

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“GESTIÓN DE RECORRIDOS EN VEHÍCULOS DE
TRANSPORTE PÚBLICO EN LIMA MEDIANTE SISTEMAS
EMBEBIDOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

LUIS ALBERTO CURASI QUISPE

ID: 0000-0002-1843-673X

ASESOR:

MSc. EDWARD SANTA MARÍA DÁVILA

ID: 0000-0001-6789-4983

LIMA- PERÚ

2025

©2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir de la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos”**

Curasi Quispe, Luis Alberto

lcurasiq@uni.pe

958247474

Dedicatoria:

A Dios, por haberme permitido llegar a este punto y darme las fuerzas
necesarias para poder realizar mis metas.

A mi padre Víctor, parte importante en mi vida, por su gran apoyo y motivación
en todas las etapas de mi vida y más aún en los difíciles.

A mi madre Valentina, mi gran motivación de poder alcanzar mis objetivos, por
su gran amor y apoyo en mi vida.

De igual forma a mis hermanos Víctor Hugo, Leidy y mi sobrina Franchesca.
Cada uno por su apoyo y motivación.

A mi asesor Msc. Ing. Edward Santa María – Dávila, por su guía, paciencia y
apoyo incondicional.

Finalmente, a todas aquellas personas que dieron su tiempo, apoyo y consejos
para alcanzar esta ansiada meta.

Agradecimientos

Al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería por la subvención económica, que sin el apoyo no pudiera realizar el Trabajo de Investigación de tesis.

A mi asesor el Msc. Ing. Edward Santa María Dávila por su gran apoyo, motivación y un gran ser humano; por hacer realidad el desarrollo del presente trabajo de investigación de tesis.

Al Ingeniero Javier Cornejo Tejada, por su apoyo y valioso aporte. Además de sus comentarios y paciencia al enseñar.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, mi alma mater que me formo profesionalmente gracias a los grandes docentes, actividades y demás.

A las asociaciones estudiantiles GADEST UNI y PROYECTA UNI, las cuales me ayudaron a mi desenvolvimiento y enriquecieron mis conocimientos en Ingeniería Civil.

¡Muchas gracias!

Resumen

La gestión de recorridos en vehículos de transporte público es un proceso mediante el cual se organizan, planifican, controlan y optimizan las rutas de transporte para maximizar el uso de los recursos mejorando la eficiencia y todo lo que conlleva como resultado. En los últimos años se da uso de dispositivos GPS con aplicación de nuevas tecnologías, estos proporcionan información sistematizada y cuantificada de datos que caracterizan los recorridos, sin embargo, no se tiene un modelamiento para una gestión basado en la mejora de la eficiencia energética.

La propuesta de gestión desarrollado en la presente tesis permite ver desde el inicio hasta el final la vida y procesos para la obtención de una mejora en la eficiencia energética basado en el modelo de Stackelberg y usando optimización de rutas bajo el algoritmo de Dijkstra. La primera parte consiste en la recopilación, limpieza y estructuración de datos proporcionados por el dispositivo Arduino ensamblado. La segunda parte consiste en el análisis de los datos a través del análisis estadístico y relaciones entre las variables de velocidad y consumo energético. Por último, se desarrolla la gestión de recorridos a través del modelo de Stackelberg analizando la eficiencia energética optando por la ruta de menor consumo por medio del algoritmo de Dijkstra. El modelo de Stackelberg sigue la premisa de un sistema centralizado donde el decisor central tiene el poder de decidir la ruta adecuada y los usuarios responden ajustando su comportamiento y tomando sus propias estrategias, logrando una solución óptima para el sistema.

En conclusión, la propuesta de gestión de recorridos en vehículos de transporte público basado en el modelo de Stackelberg desarrolla una solución viable económicamente y factible por su sencillez, ya que permite mejorar la eficiencia energética en el caso de las rutas estudiadas en 11 %, 4 % y 4 %.

Palabras clave: Gestión, recorridos, transporte, eficiencia, energética.

Abstract

Route management for public transport vehicles is a process through which transportation routes are organized, planned, controlled, and optimized to maximize resource use, improving efficiency and all the resulting benefits. In recent years, GPS devices have been used with the application of new technologies. These provide systematized and quantified information that characterizes routes. However, there is no model for management based on improving energy efficiency.

The management proposal developed in this thesis allows us to view, from beginning to end, the life cycle and processes for achieving improved energy efficiency based on the Stackelberg model and using route optimization under the Dijkstra algorithm. The first part consists of collecting, cleaning, and structuring data provided by the assembled Arduino device. The second part consists of analyzing the data through statistical analysis and relationships between the speed and energy consumption variables. Finally, route management is developed through the Stackelberg model, analyzing energy efficiency by opting for the lowest-consumption route using the Dijkstra algorithm. The Stackelberg model follows the premise of a centralized system where the central decision-maker has the power to decide the appropriate route, and users respond by adjusting their behavior and adopting their own strategies, achieving an optimal solution for the system.

