesto y cuantificar las mejoras en términos de distancia.

3.1.2 Alcance

De acuerdo con (Sampieri et al., 2014), para identificar el alcance es comprender el tipo de planteamiento del problema formulado, lo cual define que el alcance de la investigación es explicativo, ya que no solo se busca describir o correlacionar variables, sino que se pretende explicar cómo el modelo afecta a la recolección de residuos reciclables.

3.1.3 Diseño

En la investigación sugerida se aplica el modelo CVRP para optimizar la recolección de residuos reciclables a través de la ARCPL es un estudio preexperimental. Según (Sampieri et al., 2014), es un tipo de investigación en la que se buscan resultados de pre y un post test para obtener una comprensión precisa del problema de investigación en la práctica.

3.2 Población y Muestra

3.2.1 Población

Según (Sampieri et al., 2014), en el ámbito de una investigación, la muestra expresa un conjunto de personas, objetos o elementos elegidos de una muestra representativa de la población completa. En esta investigación, la población tomada, de acuerdo con el censo poblacional del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) realizada el 2017, comprende 60,883 hogares con condición de ocupados en el distrito de Lurigancho.

Tabla 3

Cantidad de Vivienda Ocupada - Distrito de Lurigancho

Tipo de vivienda	Condición
	Ocupada, con personas presentes
Casa Independiente	55,138
Departamento en edificio	3,700
Vivienda en quinta	976
Vivienda en casa de vecindad	589
Vivienda improvisada	343
Local no destinado para habitación humana	137
Total	60883

Nota: Tomado de "Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas", por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Recuperado de https://censos2017.inei.gob.pe/redatam/.

3.2.2 Muestra

Para esta investigación, la muestra se compone de 40 viviendas del distrito de Lurigancho proporcionadas por la ARCPL, quienes identificaron los hogares que participan activamente en el reciclaje de botellas de plástico. La relación de todos los participantes podemos verla en la tabla 4.

Esta muestra finita de 40 viviendas es multiplicada por 1 usuario por vivienda, dando como resultado 40 usuarios, los cuales participaron en el desarrollo de la presente investigación. En la figura 12 se visualiza la ubicación de los usuarios.

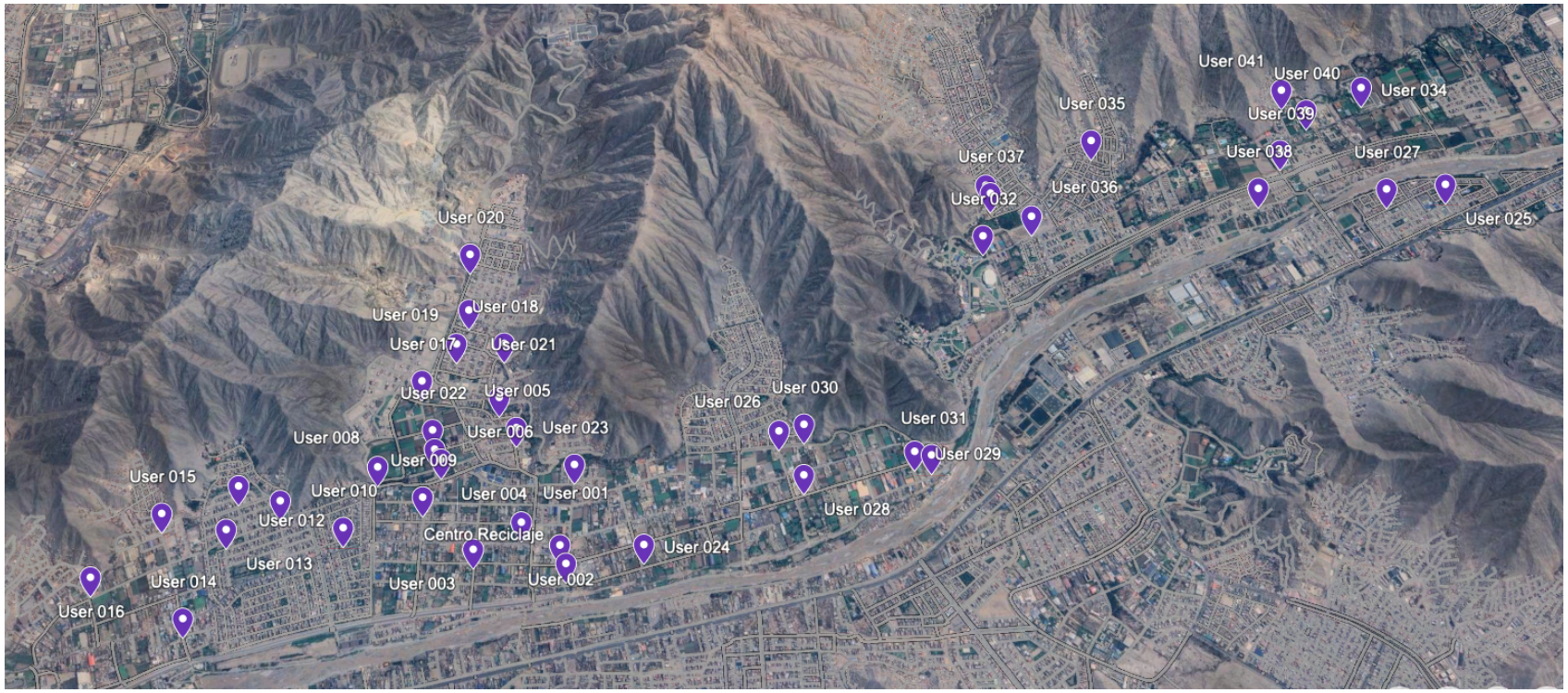
Tabla 4

Relación de Usuarios participantes

Usuario	Cant. Reciclaje (Kg)	Latitude	Longitude	Usuario	Cant. Reciclaje (Kg)	Latitude	Longitude
1	8	-12.0028618	-76.86483362	21	10	-11.99122061	-76.86775595
2	15	-12.00412265	-76.86285634	22	6	-11.99778408	-76.86955063
3	6	-12.00414659	-76.86727464	23	16	-11.99994566	-76.86209066
4	8	-11.99936995	-76.86906155	24	6	-12.00428188	-76.85858165
5	6	-11.99784955	-76.86513281	25	18	-11.98591889	-76.81298589
6	8	-11.99613759	-76.86606298	26	10	-11.99860941	-76.85133597
7	5	-11.99883122	-76.86940424	27	4	-11.98605834	-76.81634236
8	10	-11.99962135	-76.8723661	28	4	-12.0010199	-76.85019755
9	9	-12.00133329	-76.869955	29	8	-12.00002426	-76.84434475
10	9	-12.00274388	-76.87398424	30	6	-11.9983081	-76.84999666
11	12	-12.00119804	-76.87733252	31	15	-12.00024873	-76.84348735
12	8	-12.00032031	-76.87956917	32	12	-11.98797582	-76.83931485
13	6	-12.00257358	-76.88001115	33	6	-11.98495134	-76.8388124
14	8	-12.00700145	-76.88175225	34	7	-11.98236297	-76.83245738
15	16	-12.00160415	-76.883413	35	11	-11.98688708	-76.83646036
16	6	-12.00473512	-76.88668093	36	8	-11.98542698	-76.83859755
17	6	-11.99504604	-76.87020689	37	6	-11.98572146	-76.8235139
18	7	-11.99319884	-76.86581395	38	10	-11.98341678	-76.82181286
19	10	-11.99308093	-76.86839882	39	9	-11.98089213	-76.81978922
20	14	-11.98801087	-76.86774256	40	12	-11.97953416	-76.82095257

Figura 12

Plano de Localización de Usuarios



Nota: El plano muestra la ubicación de todos los usuarios, gráfica realizada de Google Earth.

3.3 Instrumentos de Recolección de Datos

La recolección de datos para esta investigación se realizó mediante el uso de un registro proporcionada por la ARCPL. Este registro contenía información relevante sobre la demanda de reciclaje de cada hogar como la ubicación, la cual fue utilizada para llevar a cabo los análisis y obtener los resultados presentados en este estudio.

Para garantizar la consistencia y precisión, los datos fueron sometidos a un proceso de limpieza, estandarización y validación utilizando Python. Posteriormente, se cargaron en una base de datos PostgreSQL, empleando herramientas como *pgAdmin* y scripts en Python con la biblioteca *pandas*. Este enfoque asegura un almacenamiento eficiente y una preparación adecuada para los análisis posteriores.

3.4 Análisis de Datos

Para analizar la información recopilada, se implementaron diversas técnicas que permitieron profundizar en los datos y obtener conclusiones significativas sobre la eficiencia de la recolección de residuos reciclables. Realizando un análisis de optimización mediante el modelado matemático del problema de enrutamiento de vehículos (CVRP). Este proceso involucró la formulación matemática del CVRP que incluye restricciones y objetivos específicos del estudio, como minimizar la distancia total recorrida.

Capítulo 4

PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

4.1 Justificación de la Solución

La elección de esta solución que se basa en la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash se fundamenta en diversas razones:

- **Eficiencia:** La implementación del modelo CVRP es justificada por su capacidad comprobada para generar rutas óptimas de recolección de residuos. En numerosos estudios y aplicaciones prácticas, el modelo ha demostrado mejorar considerablemente la eficiencia operativa. Para la ARCPL, esta mejora se traduce en una optimización significativa del uso de sus recursos, tanto humanos como materiales, al minimizar las distancias recorridas. Siendo asi fundamentales para aumentar la demanda de recolección de residuos reciclables.

- **Adaptabilidad:** El modelo CVRP puede adaptarse a las necesidades específicas de la ARCPL. Asimismo, el sistema ReporTrash también puede ajustarse a los requerimientos específicos de la ARCPL, proporcionando una solución integral y eficiente para la gestión de residuos reciclables.

- **Sostenibilidad:** Al mejorar la eficiencia en la recolección de residuos reciclables, se contribuye a la sostenibilidad ambiental y a promover prácticas más ecológicas.

4.2 Alcances y Limitaciones

4.2.1 Alcance del Proyecto

- **Desarrollo e implementación del modelo CVRP:** Diseño y aplicación del modelo CVRP para optimizar las rutas de recolección de residuos reciclables en el distrito de Lurigancho.
- **Desarrollo del diseño del sistema ReporTrash:** Crear un diseño detallado del sistema, incluyendo una administración de base de datos, su estructura y funcionalidades.
- **Optimización de rutas:** Desarrollo y análisis de rutas optimizadas para la recolección de residuos reciclables por la AARCPL utilizando el modelo CVRP.

4.2.2 Limitaciones y Restricciones

El proyecto enfrenta varias limitaciones y restricciones que deben ser consideradas:

- **No implementación del sistema:** Aunque se desarrolló el diseño y el modelo, el sistema ReporTrash no se llegó a implementar en la práctica, por causas de tiempo.
- **Restricciones presupuestarias:** La implementación completa del sistema y la optimización de rutas requerirían recursos financieros adicionales que no estuvieron disponibles durante el desarrollo del proyecto.
- **Capacidad de los vehículos:** La capacidad de carga de los vehículos de recolección es limitada a 50 kg, debido a que se cuenta con pocos usuarios participantes y que los recicladores aparte de recolectar residuos reciclables también recolectan chatarra.
- **Aceptación y adaptación:** La transición al nuevo sistema requerirá tiempo y esfuerzo para asegurar que tanto los usuarios conozcan el sistema ReporTrash, así cómo para

capacitar y adaptar a la AARCPL al nuevo sistema propuesto.

- **Dependencia de API:** El uso que se tiene para la generación de una matriz de distancia de los usuarios y el reciclador se está dando con la API gratuita de Google Maps, lo cual nos limita en la capacidad para abarcar a un gran número de usuarios.
- **Dependencia tecnológica:** La solución depende de la disponibilidad y funcionamiento continuo de la tecnología implementada, lo cual puede ser un riesgo en caso de fallos técnicos.