In conclusion, the proposed route management for public transport vehicles based on the Stackelberg model develops an economically viable and simple solution, allowing for energy efficiency improvements of 11 %, 4 %, and 4 % for the routes studied.

Keywords: Management, routes, transport, efficiency, energy.

Índice

Resumen	IV
Abstract	V
Prólogo	XVII
Capítulo I: Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Antecedentes de la investigación	1
1.2 Alcance y límite de la investigación	5
1.3 Problemática	6
1.3.1 Problemas secundarios	9
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo General.....	9
1.4.2 Objetivos Específicos:.....	9
1.5 Formulación de la hipótesis	9
1.5.1 Hipótesis General.....	9
1.5.2 Hipótesis Específicos:	9
2 Capítulo II: Marco teórico y conceptual	11
2.1 Eficiencia energética y movilidad	11
2.1.1 Consumo Energético	11
2.1.2 Eficiencia Energética	13
2.1.3 Movilidad	13
2.1.4 Energía consumida en vehículos	15
2.2 Arduino	16
2.2.1 Componentes.....	16
2.3 Sistema de posicionamiento global “gps”	17
2.3.1 Funcionamiento	18
2.4 Sistema de información geográfica	19
2.4.1 Aplicaciones	19
2.5 Coordenadas geodésicas	20
2.6 Transporte público	20

2.6.1	Transporte Sostenible	21
2.6.2	Objetivos para un Sistema de Transporte Sostenible	21
2.7	Planeamiento urbano vial y planes de desvío	21
2.7.1	Definición planeamiento Urbano Vial	21
2.7.2	Definición de Planes de desvío	22
2.7.3	Elementos para la Planificación de Desvíos	22
2.7.4	Flota de Vehículos	23
2.8	Gestión de recorridos	24
2.8.1	Definición.....	24
2.8.2	Autoridad de transporte urbano para Lima y Callao (ATU)	24
2.9	Velocidad media, instantánea	25
2.9.1	Definición de Velocidad Media	25
2.9.2	Definición de Velocidad Instantánea	25
2.9.	Congestión vehicular	25
2.9.1.	Causa de la congestión vehicular.....	27
2.9.2.	Congestión vehicular y contaminación ambiental en Lima Metropolitana	27
2.10.	Contaminación ambiental	29
2.10.1.	Contaminación atmosférica en Lima	29
2.11.	Outliers e inliers	30
2.11.1.	Outliers	30
2.11.2.	Inliers	30
2.12.	Seudocódigo.....	31
2.13.	Algoritmo de Dijkstra.....	31
2.13.1.	Usos del Algoritmo de Dijkstra	32
2.13.2.	Algoritmo de Dijkstra en investigaciones de consumo Energético eficiente	32
3	Capítulo III: Análisis Metodológico.....	35
3.1	Estudio de la investigación	36
3.1.1	Enfoque y nivel de la investigación	36
3.1.2	Diseño del estudio	36
3.1.3	Población y muestra.....	36
3.2	Proceso metodológico general de la investigación	37
3.2.1	Recolección de datos.	37

3.2.2	Análisis de datos	38
3.2.3	Propuesta de gestión de recorridos.....	39
3.3	Limitaciones del estudio	39
4	Capítulo IV: Recolección y procesamiento de datos	40
4.1	Dispositivo Arduino	40
4.1.1	Características del dispositivo Arduino GPS	40
4.1.2	Costo del ensamble dispositivo Arduino GPS	41
4.2	Características de los vehículos	42
4.2.1	Tipo de vehículo instalado	42
4.2.2	Características de los vehículos instalados	44
4.2.3	Instalación de dispositivos Arduino GPS.....	46
4.3	Datos registrados por el GPS	46
4.3.1	Definición de datos	46
4.3.2	Recolección de datos	47
4.3.3	Preprocesamiento de datos	51
4.4	Limpieza de datos.....	52
4.4.1	Limpieza de Outliers.....	53
4.4.2	Limpieza de Inliers	54
4.5	Procesamiento de datos	54
4.5.1	Definición de parámetros.....	54
4.5.2	Estructuración de los datos	56
5	Capítulo V: Análisis y diagnóstico de resultados	60
5.1	Relación de velocidad y consumo energético.....	60
5.1.1	Normalidad de Velocidades	60
5.1.2	Relación velocidad – energía	62
5.2	Análisis de parámetros	71
5.2.1	Análisis de velocidades	71
5.2.2	Análisis de aceleraciones y consumo energético	77
5.2.3	Análisis del consumo energético	78
5.3	Mapa de velocidades	79
5.3.1	Ruta Jicamarca - Chorrillos	79
5.3.2	Ruta 404 del corredor morado	81