4.3 Análisis de la Solución

4.3.1 Descripción Solución Propuesta

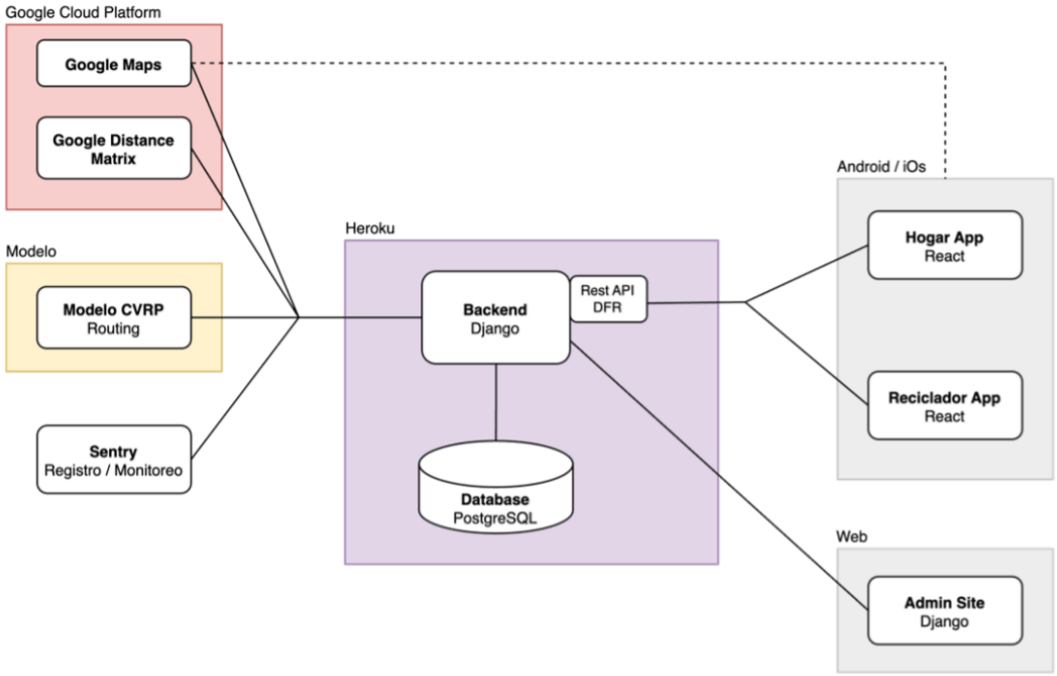
El sistema que se integrará está dirigido a la población en general, aumentando la conciencia ambiental y el desarrollo ecológico. Se incorporará el modelo CVRP en el sistema ReporTrash, el que ayudará a los recicladores a la identificación de rutas óptimas para recolectar residuos reciclables de los usuarios. El modelo CVRP agrupará a los usuarios según la cantidad de material reciclable registrado y creará rutas óptimas que minimizarán la distancia de recorrido y el tiempo para garantizar una recolección eficiente y efectiva.

4.3.2 Diagrama de Arquitectura

El sistema de software que utilizamos consta de dos partes fundamentales. Un backend que registra la información ingresada por los usuarios y la creación de rutas óptimas. Dos frontends que permiten la interacción con el backend. Y una API REST que permite la comunicación de ambas partes, cómo se muestra en la figura 13

Figura 13

Arquitectura de Software de ReportTrash



Nota: Esta arquitectura de software facilita la optimización de rutas mediante el modelo CVRP, garantizando un flujo eficiente de información y una experiencia de usuario intuitiva.

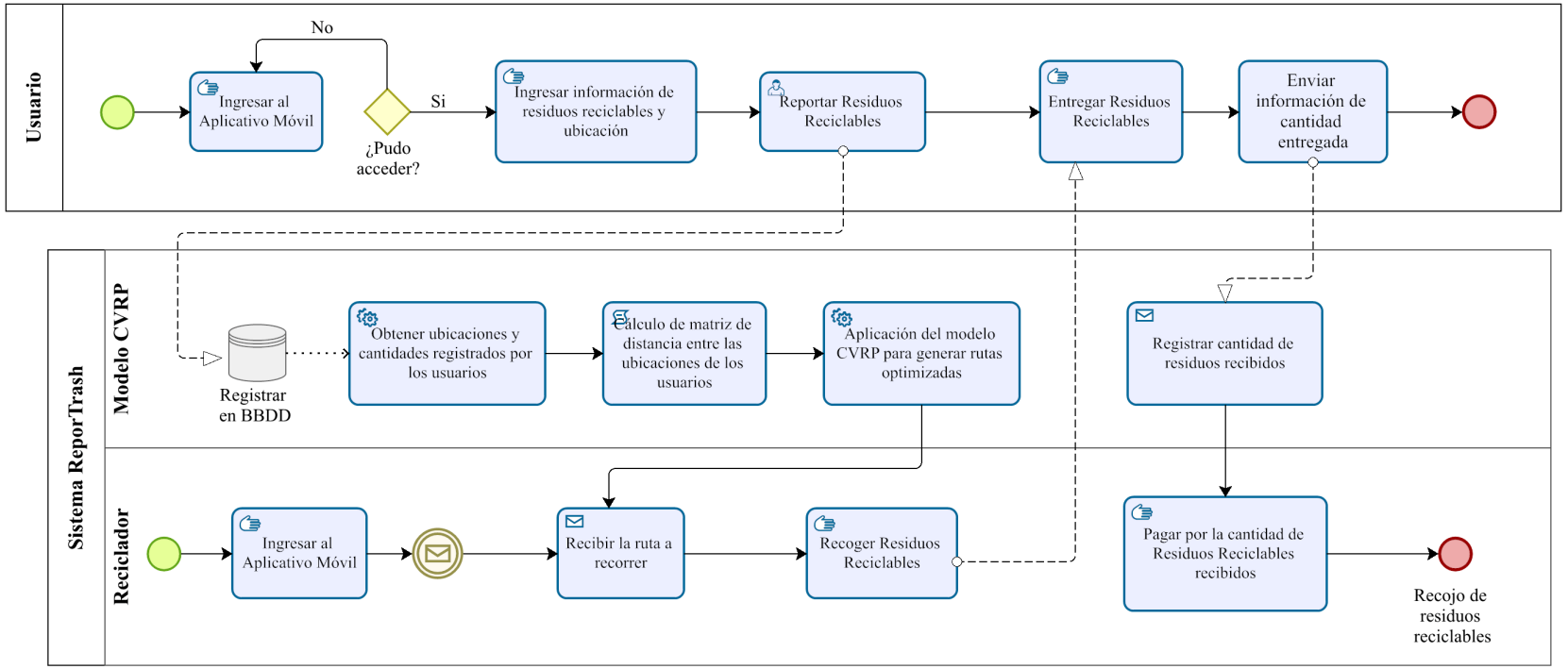
Elaboración Propia.

4.3.3 Diagrama de Procesos Mejorado (BPMN)

El proceso se inicia cuando de los usuarios se reporta su material reciclable en el sistema ReporTrash. El sistema tomará la cantidad de material y dirección registrada para generar rutas óptimas con el modelo CVRP. Luego, notificará a cada reciclador la ruta que tendrá que recorrer para su recolección, finalizando con la transacción del material reciclable.

Figura 14

Diagrama de proceso de Sistema ReporTrash



Nota: El diagrama de procesos muestra el flujo de actividades implicadas en la implementación del modelo CVRP en la ARCPL. Se detallan las etapas, desde la entrada de datos por los usuarios, hasta la optimización de rutas y la ejecución efectiva de la recolección de residuos, permitiendo visualizar cómo cada fase contribuye al logro de una operación más eficiente.

Elaboración Propia.

4.4 Obtención de Requerimientos

4.4.1 Requerimientos Funcionales

Los requerimientos funcionales manejan la notación RF, cada requerimiento presenta una prioridad (Mínima, Moderada, Elevada) que determina su influencia en el desarrollo del sistema ReporTrash. En la tabla 5 se enumeran todos los requisitos funcionales.

Tabla 5

Requerimientos Funcionales

Código	Nombre	Prioridad	Detalle
ReqF_001	Registro de usuarios	Elevada	El sistema permitirá registrar a los hogares y recicladores.
ReqF_002	Inicio de sesión	Elevada	El sistema permitirá que los usuarios registrados inicien sesión con sus credenciales.
ReqF_003	Registro de reciclaje	Elevada	El sistema permitirá que los hogares registren la cantidad, tipo de reciclaje y su ubicación.
ReqF_004	Procesamiento de Datos	Elevada	El sistema debe almacenar y procesar la información de reciclaje registrado por los hogares.
ReqF_005	Optimización de rutas	Elevada	El sistema debe utilizar un modelo CVRP para obtener las rutas óptimas para la recolección de reciclaje.
ReqF_006	Asignación de rutas	Elevada	El sistema debe asignar las rutas optimizadas a los vehículos disponibles.

Código	Nombre	Prioridad	Detalle
ReqF_007	Monitoreo de recolección	Moderado	El sistema permitirá a los recicladores marquen su recolección completada y actualizar el estado de la recolección en tiempo real.
ReqF_008	Confirmación de Recolección	Moderado	El sistema debe notificar a los hogares al finalizar el recojo de su reciclaje.
ReqF_009	Calificación del Servicio	Mínima	El sistema permitirá que los hogares califiquen el servicio de recolección.
ReqF_010	Generación de reportes	Mínima	El sistema debe producir reportes sobre las cantidades de residuos reciclables recogidos y las rutas optimizadas.

4.4.2 Requerimientos No Funcionales

Los requisitos no funcionales manejan la notación ReqNF. Al igual que con los requerimientos funcionales, cada uno presenta una prioridad (Mínima, Moderado, Elevada) que determina su influencia en el sistema ReporTrash. En la tabla 6, se enumeran todos los requisitos no funcionales.

Tabla 6

Requerimientos No Funcionales

Código	Nombre	Prioridad	Detalle
ReqNF_001	Rendimiento	Elevada	El sistema debe procesar y optimizar las rutas en menos de 5 segundos.

Código	Nombre	Prioridad	Detalle
ReqNF_002	Escalabilidad	Elevada	El sistema debe manejar un número creciente de usuarios y registros sin degradar el rendimiento.
ReqNF_003	Seguridad	Elevada	Los datos deben ser protegidos mediante cifrado y el sistema debe implementar autenticación.
ReqNF_004	Disponibilidad	Elevada	El sistema debe estar disponible al menos el 99.9 % del tiempo.
ReqNF_005	Usabilidad	Elevada	La interfaz de usuario debe ser intuitiva.
ReqNF_006	Compatibilidad	Moderado	El sistema debe ser accesible desde dispositivos Android y navegadores.
ReqNF_007	Mantenibilidad	Moderado	El sistema debe ser modular, con documentación clara para un buen mantenimiento y actualización.
ReqNF_008	Fiabilidad	Elevada	El sistema debe ser fiable y evitar pérdidas de datos.

4.5 Modelamiento UML

4.5.1 Diagrama Casos de Uso

Los casos de uso son comportamientos detallados de cómo los usuarios interactúan con el sistema, estableciendo conjuntos de pasos que describen un contexto principal y varias acciones alternativas diferentes para que el usuario interactúe con el sistema. En la figura 15 se presenta el caso de uso global teniendo a sus tres actores (Centro de acopio, Reciclador, Usuarios)

Figura 15

CU Sistema ReporTrash



Nota: Este diagrama de caso de uso ilustra las interacciones entre los actores y el sistema en el contexto de la implementación del modelo CVRP en la ARCPL. Elaboración propia.

4.5.2 Documentación Casos de Uso

Registro de Usuarios

Tabla 7

CU 01 - Registro de Usuarios

Definición	
Código	CU_001
Nombre	Registro de Usuarios
Actores	Usuarios

Descripción	Los Usuarios se registran proporcionando información básica.
Contexto Principal	
Condiciones previas	Ninguna
Flujo básico	**Acción del actor:** Los Usuarios ingresan sus datos en el formulario para su registro. **Respuesta del sistema:** El sistema guarda los datos y confirma el registro.
Condiciones de éxito	Usuario registrado en el sistema.

Registro de Recicladores

Tabla 8

CU 02 - Registro de Recicladores

Definición	
Código	CU_002
Nombre	Registro de Recicladores
Actores	Reciclador
Descripción	El reciclador se registra proporcionando información básica.
Contexto Principal	
Condiciones previas	Ninguna
Flujo básico	**Acción del actor:** El reciclador ingresan su información personal en el formulario de registro. **Respuesta del sistema:** El sistema guarda los datos y confirma el registro exitoso.
Condiciones de éxito	Reciclador registrado en el sistema.

Inicio de Sesión

Tabla 9

CU 03 - Inicio de Sesión

Definición	
Código	CU_003
Nombre	Inicio de Sesión
Actores	Usuario, Reciclador
Descripción	Permitir a los actores inicien con sus credenciales.
Contexto Principal	
Condiciones previas	Actores registrados
Flujo básico	**Acción del actor:** El actor ingresa con usuario y contraseña. **Respuesta del sistema:** El sistema verifica las credenciales y permite el acceso.
Condiciones de éxito	Actores autenticados

Registrar reciclaje

Tabla 10

CU 04 - Registrar reciclaje

Definición	
Código	CU_004
Nombre	Registrar reciclaje
Actores	Usuario
Descripción	Los usuarios registran la cantidad de reciclaje que tienen y su ubicación.

Contexto Principal	
Condiciones previas	Usuarios autenticados.
Flujo básico	**Acción del actor:** El usuario ingresa la cantidad de reciclaje y su ubicación en el formulario. **Respuesta del sistema:** Guardará los datos y confirmará el registro.
Condiciones de éxito	reciclaje registrado en la BD.

Procesar Información de reciclaje

Tabla 11

CU 05 - Procesar Información de reciclaje

Definición	
Código	CU_005
Nombre	Procesar Información de reciclaje
Actores	Centro de acopio
Descripción	Almacenar y procesar la información registrada por los Usuarios.
Contexto Principal	
Condiciones previas	reciclaje registrado.
Flujo básico	**Acción del actor:** El centro de acopio accede al registro del reciclaje. **Respuesta del sistema:** El sistema centraliza y muestra los datos.
Condiciones de éxito	Datos listos para optimización.

Optimizar rutas de recolección

Tabla 12

CU 06 - Optimizar rutas de recolección

Definición	
Código	CU_006
Nombre	Optimizar rutas de recolección
Actores	Centro de acopio
Descripción	Utilizar el modelo CVRP para calcular las rutas óptimas para la recolección.
Contexto Principal	
Condiciones previas	Datos de reciclaje registrados.
Flujo básico	**Acción del actor:** El centro de acopio accede al registro del reciclaje. **Respuesta del sistema:** El sistema centraliza y muestra los datos.
Condiciones de éxito	Rutas óptimas calculadas.

Asignar rutas a recicladores

Tabla 13

CU 07 - Asignar rutas a recicladores

Definición	
Código	CU_007
Nombre	Asignar rutas a recicladores
Actores	Centro de acopio, Recicladores
Descripción	Asignar las rutas optimizadas a los recicladores disponibles

Contexto Principal	
Condiciones previas	Rutas optimizadas
Flujo básico	**Acción del actor:** El centro de acopio asigna rutas a los recicladores. **Respuesta del sistema:** El sistema notifica a los recicladores las rutas obtenidas.
Condiciones de éxito	Rutas asignadas a recicladores.

Monitorear Progreso de Recolección

Tabla 14

CU 08 - Monitorear Progreso de Recolección

Definición	
Código	CU_008
Nombre	Monitorear Progreso de Recolección
Actores	Recicladores
Descripción	Permitir que los recicladores actualicen el estado de la recolección en tiempo real.
Contexto Principal	
Condiciones previas	Reciclador autenticado, rutas asignadas.
Flujo básico	**Acción del actor:** El reciclador actualiza cada vez que recoge el reciclaje. **Respuesta del sistema:** El sistema actualiza el estado de cada recolección.
Condiciones de éxito	Estado de la recolección actualizado.

Confirmar Recolección al Cliente

Tabla 15

CU 09 - Confirmar Recolección al Cliente

Definición	
Código	CU_009
Nombre	Confirmar Recolección al Cliente.
Actores	Sistema
Descripción	Notifica a los usuarios una vez recogido el reciclaje.
Contexto Principal	
Condiciones previas	Recolección completada.
Flujo básico	**Acción del actor:** El sistema envía una confirmación. **Respuesta del sistema:** Los usuarios reciben una confirmación de la recolección.
Condiciones de éxito	Usuarios notificados.

Calificar Servicio de Recolección

Tabla 16

CU 10 - Calificar Servicio de Recolección

Definición	
Código	CU_010
Nombre	Calificar Servicio de Recolección
Actores	Usuarios
Descripción	Los usuarios calificarán el servicio de recolección.
Contexto Principal	

Condiciones previas	Cliente autenticado, recolección completada.
Flujo básico	**Acción del actor:** El sistema envía una confirmación. **Respuesta del sistema:** EL sistema guarda la calificación.
Condiciones de éxito	Calificación guardada.

Elaborar reportes de reciclaje

Tabla 17

CU 11 - Elaborar reportes de reciclaje

Definición	
Código	CU_011
Nombre	Elaborar reportes de reciclaje
Actores	Centro de acopio
Descripción	Elaborar reportes sobre las cantidades de reciclaje recogidas
Contexto Principal	
Condiciones previas	Datos de reciclaje recolectados.
Flujo básico	**Acción del actor:** El centro de acopio solicita la generación de reportes. **Respuesta del sistema:** El sistema genera y muestra los reportes obtenidos.
Condiciones de éxito	reportes generados.

Capítulo 5

DISEÑO DEL SISTEMA

5.1 Diseño Físico de BBDD

Se presenta el diagrama de base de datos del sistema, que detalla la estructura y relaciones entre las entidades gestionadas:

5.1.1 Atributos Principales

- **Users:** username, last_name, phone.
- **Recyclers:** username, last_name, phone, center_id.
- **Vehicles:** placa, vehicle_type, capacity.
- **Assignments:** vehicle_id, recycler_id.
- **Recyclingrecords:** estimated_amount, user_ide, type_ide.
- **Recyclingtypes:** type_name.
- **Userdirections:** latitude, longitude, user_id.
- **Recyclingcenter:** center_name, latitude. longitude.

5.1.2 Entidades y Relaciones

Tabla 18

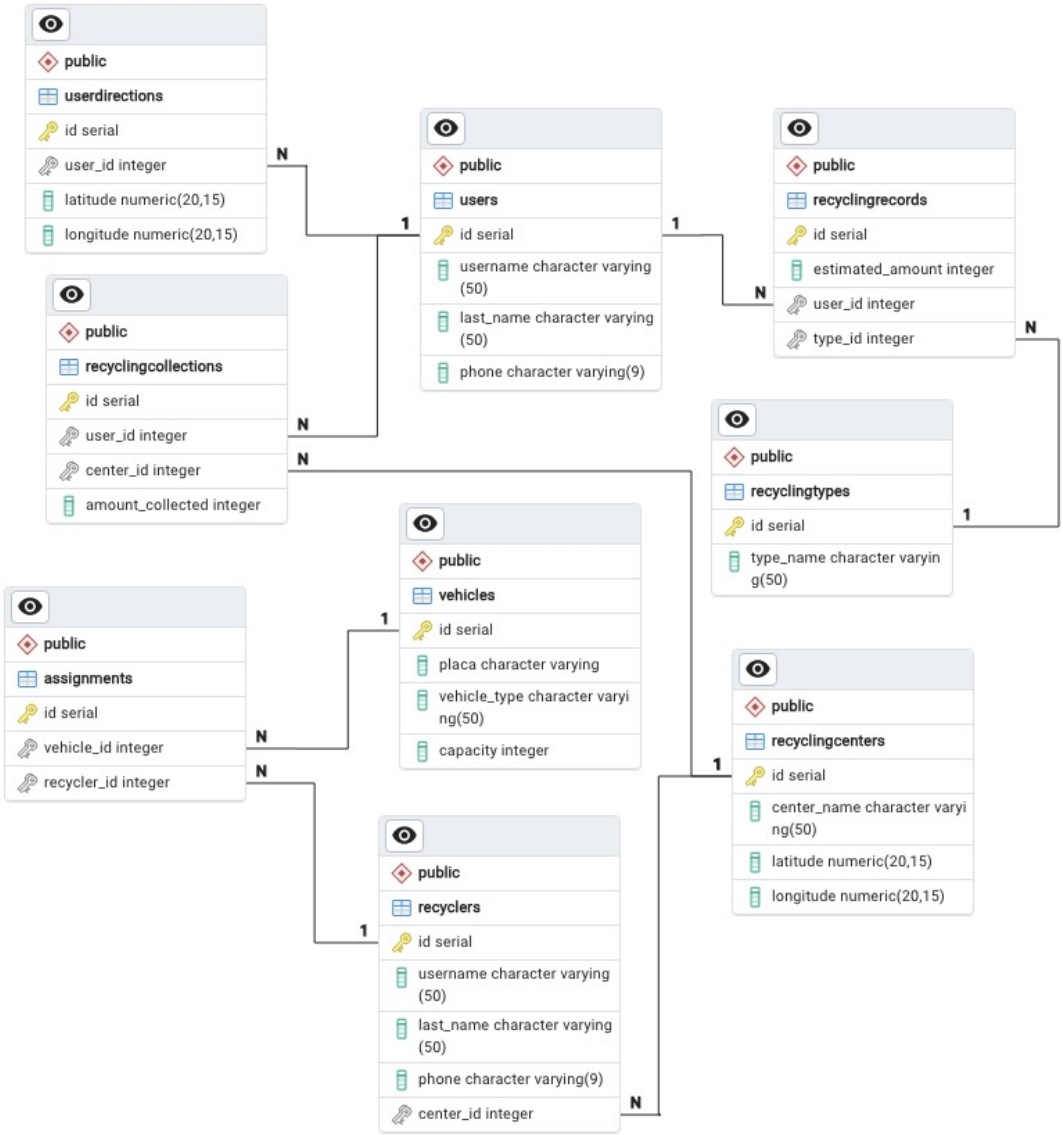
Entidades y Relaciones de la BBDD

Entidad	Descripción	Relaciones
Users	Representa los usuarios del sistema	Uno a Muchos con Userdirections Uno a Muchos con Recyclingcollections
Recyclers	Representa los recicladores	Uno a Muchos con Assignments Muchos a Uno con Recyclingcenters
Vehicles	Representa los vehículo pertenecientes a la ARCPL	Uno a Muchos con Assignments
Assignments	Asignacion de vehículo con reciclador	Muchos a uno con Vehicles Muchos a uno con Recyclers
Recyclingrecords	Cantidad de reciclaje	Muchos a Uno con Recyclingtypes Muchos a Uno con Userdirections
Recyclingtypes	Tipo de reciclaje	Uno a Muchos con Recyclingrecords
Userdirections	Ubicación de los usuarios	Muchos a Uno con Users
Recyclingcenter	Ubicación de la ARCPL	Uno a Muchos con Recyclers Uno a Muchos con Recyclingcollections

Este diagrama proporciona una visión clara de cómo están estructuradas las entidades en la base de datos y cómo se relacionan entre sí, facilitando el entendimiento y la implementación del sistema como se puede observar en la figura 16.

Figura 16

Diagrama BBDD del Sistema ReporTrash



Nota: Este diagrama representa la estructura de la base de datos del sistema, mostrando las tablas y sus relaciones. Se ha diseñado para optimizar el almacenamiento y la recuperación de datos, garantizando la integridad y coherencia de la información. Elaboración propia.

5.2 Desarrollo de Prototipos de Alta Fidelidad

La mayor prioridad en el diseño del sistema es garantizar su simplicidad de uso. Dado que gran parte de nuestro público objetivo no está familiarizado con el reporte de residuos reciclables, es esencial que la interfaz sea intuitiva y fácil de usar. Para lograr este objetivo,

seguimos las recomendaciones de Donald Norman en su libro The Design of Everyday Things Norman, 2013, una obra de referencia fundamental en el diseño de interfaces de usuario (UI) y experiencia de usuario (UX).

La idea general al diseñar el sistema es comenzar por descubrir los problemas que el sistema está tratando de resolver. Con ello, el objetivo es trasladar una idea a un prototipo de alta fidelidad. Los pasos para seguir son:

1. **Descubrimiento de problemas:** Investigación de usuarios y de mercado.
2. **Diseño de Experiencia de Usuario (UX):** Mapas de recorrido del usuario, bocetos de componentes principales.
3. **Diseño de Interfaz de Usuario (UI):** Maquetación de prototipo de alta fidelidad

5.2.1 Descubrimiento de Problemas

Una buena práctica en esta fase es tener entrevistas con los usuarios. Sin embargo, este paso se pudo omitir porque se llevaron a cabo reuniones con la asociación de recicladores, permitiendo tener una visión clara de nuestro público objetivo. Inicialmente, se creía que la mayoría de nuestros usuarios serían personas adultas mayores de 45 años, pero se descubrió que alrededor del 70% de ellos son menores de 40 años. Actualmente, las aplicaciones móviles suelen ser más adoptadas entre los jóvenes, lo que fue un factor decisivo para optar por crear una aplicación. Debido a esto, no fue necesario establecer hogares o formularios de encuesta.