5.3.3	Ruta 412 del corredor morado	82
5.4	Consumo energético total	85
6	Capítulo VI: Propuesta de gestión de recorridos	91
6.1	Organización	92
6.1.1	Roles y responsabilidades	92
6.1.2	Infraestructura Tecnológica	93
6.2	Planificación de rutas.....	94
6.2.1	Modelo de recorrido eficiente.....	94
6.2.2	Recorridos eficientes a través del Algoritmo de Dijkstra	95
6.3	Control del sistema de recorridos.....	101
6.3.1	Monitoreo de la ruta.....	101
6.3.2	KPI de la eficiencia energética	102
6.4	Toma de decisiones	103
6.5	Coordinación	104
6.5.1	Coordinación entre operadores, conductores y usuarios	104
6.5.2	Participación ciudadana	105
	Conclusiones	106
	Recomendaciones	108
	Referencias bibliográficas	109
	Anexos	117
	Anexo A: Paraderos de las rutas	117
	Anexo B: Recolección de datos de posición	122
	Anexo C: Ocupación vehicular	125
	Anexo D: Códigos en Python de normalización de velocidades y regresión lineal ponderada	129
	Anexo E: Códigos en Python de análisis de datos	134
	Anexo F: Códigos en Python del modelo de velocidad de recorrido	144
	Anexo G: Códigos en Python del algoritmo de Dijkstra	148
	Anexo H: Tablas de consumo energético	153

Lista de Tablas

Tabla N° 1. Población y muestra de la investigación.....	36
Tabla N° 2. Costo del prototipo	42
Tabla N° 3. Coeficientes aerodinámicos para los buses de transporte público	45
Tabla N° 4. Área de buses de investigación.....	45
Tabla N° 5. Resultados GPS de los buses.....	47
Tabla N° 6. Recorrido de la Ruta Jicamarca – Chorrillos	48
Tabla N° 7. Recorrido de la ruta 404 del corredor morado	49
Tabla N° 8. Recorrido de la ruta 412 del corredor morado	50
Tabla N° 9. Cantidad de rutas según el bus.....	51
Tabla N° 10. Coeficiente de fricción y densidad del aire	55
Tabla N° 11. Ruta Jicamarca - Chorrillos	56
Tabla N° 12. Ruta 404 del corredor morado.....	57
Tabla N° 13. Ruta 412 del corredor morado.....	58
Tabla N° 14. Valores de ocupación vehicular de la ruta 404 del corredor morado	58
Tabla N° 15. Data estructurada final	59
Tabla N° 16. Energía promedio consumido por ruta en MJ.....	62
Tabla N° 17. Conversión de Kwh a litro del petróleo pesado	63
Tabla N° 18. Litros por un recorrido en cada ruta estudiada con los datos obtenidos de los buses	63
Tabla N° 19. Litros por un recorrido de las rutas estudiadas según consumo de petróleo	63
Tabla N° 20. Eficiencia del motor acorde a los datos obtenidos de los buses vs consumo de petróleo.....	63
Tabla N° 21. Calidez de ajuste del modelo de la ruta Jicamarca - Chorrillos.....	65
Tabla N° 22. Validez del modelo de la ruta 404 del corredor morado.....	69
Tabla N° 23. Validez del modelo de la ruta 412 del corredor morado.....	70
Tabla N° 24. Comparación de los modelos empleados en las 3 rutas estudiadas	71
Tabla N° 25. Velocidades por tramo en la ruta Jicamarca - Chorrillos.....	79
Tabla N° 26. Velocidades de la ruta 404 del corredor morado	81
Tabla N° 27. Velocidad de la ruta 412 del corredor morado.....	83