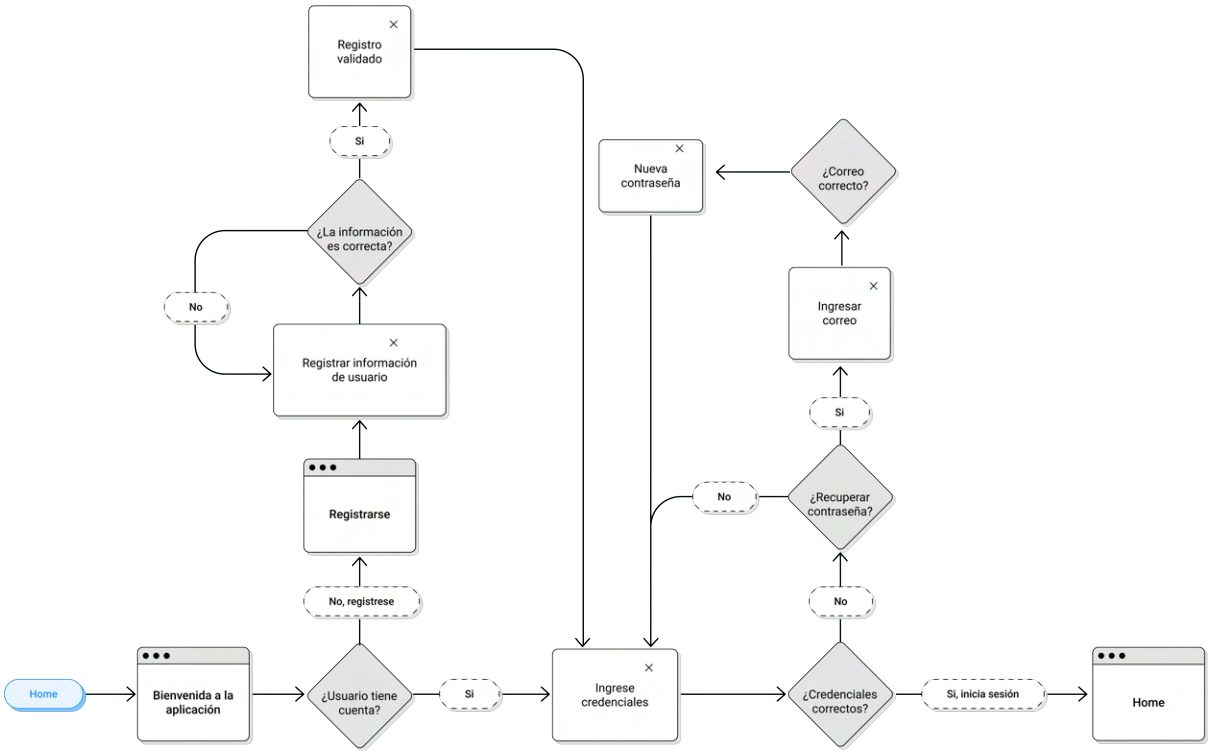
5.2.2 Diseño de Experiencia de Usuario (UX)

La experiencia de usuario incluye la experimentación e interacción del usuario con un producto. El objetivo es diseñar el sistema para maximizar la satisfacción del usuario al interactuar. Lo que significa hacer una lógica simple y eficiente al momento de usar el sistema.

Para la estructura, se partió en realizar los diagramas de flujo de usuarios, como podemos ver en la Figura 17, tenemos el flujo de usuarios donde se identifican los pasos concretos de registro, inicio de sesión y la recuperación de contraseña tanto para recicladores y hogares. Y en la figura 18 observamos el flujo en el cual el usuario podrá reportar sus residuos reciclables, asimismo en la figura 19 el flujo que sigue el reciclador al ser notificado de las rutas a recorrer para la recolección de residuos reciclables.

Figura 17

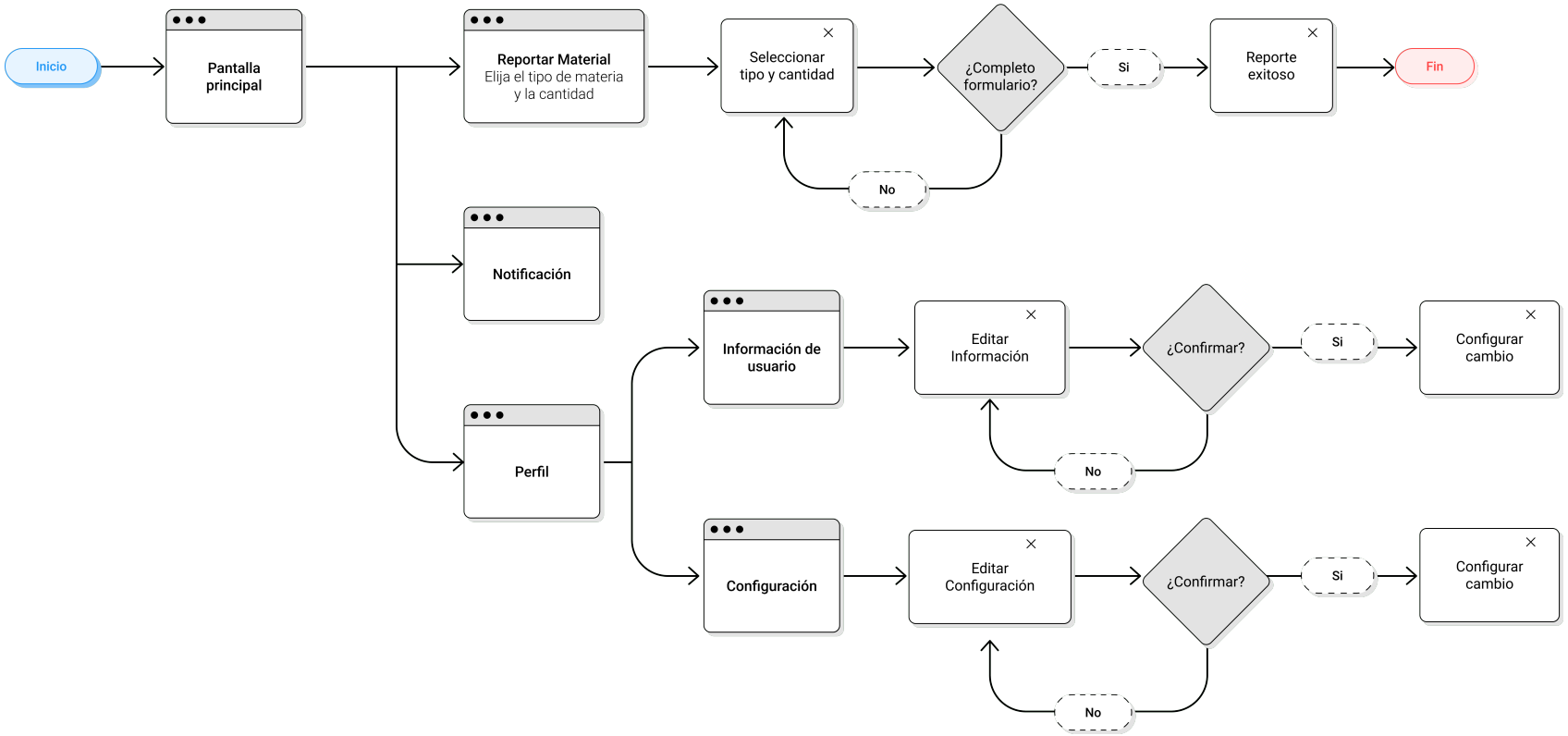
User Flow – Registro / Inicio de sesión / Recuperación de contraseña de Usuarios



Nota: El flujo incluye la verificación de credenciales, la recuperación de contraseñas, y el registro de nuevos hogares.

Figura 18

User Flow: Reporte de residuos reciclables por los usuarios



Nota: Este diagrama es el flujo de trabajo que seguirá un hogar en su reporte de residuos reciclables. El flujo incluye notificación de sus reportes y edición de su perfil. Elaboración propia.

Figura 19

User Flow: Notificación de rutas y recolección de recicladores



Nota: Este diagrama es el flujo de trabajo que seguirá un reciclador para su recolección de residuos reciclables. El flujo incluye la notificación al reciclador, la recepción de ruta asignada, la confirmación y realización del recorrido. Cada paso asegura una experiencia fluida y eficiente en la recolección de residuos reciclables. Elaboración propia.

5.2.3 Diseño de la Interfaz de Usuario (UI)

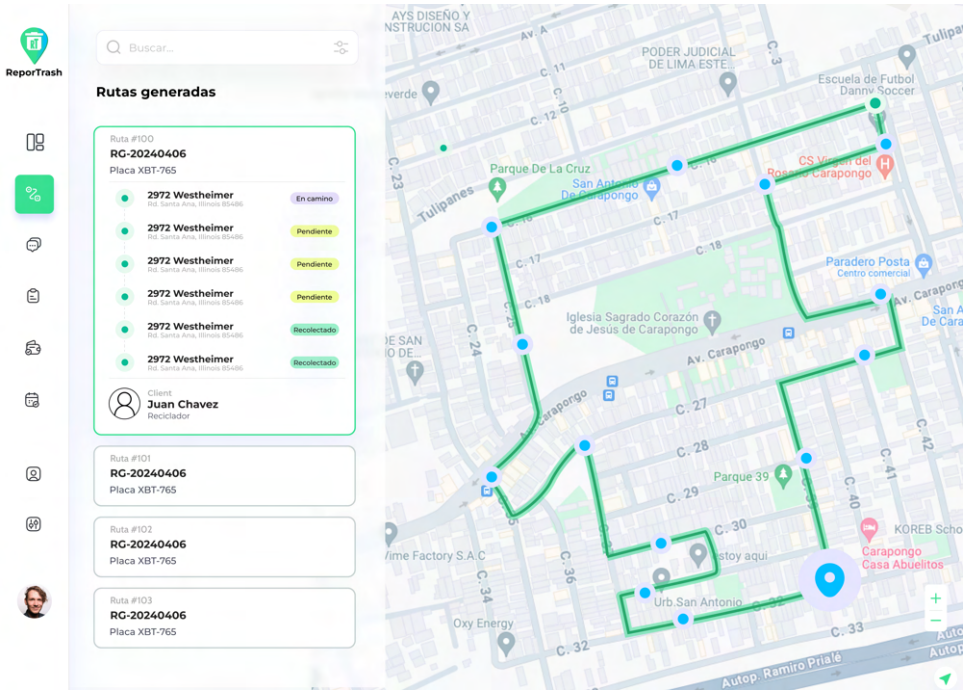
Sistema

Para el sistema ReporTrash su diseño de interfaz es la parte visual del backend. La idea es que, una vez que el backend haya generado todas las rutas óptimas que siguen el modelo CVRP, estas rutas pueden ser mostradas en un dashboard como se observa en la figura 20 Este dashboard permitirá que la sede de la asociación de recicladores gestione eficientemente las

operaciones. Y no solo servirá para mostrar las rutas sino también para obtener la analítica de todos los residuos reciclados.

Figura 20

Dashboard del Sistema ReporTrash



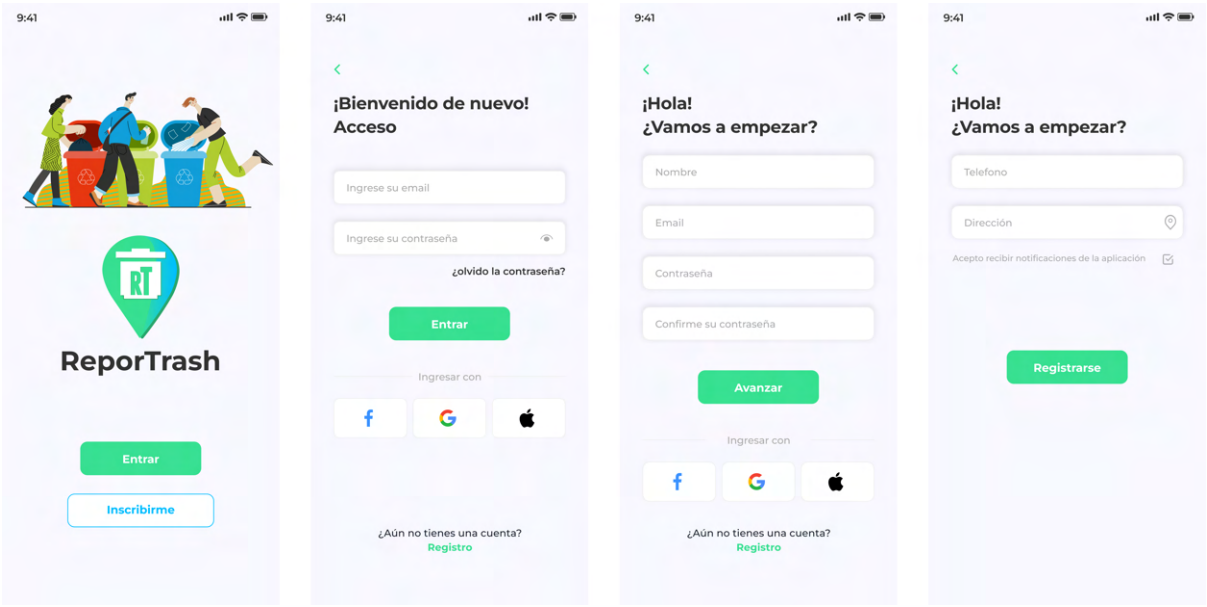
Nota: Elaboración propia.

Hogares

La segunda parte de nuestro sistema es la aplicación que será usada por los usuarios. En esta aplicación, los usuarios podrán registrarse ingresando datos que son muy importantes como el nombre del usuario y la ubicación del hogar, como se observa en la figura 21.

Figura 21

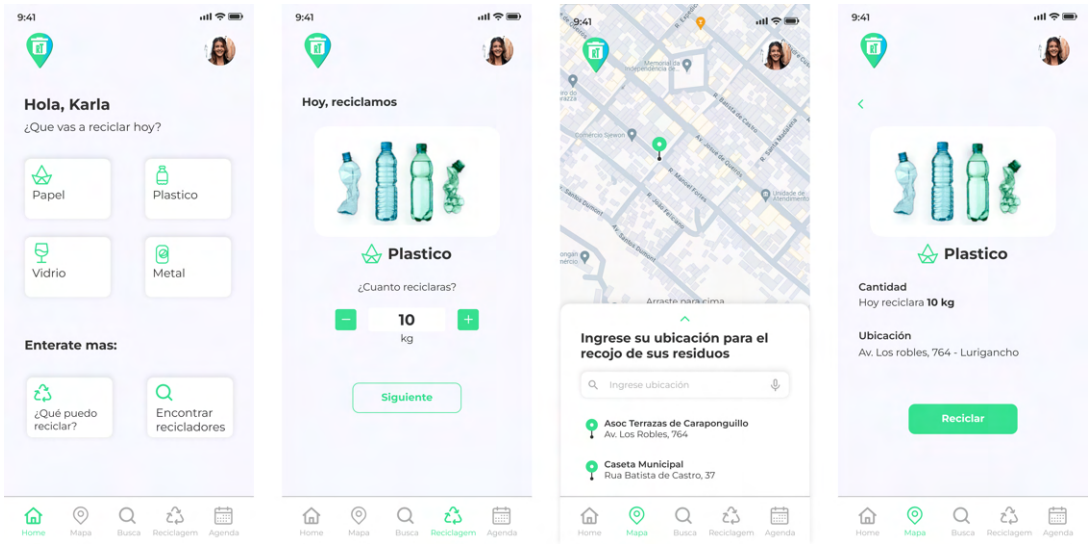
Login y Registro de usuario



Además del registro, el usuario podrá seleccionar el tipo de residuo reciclable y su cantidad, así como se muestra en la figura 22, siendo registrado en la base de datos para posteriormente generarse las rutas óptimas.

Figura 22

Reporte de residuos reciclables



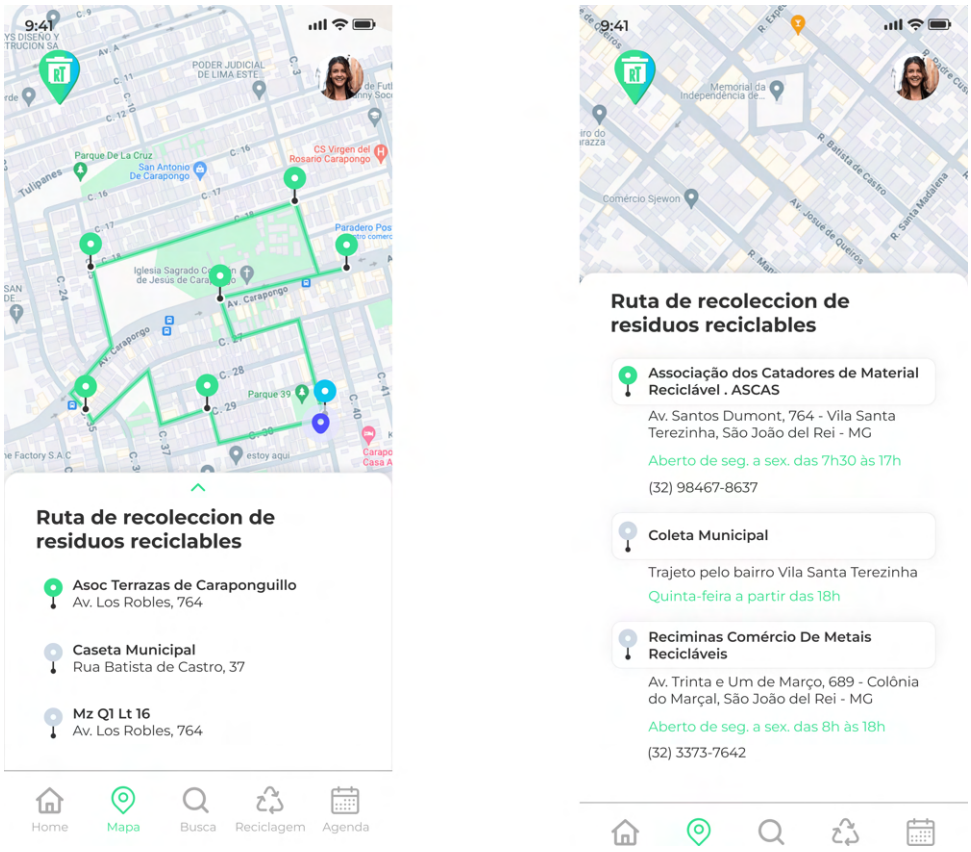
Nota: Elaboración propia.

Recicladores

Finalmente se tiene el diseño de la aplicación que los recicladores usarán; en esta aplicación el reciclador tendrá la ruta generada por el modelo CVRP.

Figura 23

Ruta para recolección de residuos reciclables



Nota: Elaboración propia.

Capítulo 6

RESULTADOS

6.1 Descripción del Escenario

El escenario considerado para la prueba del modelo CVRP incluye la ubicación del centro de acopio y 40 ubicaciones de usuarios. La capacidad de los vehículos y las demandas de residuos reciclables de los usuarios. Para la aplicación del modelo, uno de los puntos importantes es conocer la distancia que existe entre el centro de acopio con cada uno de los usuarios y así mismo la distancia entre usuarios. Para la obtención de esta matriz de distancias se realizó mediante el API de Google Maps. Sin embargo, dado que esta API que se está utilizando es gratuita, tiene una limitación que solo puede generar matrices de hasta 20x20, por lo cual el escenario completo se dividió en dos subescenarios de 20 usuarios cada uno.

6.1.1 Subescenario 1

Para el primer subescenario, se consideraron 20 ubicaciones de usuarios, las cuales se presentan en la Tabla 19. Estas ubicaciones fueron seleccionadas para evaluar la capacidad del modelo CVRP en la optimización de rutas en un contexto realista de distribución.

Tabla 19

Relación del primer grupo de 20 usuarios

Usuario	Cant. Residuos (Kg)	Latitude	Longitude	Usuario	Cant. Residuos (Kg)	Latitude	Longitude
U1	8	-12.0028618	-76.86483362	U11	12	-12.00119804	-76.87733252
U2	15	-12.00412265	-76.86285634	U12	8	-12.00032031	-76.87956917
U3	6	-12.00414659	-76.86727464	U13	6	-12.00257358	-76.88001115
U4	8	-11.99936995	-76.86906155	U14	8	-12.00700145	-76.88175225
U5	6	-11.99784955	-76.86513281	U15	16	-12.00160415	-76.883413
U6	8	-11.99613759	-76.86606298	U16	6	-12.00473512	-76.88668093
U7	5	-11.99883122	-76.86940424	U17	6	-11.99504604	-76.87020689
U8	10	-11.99962135	-76.8723661	U18	7	-11.99319884	-76.86581395
U9	9	-12.00133329	-76.869955	U19	10	-11.99308093	-76.86839882
U10	9	-12.00274388	-76.87398424	U20	14	-11.98801087	-76.86774256

Matriz de Distancias

La matriz de distancias, presentada en la Tabla 20, fue calculada utilizando las coordenadas de los 20 usuarios y el depósito central. La API de Google Maps se encargó de obtener estas distancias de manera eficiente y precisa, tomando en cuenta las condiciones reales de tráfico y rutas disponibles.

Tabla 20

Matriz de Distancia - Subescenario 1

	CA	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20
CA	0	525	146	782	1433	1092	1356	1480	1883	1429	1727	2304	2658	2574	2240	2871	3140	1776	2330	2008	2464
U1	525	0	459	405	1030	690	953	1078	1158	705	1002	1579	1934	1850	2270	2901	3170	1374	1928	1605	2061
U2	146	341	0	929	1250	909	1172	1297	1500	1046	1344	1921	2275	2191	2387	3017	3286	1593	2147	1825	2280
U3	929	405	864	0	1424	1095	1358	1482	1058	604	902	1479	1833	1749	1866	2496	2766	1778	2332	2010	2466
U4	1433	1030	1250	1431	0	589	981	205	366	288	870	936	1290	1311	1944	2359	2628	918	1471	1149	1605
U5	1092	690	909	1095	589	0	276	636	955	877	1692	1525	1879	1900	2951	3581	3850	783	1337	1015	1470
U6	1356	953	1172	1358	852	276	0	852	1229	1140	1690	1756	2110	2131	3214	3844	4114	507	1060	738	1194
U7	1480	1078	1297	1482	205	636	852	0	393	315	897	963	1317	1338	1971	2386	2655	788	1342	1020	1476
U8	1690	1165	1624	1065	366	1082	1229	393	0	476	504	569	924	945	1578	1993	2262	865	1719	1397	1853
U9	1229	705	1164	604	288	877	1270	315	476	0	581	1046	1400	1428	1893	2070	2339	1206	1760	1438	1893
U10	1699	1175	1634	1074	1051	1865	1872	1078	685	963	0	577	932	847	1074	1489	1758	1508	2362	2040	2495
U11	2114	1589	2048	1489	936	1609	1756	963	569	1046	878	0	354	375	1359	1774	2043	1392	2246	1924	2380
U12	2487	1963	2422	1862	1309	1982	2129	1336	943	1419	1251	373	0	340	1733	2147	2417	1765	2620	2297	2753
U13	2383	1858	2317	1757	1307	1980	2127	1334	941	1417	1249	375	729	0	1628	2042	2312	1763	2617	2295	2751
U14	2594	2070	2529	1969	1946	2760	2767	1973	1580	1858	1399	1390	1744	1660	0	631	900	2403	3257	2935	3390
U15	3009	2484	2943	2384	2361	3174	3181	2388	1995	2272	1814	1804	2159	2075	631	0	640	2817	3672	3349	3805
U16	4670	2753	4816	4298	2630	3443	3451	2657	2264	2541	2083	2074	2428	2344	900	640	0	3087	3941	3619	4074
U17	1776	1374	1593	1778	918	783	507	788	865	1206	1326	1392	1746	1767	3634	2815	3084	0	755	433	889
U18	2330	1928	2147	2332	1471	1337	1060	1342	1719	1760	2180	2246	2601	2621	4188	3670	3939	755	0	434	807
U19	2008	1605	1825	2010	1149	1015	738	1020	1397	1438	1858	1924	2278	2299	3866	3347	3616	433	413	0	659
U20	2464	2061	2280	2466	1605	1470	1194	1476	1853	1893	2314	2380	2734	2755	4322	3803	4072	889	811	659	0

6.1.2 Subescenario 2

Para el segundo subescenario, se consideraron 20 ubicaciones de usuarios, las cuales se presentan en la Tabla 21. Estas ubicaciones fueron seleccionadas para evaluar la capacidad del modelo CVRP en la optimización de rutas en un contexto realista de distribución.