Tabla N° 28. Unidades funcionales del recorrido de la ruta Jicamarca - Chorrillos del corredor morado - Parte 1	85
Tabla N° 29. Unidades funcionales del recorrido de la ruta Jicamarca - Chorrillos del corredor morado - Parte 2	85
Tabla N° 30. Unidades funcionales del recorrido de la ruta 404 del corredor morado – Parte 1	86
Tabla N° 31. Unidades funcionales del recorrido de la ruta 404 del corredor morado – Parte 2	87
Tabla N° 32. Unidades funcionales del recorrido de la ruta 412 del corredor morado – Parte 1	88
Tabla N° 33. Unidades funcionales del recorrido de la ruta 412 del corredor morado – Parte 2	88
Tabla N° 34. Resumen de E/pasajejo-km	89
Tabla N° 35. Resultado de IPK de las 3 rutas estudiadas	89
Tabla N° 36. Resumen de consumo energético total de los recorridos en las rutas estudiadas	89
Tabla N° 37. Distancia y consumo energético de la alternativa propuesta con el algoritmo de Dijkstra	96
Tabla N° 38. Distancia y consumo energético.....	97
Tabla N° 39. Unidades funcionales propuesto de la ruta Jicamarca – Chorrillos – Parte 1	98
Tabla N° 40. Unidades funcionales propuesto de la ruta Jicamarca – Chorrillos – Parte 2	98
Tabla N° 41. Distancia y consumo energético de la alternativa a la ruta 404 del corredor morado	99
Tabla N° 42. Unidades funcionales de la ruta 404 del corredor morado – Parte 1	100
Tabla N° 43. Unidades funcionales de la ruta 404 del corredor morado – Parte 2	100
Tabla N° 44. Distancia y consumo energético alternativa de la ruta 412 del corredor morado	101
Tabla N° 45. Unidades funcionales de la ruta 412 del corredor morado – Parte 1	101
Tabla N° 46. Unidades funcionales de la ruta 412 del corredor morado – Parte 2	101

Tabla N° 47 Eficiencia energética de las rutas estudiadas.....	102
Tabla N° 48. Resultados IPK propuesto de las 3 rutas estudiadas	102
Tabla N° 49. Comparación de IPK de Datos vs Propuesto	103
Tabla N° 50. Resultados de E/Pasajero-km de las 3 rutas estudiadas.....	103
Tabla N° 51 Comparación de E/pasajero-km Datos vs Propuesta	103
Tabla N° 52. Eficiencia respecto al KPI (E/pasajero – km).....	103
Tabla N° 53. Paraderos de la ruta Jicamarca - Chorrillos.....	117
Tabla N° 54. Paraderos de la ruta 404 del corredor morado	119
Tabla N° 55. Paraderos de la ruta 412 del corredor morado	121
Tabla N° 56. Datos del bus de placa ANJ-760, ruta Jicamarca - Chorrillos	122
Tabla N° 57. Datos del bus de placa F5X-713, ruta Jicamarca - Chorrillos	123
Tabla N° 58. Datos del bus de placa AUZ-900, ruta 412 del corredor morado	123
Tabla N° 59. Datos del bus de placa AUY-879, ruta 404 del corredor morado	123
Tabla N° 60. Datos del bus de placa AUY-879, ruta 412 del corredor morado	124
Tabla N° 61. Cantidad de usuarios en la ruta Jicamarca - Chorrillos.....	125
Tabla N° 62. Ocupación vehicular por ruta 404.....	126
Tabla N° 63. Ocupación vehicular por ruta 412.....	128
Tabla N° 64. Consumo energético por recorrido de la ruta Jicamarca – Chorrillos	153
Tabla N° 65. Consumo energético por recorrido de la ruta 404 del corredor morado	156
Tabla N° 66. Consumo energético por recorrido de la ruta 412 del corredor morado	158

Lista de Figuras

Figura N° 1 Información recolectada por el GPS y gráfica de velocidades obtenidas para diferentes horas del día.....	2
Figura N° 2. Distribución de trayectorias según el perfil del conductor.....	3
Figura N° 3. Distribución del tiempo de viaje en hora punta y fuera de esta.....	4
Figura N° 4. Gráfica de barras de los principales problemas en Lima Metropolitana y Callao.	6
Figura N° 5. Modos de Viaje en Lima Metropolitana y Callao.	7
Figura N° 6. Calificación del servicio de transporte.....	8
Figura N° 7. Efecto de la velocidad sobre el consumo de combustible en automóviles	13
Figura N° 8. Formas de Movilidad de Personas, Material e información	14
Figura N° 9. Hardware de un Arduino (Placa).....	17
Figura N° 10. Placa GPS Arduino	18
Figura N° 11. Cálculo de la posición usando tres satélites.....	19
Figura N° 12: Sistema de Coordenadas Geodésicas	20
Figura N° 13. Variación de los modos de transporte	23
Figura N° 14. relación parabólica de concentración y capacidad vehicular	26
Figura N° 15. relación Velocidad Flujo Libre versus concentración de embotellamiento	27
Figura N° 16. Distribución de respuestas a los consultores especialistas en Transporte.....	28
Figura N° 17. Diagrama de Pareto, causas de congestión vehicular en Lima Metropolitana de acuerdo a los especialistas en Transporte.....	29
Figura N° 18. Niveles de PM 2.5 en una estación de monitoreo en el distrito de Surco, Lima – Perú (Fuente: Hernández-Vásquez y Diaz- Seijas, 2017)	30
Figura N° 19. Ejemplo de identificación de outliers (valores atípicos lejanos) e inliers.....	31
Figura N° 20. Ejemplo del uso del algoritmo de Dijkstra.....	32
Figura N° 21. Aplicación del algoritmo de Dijkstra modificado de rutas en la ciudad de Okayama en Japón	33
Figura N° 22. Procesamiento del mapa usando el OCW-Dijkstra de la ciudad de Changchun en China	34
Figura N° 23. Comparación de gestión de vehículos.	35