Tabla 21

Relación del segundo grupo de 20 usuarios

Usuario	Cant. Residuos (Kg)	Latitude	Longitude	Usuario	Cant. Residuos (Kg)	Latitude	Longitude
U21	10	-11.99122061	-76.86775595	U31	15	-12.00024873	-76.84348735
U22	6	-11.99778408	-76.86955063	U32	12	-11.98797582	-76.83931485
U23	16	-11.99994566	-76.86209066	U33	6	-11.98495134	-76.8388124
U24	6	-12.00428188	-76.85858165	U34	7	-11.98236297	-76.83245738
U25	18	-11.98591889	-76.81298589	U35	11	-11.98688708	-76.83646036
U26	10	-11.99860941	-76.85133597	U36	8	-11.98542698	-76.83859755
U27	4	-11.98605834	-76.81634236	U37	6	-11.98572146	-76.8235139
U28	4	-12.0010199	-76.85019755	U38	10	-11.98341678	-76.82181286
U29	8	-12.00002426	-76.84434475	U39	9	-11.98089213	-76.81978922
U30	6	-11.9983081	-76.84999666	U40	12	-11.97953416	-76.82095257

Matriz de Distancias

La matriz de distancias, presentada en la Tabla 22, fue calculada utilizando las coordenadas de los 20 usuarios y el depósito central. La API de Google Maps se encargó de obtener estas distancias de manera eficiente y precisa, tomando en cuenta las condiciones reales de tráfico y rutas disponibles.

Tabla 22

Matriz de Distancia - Subescenario 2

	CA	U21	U22	U23	U24	U25	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37	U38	U39	U40
CA	0	2232	1569	790	449	7037	1682	6804	1724	2406	1863	2557	3944	5000	5153	4174	4942	5386	5554	6048	6126
U21	2232	0	1144	1638	2585	8766	3411	8532	3453	4135	3592	4286	5673	6729	6882	5903	6671	7115	7283	7776	7855
U22	1574	1144	0	980	1926	8108	2753	7874	2795	3477	2934	3628	5015	6071	6224	5244	6013	6457	6624	7118	7196
U23	790	1638	975	0	822	7003	1648	6770	1690	2372	1829	2523	3910	4966	5120	4140	4908	5352	5520	6014	6092
U24	449	2585	1921	822	0	6647	1292	6414	1097	1792	1473	1943	3554	4610	4763	3784	4552	4996	5164	5657	5736
U25	7075	8804	8141	7041	6685	0	5699	563	5619	5034	5880	5185	3905	3858	3155	4135	3800	3077	1575	2069	2147
U26	1682	3411	2748	1648	1292	5661	0	5428	349	1030	181	1181	2568	3625	3778	2798	3567	4011	4178	4672	4750
U27	6430	8159	7496	6396	6040	563	5054	0	4974	4389	5235	4540	3260	3213	2511	3490	3155	2432	930	1424	1502
U28	1525	3453	2790	1690	1097	5703	349	5470	0	695	529	846	2610	3666	3820	2840	3609	4053	4220	4714	4792
U29	2406	4135	3471	2372	1792	4996	1030	4762	695	0	1211	151	1903	2959	3112	2133	2901	3345	3513	4006	4085
U30	1863	3592	2929	1829	1473	5842	181	5609	529	1211	0	1362	2749	3805	3959	2979	3747	4191	4359	4853	4931
U31	2557	4286	3622	2523	1943	5147	1181	4913	846	151	1362	0	2054	3110	3263	2284	3052	3496	3663	4157	4236
U32	3944	5673	5010	3910	3554	3920	2568	3686	2488	1903	2749	2054	0	1160	1314	334	1102	2269	2437	2930	3009
U33	5000	6729	6066	4966	4610	3855	3625	3621	3544	2959	3805	3110	1919	0	1067	826	58	3325	2282	2416	2494
U34	5153	6882	6219	5120	4763	3153	3778	2919	3697	3112	3959	3263	2010	1067	0	980	1009	2021	1580	1714	1792
U35	4174	5903	5239	4140	3784	4150	2798	3916	2718	2133	2979	2284	1093	826	980	0	768	2499	2666	1952	2030
U36	4942	6671	6008	4908	4552	3797	3567	3563	3486	2901	3747	3052	1861	58	1009	768	0	3267	2224	2358	2436
U37	6436	8165	7502	6403	6046	1667	5061	1434	4980	4395	5242	4546	3266	3219	2517	2754	3161	0	937	1430	1509
U38	5561	7290	6626	5527	5171	1572	4185	1339	4105	3520	4366	3671	2391	2282	1580	2621	2224	441	0	494	572
U39	6055	7783	7120	6021	5665	2066	4679	1833	4598	4013	4860	4164	2885	2416	1714	1952	2358	934	494	0	309
U40	6133	7862	7199	6099	5743	2144	4757	1911	4677	4092	4938	4243	2963	2494	1792	2030	2436	1013	572	309	0

6.2 Generación de Rutas con el Modelo CVRP

Al tener la matriz de distancias (Ver tabla 20 y 22) y el conocimiento de la cantidad de residuos reciclables de cada usuario, se aplicó el modelo CVRP para la generación de rutas, lo que se obtuvieron las siguientes rutas:

Ruta Generada Nro 1

Esta ruta es asignada al Vehículo 01. La ruta consta de una serie de tramos que describen el recorrido del vehículo desde el centro de acopio y sigue un recorrido que incluye a seis usuarios: Usuario 5, Usuario 4, Usuario 8, Usuario 11, Usuario 12 y Usuario 13, antes de regresar al centro de acopio. (Ver tabla 23)

Tabla 23

Ruta generada 01 - Vehículo_01

	Tramo	Demanda (kg)	Distancia (km)
1	Centro de Acopio → Usuario 05	6	1.094
2	Usuario 05 → Usuario 04	8	0.590
3	Usuario 04 → Usuario 08	10	0.366
4	Usuario 08 → Usuario 11	12	0.570
5	Usuario 11 → Usuario 12	8	0.355
5	Usuario 12 → Usuario 13	6	0.340
6	Usuario 13 → Centro de Acopio	0	2.383
	Total	50	5.698

Como se observa en la **Ruta 01** se recopilaron 50 kg de residuos reciclables Presenta 5.6 km de distancia de recorrido en un tiempo de 1 hora y 30 minutos de recolección de 50 kg de residuos reciclables. Obteniendo así una ruta eficiente en terminos de distancia y tiempo, donde se asegura una recolección considerable en un tiempo moderado.

Figura 24

Mapa de Ruta Generado 01



Ruta Generada Nro 2

Esta ruta generada es asignada al Vehículo 02, comienza en el centro de acopio y sigue un recorrido que incluye a tres usuarios: Usuario 3, Usuario 1 y Usuario 2, antes de regresar al centro de acopio (Ver tabla 24).

Tabla 24

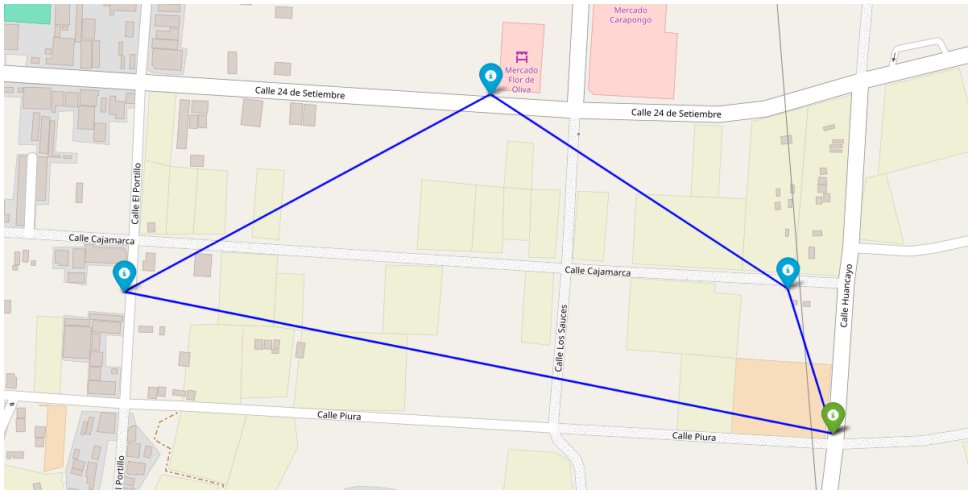
Ruta generada 02 - Vehículo_02

	Tramo	Demanda (kg)	Distancia (km)
1	Centro de Acopio → Usuario 03	6	0.782
2	Usuario 03 → Usuario 01	8	0.405
3	Usuario 01 → Usuario 02	15	0.459
4	Usuario 02 → Centro de Acopio	0	0.146
	Total	29	1.792

La **Ruta 02** presenta una distancia de recorrido equivalente a 1.7 km en un tiempo de 45 minutos de recolección. Esta ruta es la más corta en comparación con las otras, teniendo una recolección de 29 kg de residuos reciclables, lo que implica un menor consumo de combustible y tiempo de trabajo.

Figura 25

Mapa de Ruta Generado 02



Ruta Generada Nro 3

Esta ruta generada es asignada al Vehículo 3, comienza en el centro de acopio y sigue un recorrido que incluye a cinco usuarios: Usuario 9, Usuario 10, Usuario 14, Usuario 16 y Usuario 15, antes de regresar al centro de acopio (Ver tabla 25).

Tabla 25

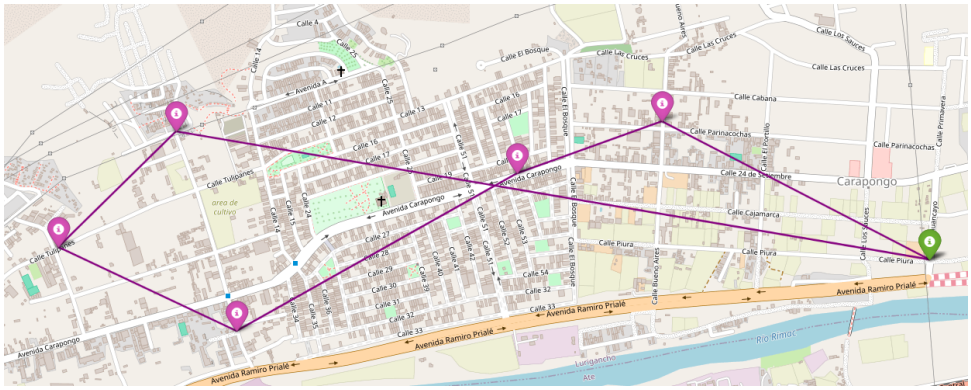
Ruta generada 03 - Vehículo_03

	Tramo	Demanda (kg)	Distancia (km)
1	Centro de Acopio → Usuario 09	9	1.230
2	Usuario 09 → Usuario 10	9	0.581
3	Usuario 10 → Usuario 14	8	1.074
4	Usuario 14 → Usuario 16	6	0.900
5	Usuario 16 → Usuario 15	16	0.641
6	Usuario 15 → Centro de Acopio	0	3.010
	Total	48	7.436

Ruta 03: Se recolectó 48 kg de residuos reciclables en 1 hora y 33 minutos teniendo 7.4 km de distancia recorrida. Aunque este camino es un poco más largo, permite una recolección eficiente en términos de peso de desechos.

Figura 26

Mapa de Ruta Generado 03



Nota: Elaboración Propia

Ruta Generada Nro 4

Esta ruta generada es asignada al Vehículo 4, comienza en el centro de acopio y sigue un recorrido que incluye a seis usuarios: Usuario 6, Usuario 19, Usuario 18, Usuario 20, Usuario 17 y Usuario 7, antes de regresar al centro de acopio (Ver tabla 26).