Figura N° 24. Proceso metodológico.....	37
Figura N° 25. Proceso Metodológico de toma de datos de posicionamiento.....	38
Figura N° 26. Proceso de limpieza de data	38
Figura N° 27. Proceso metodológico de análisis de resultados.....	39
Figura N° 28. Proceso metodológico de la propuesta de gestión de recorridos	39
Figura N° 29 Equipo GPS Arduino desarrollado	40
Figura N° 30. Equipo final GPS a instalar en los vehículos	41
Figura N° 31. Equipo final GPS a instalar en los vehículos	41
Figura N° 32. Clasificación de buses de Transporte Público	43
Figura N° 33. Autobuses usados para la investigación	43
Figura N° 34. Coeficiente aerodinámico en buses	45
Figura N° 35. Instalación de equipo GPS.....	46
Figura N° 36. Recorrido del bus ETL4 S.A.- San Juan de Lurigancho a Chorrillos	48
Figura N° 37. Paraderos de la ruta 404 del Corredor Morado.	49
Figura N° 38. Recorrido de la ruta 412 del corredor morado.....	50
Figura N° 39. Preprocesamiento de datos	52
Figura N° 40. Limpieza Manual de Outliers Cercanos.....	53
Figura N° 41. Limpieza de inliers con Qgis	54
Figura N° 42. Obtención de Variables.....	56
Figura N° 43. Normalidad de datos en las 3 rutas de estudio	62
Figura N° 44. Modelo de regresión cúbica de ruta Jicamarca – Chorrillos	64
Figura N° 45. Probabilidad del Residuo de datos de la ruta Jicamarca - Chorrillos	66
Figura N° 46. Aleatoriedad de residuos de la ruta Jicamarca - Chorrillos.....	67
Figura N° 47. Homocedasticidad de datos de la ruta Jicamarca - Chorrillos	68
Figura N° 48. Resultados de regresión cúbica de la ruta 404 del corredor morado	69
Figura N° 49. Resumen regresión cubica de la ruta 412 del corredor morado	70
Figura N° 50. Distribución KPH de la ruta Jicamarca - Chorrillos	72
Figura N° 51. Distribución KPH de la ruta Jicamarca – Chorrillos en promedio de 10min de la ruta Jicamarca – Chorrillos.	72
Figura N° 52. Distribución KPH de la ruta 404 del corredor morado	73

Figura N° 53. Distribución KPH de la ruta 404 del corredor morado en promedio de 10min de la ruta Jicamarca – Chorrillos.	73
Figura N° 54. Distribución KPH de la ruta 412 del corredor morado	74
Figura N° 55. Distribución de velocidad de la ruta Jicamarca - Chorrillos	75
Figura N° 56. Distribución de velocidad de la ruta 404 del corredor morado	76
Figura N° 57. Distribución de velocidad de la ruta 412 del corredor morado	76
Figura N° 58. Relación entre la aceleración y el consumo energético.....	77
Figura N° 59. Comparación entre las energías de consumo energético.....	78
Figura N° 60. Mapa de velocidades en la ruta Jicamarca – Chorrillos	80
Figura N° 61. Mapa de velocidad de la ruta 404 del corredor morado.....	82
Figura N° 62. Mapa de velocidades de la Ruta 412 del corredor morado	84
Figura N° 63. Tendencia de consumo energético por recorrido de la ruta Jicamarca - Chorrillos	86
Figura N° 64. Tendencia de consumo energético por recorrido de la ruta 404 del corredor morado	87
Figura N° 65. Tendencia de consumo energético por recorrido de la ruta 412 del corredor morado	88
Figura N° 66. Flujo de proceso de propuesta de gestión de recorridos en buses de transporte público.....	91
Figura N° 67. Roles en el modelo de Stackelberg.....	93
Figura N° 68. Modelo de recorrido ideal del bus de transporte público	94
Figura N° 69. Modelo de recorrido del bus de transporte público en la ruta óptima	95
Figura N° 70. Alternativa óptima a la ruta Jicamarca – Chorrillos.....	96
Figura N° 71. Ruta optima propuesta por el algoritmo de Dijkstra en el recorrido de Jicamarca – Chorrillos	97
Figura N° 72. Ruta optima propuesta por el algoritmo de Dijkstra en el recorrido de la ruta 404 del corredor morado.....	98
Figura N° 73. Recorrido optimo desarrollado por el algoritmo Dijkstra para la ruta 404 del corredor morado.	99
Figura N° 74. Ruta optima propuesta por el algoritmo de Dijkstra en el recorrido de la ruta 412 del corredor morado.....	100