Tabla 26

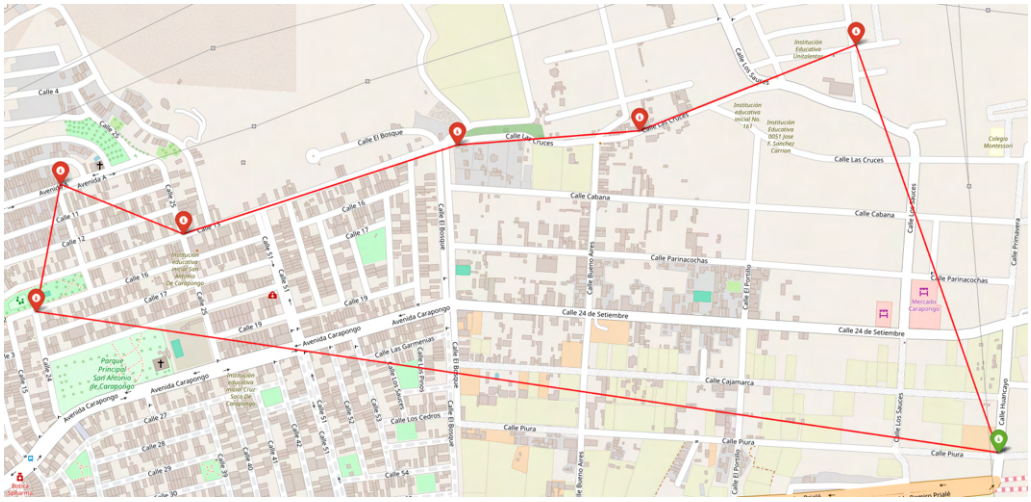
Ruta generada 04 - Vehículo_04

	Tramo	Demanda (kg)	Distancia (km)
1	Centro de Acopio → Usuario 06	8	1.356
2	Usuario 06 → Usuario 19	10	0.738
3	Usuario 19 → Usuario 18	7	0.413
4	Usuario 18 → Usuario 20	14	0.808
5	Usuario 20 → Usuario 17	6	0.889
6	Usuario 17 → Usuario 07	5	0.788
7	Usuario 07 → Centro de Acopio	0	1.481
	Total	50	6.473

En la **Ruta 04** se recopilaron 50 kg de residuos reciclables en una distancia de recorrido de 6.4 km con un tiempo de 1 hora y 32 minutos de recolección. Esta ruta es balanceada en términos de distancia y tiempo, como la Ruta 01.

Figura 27

Mapa de Ruta Generado 04



Subescenario 2

Ruta Generada Nro 5

Esta ruta generada es asignada al Vehículo 1, comienza en el centro de acopio y sigue un recorrido que incluye a cinco usuarios: Usuario 26, Usuario 32, Usuario 29, Usuario 31 y Usuario 28, antes de regresar al centro de acopio (Ver tabla 27).

Tabla 27

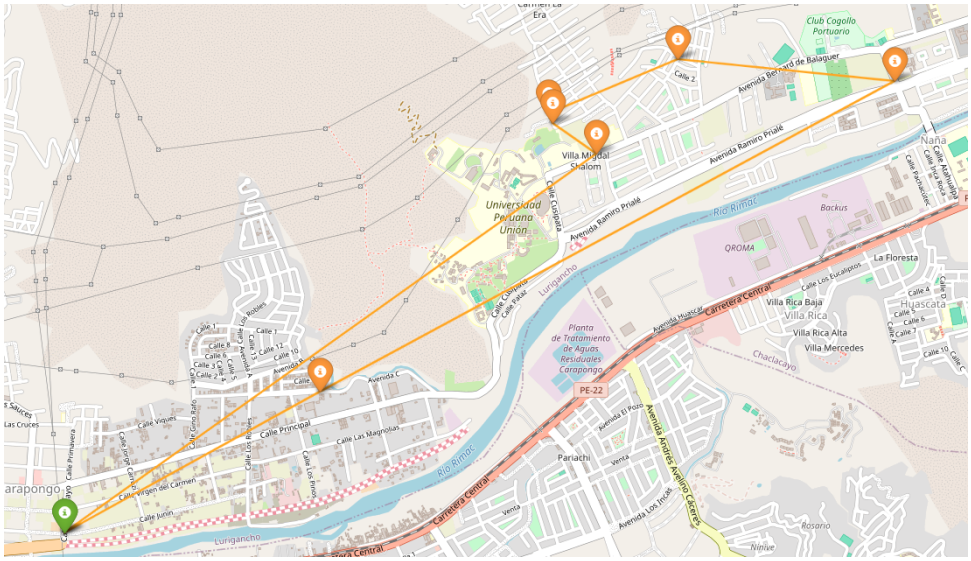
Ruta generada 05 - Vehículo_01

	Tramo	Demanda (kg)	Distancia (km)
1	Centro de Acopio → Usuario 26	10	1.682
2	Usuario 26 → Usuario 32	12	2.568
3	Usuario 32 → Usuario 29	8	1.902
4	Usuario 29 → Usuario 31	15	0.150
5	Usuario 31 → Usuario 28	4	0.846
6	Usuario 28 → Centro de Acopio	0	1.724
	Total	49	8.672

En la **Ruta 05** se recolectaron 49 kg de residuos reciclables a lo largo de 8.6 km en 1 hora y 27 minutos de recolección. Esta ruta es más larga, pero se completa en un tiempo razonable.

Figura 28

Mapa de Ruta Generado 05



Ruta Generada Nro 6

Esta ruta generada es asignada al Vehículo 2, comienza en el centro de acopio y sigue un recorrido que incluye a cuatro usuarios: Usuario 22, Usuario 21, Usuario 23 y Usuario 24, antes de regresar al centro de acopio (Ver tabla 28).

Tabla 28

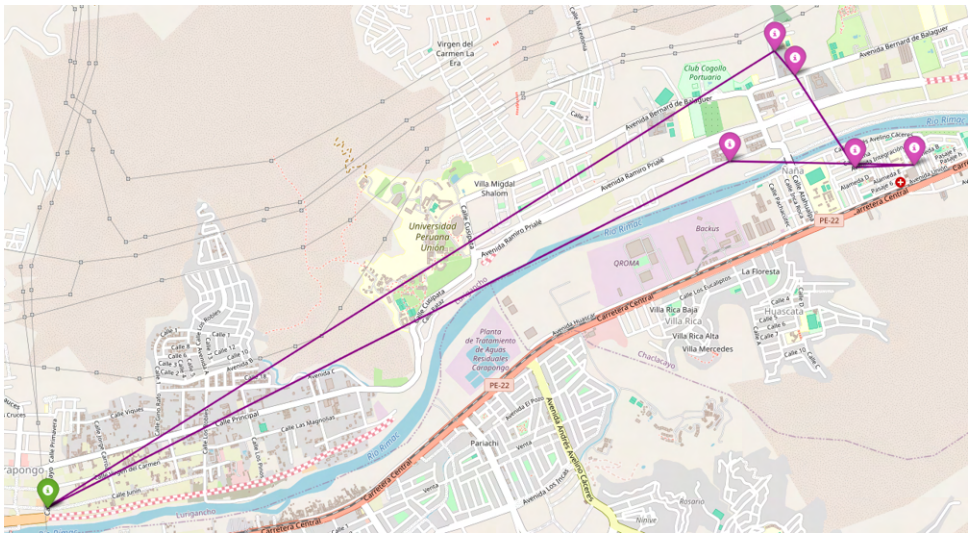
Ruta generada 06 - Vehículo_02

	Tramo	Demanda (kg)	Distancia (km)
1	Centro de Acopio → Usuario 22	6	1.570
2	Usuario 22 → Usuario 21	10	1.145
3	Usuario 21 → Usuario 23	16	1.639
4	Usuario 23 → Usuario 24	6	0.822
5	Usuario 24 → Centro de Acopio	0	0.448
	Total	38	5.624

En la **Ruta 06** el vehículo 02 recolectó 38 kg de residuos reciclables en un tiempo de 1 hora y 9 minutos y una distancia de 5.6 km. Esta ruta combina bien la distancia y la cantidad de desechos recolectados.

Figura 29

Mapa de Ruta Generado 06



Ruta Generada Nro 7

Esta ruta generada es asignada al Vehículo 3, comienza en el centro de acopio y sigue un recorrido que incluye a cinco usuarios: Usuario 37, Usuario 25, Usuario 27, Usuario 39 y Usuario 40, antes de regresar al centro de acopio (Ver tabla 29).

Tabla 29

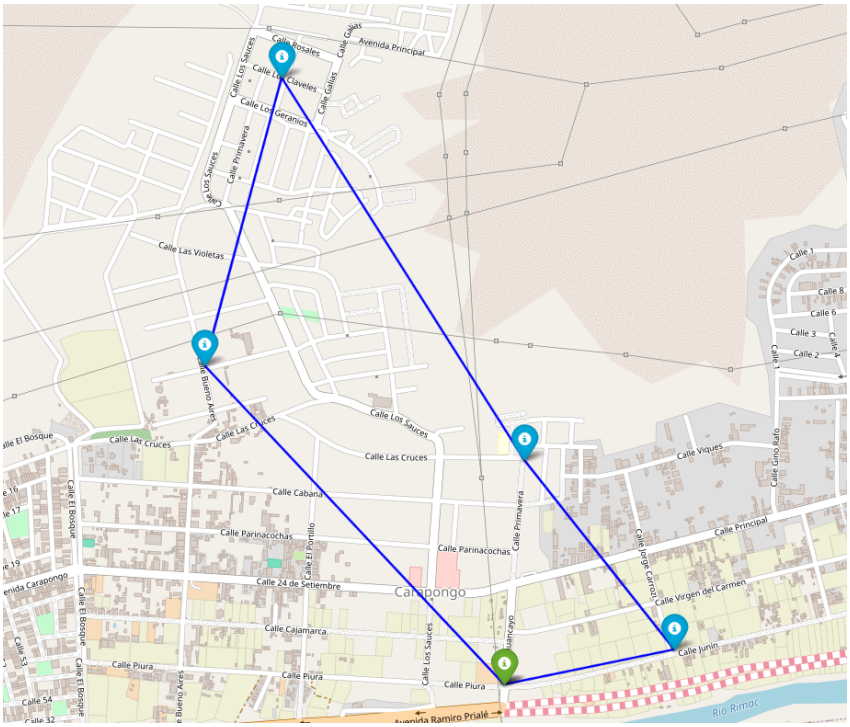
Ruta generada 07 - Vehículo_03

	Tramo	Demanda (kg)	Distancia (km)
1	Centro de Acopio → Usuario 37	6	5.386
2	Usuario 37 → Usuario 25	18	1.668
3	Usuario 25 → Usuario 27	4	0.563
4	Usuario 27 → Usuario 39	9	1.424
5	Usuario 39 → Usuario 40	12	0.309
6	Usuario 40 → Centro de Acopio	0	6.133
	Total	49	15.483

En la **Ruta 07** se recolectaron 49 kg de residuos reciclables en un recorrido de 15.4 km con un tiempo de recorrido de 1 hora y 43 minutos con el vehículo 03. Esta es la ruta más larga tanto en distancia como en tiempo, cubriendo lugares más alejados.

Figura 30

Mapa de Ruta Generado 07



Ruta Generada Nro 8

Esta ruta generada es asignada al Vehículo 3, que comienza en el centro de acopio y sigue un recorrido que incluye a seis usuarios: Usuario 30, Usuario 38, Usuario 34, Usuario 33, Usuario 36 y Usuario 35, antes de regresar al centro de acopio (Ver tabla 30).

Tabla 30

Ruta generada 08 - Vehículo_04

	Tramo	Demanda (kg)	Distancia (km)
1	Centro de Acopio → Usuario 30	6	1.863
2	Usuario 30 → Usuario 38	10	4.360
3	Usuario 38 → Usuario 34	7	1.580
4	Usuario 34 → Usuario 33	6	1.068
5	Usuario 33 → Usuario 36	8	0.058
6	Usuario 36 → Usuario 35	11	0.769
7	Usuario 35 → Centro de Acopio	0	4.174
	Total	48	13.872

En la **Ruta 08** se recolectaron 48 kg de residuos reciclables con el vehículo 04 a lo largo de 13.8 km en 1 hora y 49 minutos. Esta ruta es extensa y asegura una recolección de residuos significativa durante un período de tiempo prolongado.

Figura 31

Mapa de Ruta Generado 08



6.3 Análisis de Resultados

Para el análisis de resultados, consideraremos la tabla 31, esta tabla es el resumen de la distancia y tiempo generados por el modelo CVRP.