Lista de Símbolos y Siglas

GPS	:	Sistema de Posición Global
DIY	:	Hazlo tu mismo
ε	:	Eficiencia Energética
ASI	:	Evitar, cambiar y mejorar
P_a	:	Potencia aerodinámica
P_b	:	Potencia de circulación
P_f	:	Potencia de fricción
E_t	:	Energía total
SIG	:	Sistema de Información geográfica
$\varnothing$	:	Latitud geográfica
λ	:	Longitud geográfica
MTC	:	Ministerio de Transporte y Comunicaciones
ATU	:	Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao
OMS	:	Organización Mundial de la Salud
C_{rr}	:	Coeficiente de rodadura
C_d	:	Coeficiente aerodinámico
GMT	:	Hora de meridiano de Greenwich
KPI	:	Indicador clave de rendimiento
KS	:	Kolmogorov - Smirnov

Prólogo

El transporte público tiene un desafío permanente dentro del caótico y congestionado tráfico limeño. La eficiencia operacional del transporte público (buses y corredores de buses) impacta directamente en la calidad de vida de millones de personas, así como en el consumo energético y la contaminación ambiental. Actualmente, el proceso de gestión operativa de los buses es algo meramente instintivo, en función de reglas de economía básica, pero que no tienen en cuenta aspectos de eficiencia energética ni las externalidades propias de un transporte con poca o nula administración.

Esta tesis aborda una de las aristas de este complejo problema: la gestión de recorridos de vehículos de transporte público en Lima. A través de la implementación de sistemas embebidos y la instrumentación embarcada en buses (diferentes corredores), se ha llevado a cabo un exhaustivo monitoreo y análisis de datos con el objetivo de proponer mejoras que optimicen la eficiencia energética y, por ende, reduzcan el impacto ambiental y mejoren la experiencia de los usuarios.

El trabajo que aquí se presenta es el resultado de una investigación que incluye un valioso trabajo de campo en algunos distritos de Lima. Los datos recopilados y analizados ofrecen una visión de los patrones de recorrido, el consumo de combustible y otros parámetros relevantes. Se espera que los hallazgos y las propuestas presentadas en esta tesis sean de utilidad para las autoridades, las empresas de transporte y la comunidad en general, para la mejora del sistema de transporte público, orientado a su eficiencia y sostenibilidad.

El Asesor

Capítulo I: Introducción

En Lima, el transporte público urbano, se desarrolla de forma desordenada siendo este una de las causas principales del aumento de tráfico en la ciudad, baja calidad de servicio, ineficiencia energética, contaminación atmosférica, entre otros. Trayendo consigo pérdidas económicas a los diferentes interesados como los usuarios, trabajadores y dueños de empresas de transporte.

En este capítulo se dará a conocer la problemática entorno al transporte público en Lima y su baja eficiencia energética. Los objetivos que se desarrollará para obtener una mejora en la eficiencia energética, así también analizar los estudios y resultados desarrollados en el mundo sobre la utilización del GPS Arduino para la obtención de parámetros y posterior análisis de modelos de gestión de recorridos de vehículos de transporte público.

1.1 Generalidades

La confiabilidad del servicio de transporte desde la perspectiva de los pasajeros recae en los parámetros de tiempo de viaje y tiempo de espera, desde la vista de las empresas de transporte recae en la eficiencia energética, por ello es necesario adoptar medidas acordes con la actualidad tecnológica para analizar las causas principales.

Los dispositivos GPS son una solución cercana para la toma de datos más exactos que la rudimentaria de papel y lapicero, para una correcta gestión de recorridos, además de tomar alternativas para mejorar la eficiencia energética y con ello los parámetros de velocidad, tiempo de viaje y distancia recorrida en las rutas estudiadas.

1.1.1 Antecedentes de la investigación

El transporte público urbano eficiente es hoy en día una de las formas de reducir los gases contaminantes de efecto invernadero y el consumo de energía. La eficiencia energética es un tema de importancia a nivel mundial con el objetivo de generar formas de transporte más limpio. La aplicación de nuevas tecnologías proporciona un mayor control en tiempo y dinero; por ende, una buena eficiencia energética. (Li & Li, 2019). En la actualidad el monitoreo se viene realizando de manera manual a través de llenados de encuestas y formatos en muchas

empresas informales, lo que trae consigo malos resultados en el análisis y poca precisión en los parámetros de estudio.