Tabla 31

Resumen del total de rutas generadas

Ruta	Vehículo	Cant. Residuos(kg)	Dist. Recorrido(km)	Tiempo recolección(h)
Ruta 01	Vehículo_01	50	5.698	1:30
Ruta 02	Vehículo_02	29	1.792	0:45
Ruta 03	Vehículo_03	48	7.436	1:33
Ruta 04	Vehículo_04	50	6.473	1:32
Ruta 05	Vehículo_01	49	8.672	1:27
Ruta 06	Vehículo_02	38	5.624	1:09
Ruta 07	Vehículo_03	49	15.483	1:43
Ruta 08	Vehículo_04	48	13.872	1:49

OE1: Disminuir el tiempo promedio de recolección de residuos reciclables con la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash, en la ARCPL.

El uso del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash mejoró significativamente las rutas de recolección de residuos reciclables. El tiempo promedio de recolección antes de la implementación era de 7 horas. El tiempo se redujo a 2 horas 41 minutos, después de utilizar el modelo. Para calcular la reducción porcentual, se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Reducción}\,(\%) = \left(\frac{\text{Tiempo Antes} - \text{Tiempo Después}}{\text{Tiempo Antes}}\right) \times 100$$

Aplicando la fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Reducción}\,(\%) &= \left(\frac{420min - 121min}{420min}\right) \times 100\,\% \\ \text{Reducción}\,(\%) &= 71{,}43\,\% \end{aligned}$$

Con una disminución del 71.4 %, este resultado demuestra que el modelo CVRP ha mejorado significativamente la eficiencia de recolección al optimizar las rutas de recolección.

OE2: Aumentar la cantidad promedio de recolección de residuos reciclables con la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash, en la ARCPL.

Se produjo una notable mejora en la cantidad de residuos reciclables recolectados. La cantidad de residuos reciclables recolectados por día era de 200 kg. La cantidad de recolección diaria aumentó a 361 kg después de implementar el modelo CVRP a través del sistema ReporTrash y registrar los datos de los usuarios. Para calcular el incremento porcentual, se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Aumento}\,(\%) = \left(\frac{\text{Cantidad Antes} - \text{Cantidad Después}}{\text{Cantidad Antes}}\right) \times 100$$

Aplicando la fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Aumento}\,(\%) &= \left(\frac{200kg - 121kg}{420kg}\right) \times 100\,\% \\ \text{Aumento}\,(\%) &= 80{,}5\,\% \end{aligned}$$

Este aumento del 80.5 % en la cantidad de residuos reciclables recolectados indica que el sistema ReporTrash ha sido exitoso en incrementar la eficiencia de la recolección de residuos reciclables.

OE3: Mostrar de forma gráfica las rutas óptimas obtenidas con la implementación de modelo CVRP a través del sistema ReporTrash.

Los mapas detallados que muestran las rutas de recolección más eficientes desde los centros de acopio hasta los hogares con residuos reciclables muestran las rutas ideales obtenidas

con la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash. Estas rutas podemos verlos en las figuras (fig 24, fig 25, fig 26, fig 27, fig 28, fig 29, fig 30, fig 31). Cada ruta está representada por una línea que conecta los puntos de recolección y los centros de acopio, facilitando la visualización de la optimización en términos de distancia y eficiencia operativa. Estas representaciones gráficas permiten evaluar de manera visual y comprensible cómo el modelo CVRP ha mejorado la planificación de las rutas de recolección de residuos reciclables. En la figura 32, se muestran todas las rutas generadas en un mismo mapa.

Figura 32

Mapa de rutas generadas



Capítulo 7

CONCLUSIONES

Se concluye que la implementación del modelo CVRP a través del sistema ReporTrash ha demostrado ser una herramienta efectiva para optimizar las rutas de recolección de residuos reciclables en la ARCPL. La capacidad del sistema para generar rutas óptimas ha permitido una mejora significativa en la eficiencia del proceso de recolección.

Uno de los principales logros de esta implementación del modelo CVRP es la reducción del tiempo promedio de recolección de residuos reciclables. Esta mejora en los tiempos ha permitido a la ARCPL operar de manera más rápida y eficiente. Además, esta implementación aumentó significativamente la cantidad promedio de recoleccion de residuos reciclables recogidos. Esta mejora se debe a una planificación de rutas más eficiente que optimiza los tiempos de viaje y la cobertura de las áreas de recolección.

La representación gráfica de las rutas óptimas generadas por ReporTrash ofrece a la ARCPL una visión clara y detallada del recorrido. Esta visualización no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también facilita la planificación y ejecución de las actividades de recolección.

Capítulo 8

RECOMENDACIONES

Se sugiere contemplar la implementación de sensores o dispositivos IoT (Internet de las cosas) en los vehículos de la ARCPL para una gestión más inteligente de las rutas de recolección porque los datos en tiempo real sobre el nivel de llenado permitirán adaptar dinámicamente las rutas, permitiendo así la reducción de viajes innecesarios y mejora en la eficiencia del servicio.

Para posteriores investigaciones, se recomienda implementar al modelo CVRP la funcionalidad de analizar el tráfico en tiempo real. Permitiendo así optimizar la distancia recorrida y el tiempo de viaje al ajustar las rutas de recolección en función de las condiciones cambiantes del tránsito.

Sería beneficioso considerar en incorporar programas de capacitación sobre el funcionamiento del sistema a los operadores de sistemas ReporTrash. Al evaluar el impacto de la capacitación en el uso de este sistma, se podra encontrar oportunidades para maximizar el potencial del sistema y garantizar una gestión de operaciones más eficiente.

Es apropiado realizar una planificación del personal que permita una distribución correcta de conductores y recolectores en función de las necesidades diarias de recolección. Al asignar recursos humanos de manera más estratégica, se podrían reducir tiempos y mejorar la productividad de los equipos de recolección.

A los futuros investigadores queda abierta la oportunidade para realizar mejoras en la investigación, dado que existen múltiples líneas de indagación aún por explorar y el trabajo puede continuar. A lo largo del desarrollo de este documento, han emergido diversas direcciones futuras que permanecen abiertas y se espera que sean abordadas.

BIBLIOGRAFÍA

Añazco Llaja, R. D., & Sanchez Campos, A. E. (2021). Aplicación web--Móvil aplicando la metodología SCRUM para mejorar la recolección de material reciclable en la asociación de reciclaje unidos por un ambiente limpio y ordenado de Trujillo.

Banco Mundial. (2018). *What a Waste: An Updated Look into the Future of Solid Waste Management*. https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management

Barrero, A. C., de García, G. W., & Parra, R. M. M. (2010). *Introducción a la Teoría de Grafos*. Elizcom sas. https://books.google.com.pe/books?id=3hH11r7j1tcC

Borcinova, Z. (2017). Two models of the capacitated vehicle routing problem. *Croatian Operational Research Review*, *8*, 463-469. https://doi.org/10.17535/crorr.2017.0029

Bravo Andía, A. A., Durand Miranda, J. E., Lozano Gonzales, D. R., & Velluttini Vinces, R. R. (s.f.). Modelo prolab: Ayni, aplicativo móvil que conecta a las familias y recicladores para la gestión de residuos sólidos reaprovechables.

Chen, A.-l., Yang, G.-k., & Wu, Z.-m. (2006). Hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for capacitated vehicle routing problem. *Journal of Zhejiang University-Science A*, *7*(4), 607-614.

Cristóbal García, J., Vázquez-Rowe, I., Margallo Blanco, M., Ita-Nagy, D., Ziegler-Rodriguez, K., Laso Cortabitarte, J., Ruiz Salmón, I., Kahhat Abedrabbo, R. F., Aldaco García, R., et al. (2022). Climate change mitigation potential of transitioning from open dumpsters in Peru: evaluation of mitigation strategies in critical dumpsites. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722043935

DIGESA. (2004). *Marco Institucional de los Residuos Solidos en el Perú.* Ministerio de Salud del Perú. https://bvs.minsa.gob.pe/local/dgsp/000_RES.SOLID.pdf

Flores Vizarreta, C. (2018). Gestión familiar de residuos sólidos y su implicancia en la generación de ingresos económicos de recicladores del distrito de Paucarpata, 2018. https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/0dce2f36-0c4c-4aa0-acab-bf32fca946b3/content

Gonzaga Huertas, C. A., & Ydrogo Ramirez, E. (2020). Propuesta de un aplicativo móvil para el reciclaje de plástico, basado en la metodología ágil de software-scrum, en el distrito de San Borja, de la ciudad de Lima, Perú.

Huarcaya Chocce, E., Noriega Riofrio, V. J., Sifuentes Menacho, E. A., Suárez Aponte, V., & Tirado Laiza, M. K. (s.f.). Propuesta de negocio sostenible de reciclaje integrando recicladores y hogares mediante la aplicación EcoVave.

Jimenez Alfaro, R., & Villoslada Tafur, C. A. (2021). Impacto del aplicativo móvil TrashTec en el reciclaje tecnológico en el distrito de Cajamarca.

Kolibri. (2022). *Menos del 6% de los residuos en Latinoamérica se recicla. ¿Cómo podemos mejorar esta situación?* https://www.linkedin.com/pulse/menos-del-6-de-los-residuos-en-latinoam%C3%A9rica-se-recicla-c%C3%B3mo-

Muñoz Santiana, C. H. (2021). *Optimización de rutas para la recolección de residuos sólidos del cantón Latacunga* [B.S. thesis]. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas . . .

Naciones Unidas. (2024). Día Internacional de Cero Residuos. https://www.un.org/es/observances/zero-waste-day

Norman, D. A. (2013). The Design of Everyday Things. *Journal of Design and Technology*, *5*, 25-40.

OEFA. (2016). *Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial: informe 2014-2015. Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional*.

Oldenhage, F. (2016). *Propuesta de un programa de gestión para mejorar el manejo de los residuos sólidos en el distrito de San Juan de Miraflores con respecto al ambiente, el servicio de recojo y el comportamiento de la población* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/5049

Raggio Monte, R. A., et al. (2021). Un modelo y método metaheurístico, considerando elementos estocásticos para la recolección de residuos electrónicos en ciudades.

Sampieri, R., Collado, C., & Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education. https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf

Sanmartín Ramón, G. S., Zhigue Luna, R. A., & Alaña Castillo, T. P. (2017). El reciclaje: un nicho de innovación y emprendimiento con enfoque ambientalista. *Revista Universidad y Sociedad*, *9*(1), 36-40.

SIGERSOL. (2024). *Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos Municipales (SIGERSOL)*. https://sistemas.minam.gob.pe/SigersolMunicipal/#/accesoLibre/generacion

Sintac. (2023). *¿Cuáles son los países que más reciclan en el mundo?* https://sintac.es/cuales-son-los-paises-que-mas-reciclan-en-el-mundo/

Solari Carbajal, G. J. (2019). *Solución del problema del agente viajero asimétrico bajo el enfoque del problema de asignación* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. https://hdl.handle.net/20.500.12672/14409

Stockdale, M. L. (2011). *El problema del agente viajero: un algoritmo heurístico y una aplicación* [Tesis de grado]. Universidad de Buenos Aires. https://goo.gl/bBBZTa

Téllez, E. G. E., Rodríguez, O. S., & Bernal, J. O. (2017). Problema del agente viajero. *Ingeciencia*, *1*(2), 57-65. https://editorial.ucentral.edu.co/ojs_uc/index.php/Ingeciencia/article/view/310

Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Society for industrial; applied mathematics. https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9781611973594

USAID. (2023). *Ficha de resumen del programa de Conservación de la Biodiversidad y el Clima de USAID en Perú*. https://www.usaid.gov/sites/default/files/2023-08/USAID_CCBO_Peru_FS_ESP_jun2023.pdf

Villalobos, A. (2010). *Grafos - software para la construcción, edición y análisis de grafos*. Bubok Publishing. https://books.google.com.pe/books?id=vBdHAgAAQBAJ

West, D. B. (2001). *Introduction to Graph Theory* (2.ª ed.). Pearson Education, Inc.

Yale University. (2022). *Environmental Performance Index*. https://epi.yale.edu/epi-results/2022/component/rec

Yuliza, E., & Puspita, F. (2019). The Branch and Cut Method for Solving Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) Model of LPG Gas Distribution Routes. *Science and Technology Indonesia*, *4*, 105. https://doi.org/10.26554/sti.2019.4.4.105-108