Con el fin de superar estas debilidades, se han venido realizando diversas experiencias en todo el mundo con el uso de sistemas de seguimiento electrónicos. Estos sistemas cuentan con, sobre todo, GPS, los cuales toman cada vez mayor importancia en temas de rastreo vehicular. En el caso de vehículos de transporte público, Montero y Ros-Roca (2020), se enfoca en el uso de GPS en áreas urbanas de densidad alta, resaltando las ventajas que tienen estos dispositivos en la obtención de información sistematizada y cuantificada, así como en la importancia de estos datos para la modelación del transporte urbano. En su investigación pudo obtener la velocidad media de los vehículos para diferentes horas del día, generando gráficos Tiempo vs Velocidad, con estos gráficos se obtiene otros, para el análisis de la eficiencia energética.

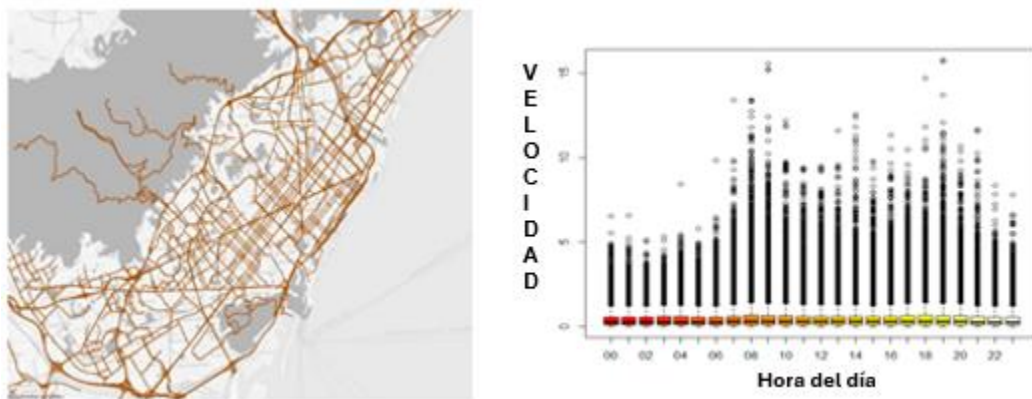


Figura N° 1 Información recolectada por el GPS y gráfica de velocidades obtenidas para diferentes horas del día.

(Fuente: Adaptado de Montero y Ros-roca, 2019)

Nasri et al. (2019), en su investigación, recopila información de trayectorias de varios vehículos por espacio de un año haciendo uso de equipos con GPS incorporado, con el fin de obtener los kilómetros recorridos, así como datos de las rutas usadas. Concluye que los equipos GPS son fuentes muy confiables de datos para la obtención de información de viajes.

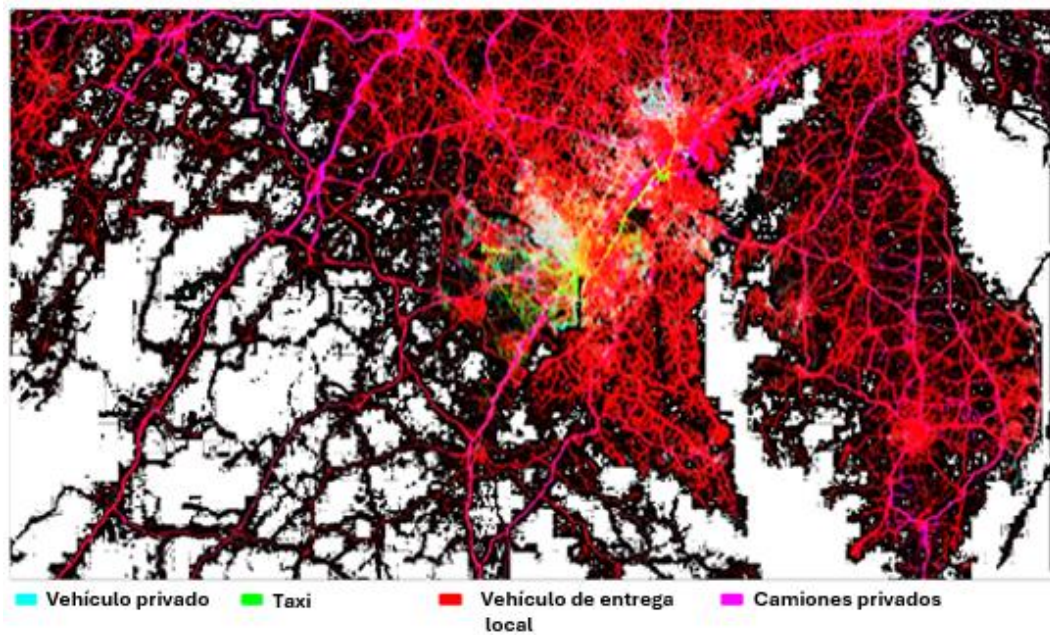


Figura N° 2. Distribución de trayectorias según el perfil del conductor.

(Fuente: Adaptado de Nasri et al., 2019)

También, Mazloumi et al. (2010), hace uso de datos de GPS para analizar la variabilidad en el tiempo de viaje de los usuarios de este modo de transporte. En su investigación pudo estudiar parámetros como el tráfico y el comportamiento del conductor del vehículo haciendo solo uso de este sistema de posicionamiento global, recomendando la mayor implementación de estos dispositivos de GPS en vehículos de transporte público. A través de los resultados recomienda analizar la confiabilidad de los datos y minimizar los costos de operación; por ende, una buena eficiencia energética.

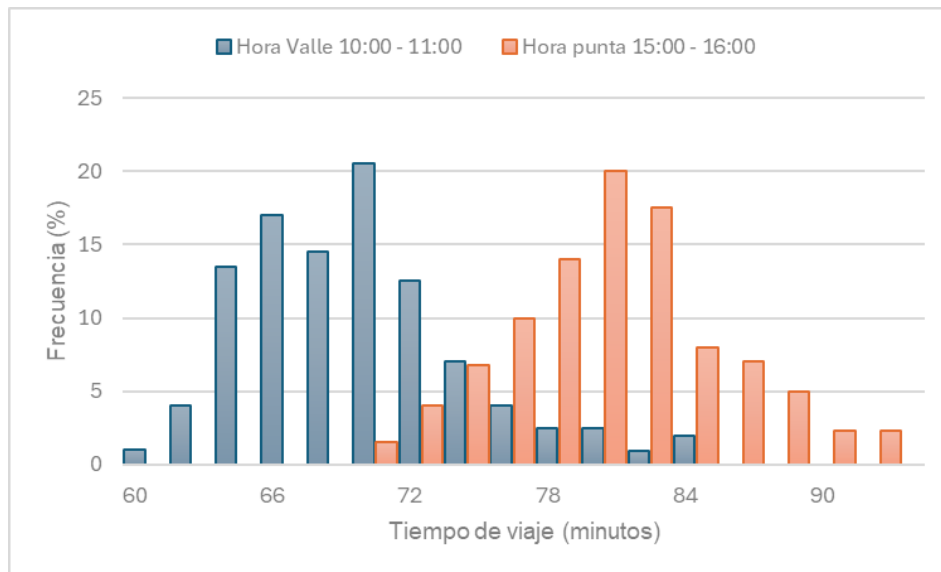


Figura N° 3. Distribución del tiempo de viaje en hora punta y fuera de esta.

(Fuente: Adaptado de Mazloumi et al., 2010)

Con estas investigaciones, se puede corroborar la gran utilidad que un rastreo de vehículos por GPS brinda, y si bien el precio de estos equipos está disminuyendo, aún son costosos para una implementación a mediana y gran escala. Sin embargo, gracias a la corriente denominada “Hazlo tú mismo” (DIY por sus siglas en inglés), se cuentan con equipos y sensores de muy bajo costo con los que, con un conocimiento básico de electrónica, se pueden ensamblar dispositivos embebidos para la toma de información. Dentro de estos encontramos a las placas Arduino, Raspberry PI, entre otros, muy usados a nivel mundial por su costo reducido y su gran versatilidad. Rahman et al. (2016), realiza el ensamblado de un equipo de rastreo de vehículos usando una placa Arduino destacando la facilidad de armado y los bajos costos que conlleva. Además, que un equipo propio se puede adaptar a las necesidades propias de cada proyecto y/o vehículos, a diferencia de un equipo adquirido, que viene con funcionalidades ya establecidas, y que no necesariamente satisfacen completamente las requeridas.

Con la data y resultados obtenidos de los sistemas GPS se puede analizar la eficiencia energética, minimizando costos de operación. Li et al. (2016), en su investigación establece una metodología para equilibrar la oferta de capacidad y la demanda de pasajeros a través de un modelo matemático de optimización por medio de la programación de buses. Se busca minimizar el tiempo muerto, maximizar los ingresos operativos de la empresa disminuyendo los costos de operación.

También Vizuite (2015), en su investigación en la evaluación de la eficiencia operativa de los corredores de tránsito rápido de autobuses en el distrito Metropolitano de Quito, presenta diversos indicadores relacionados con la eficiencia operativa, estos indicadores aportan datos dinámicos que se adecua a la calidad producida en la realidad. Los indicadores establecen el cumplimiento de los programado con lo realizado en calidad, costo, tiempo y cantidad.

Oszczypala et al. (2023), aplica el modelo de Stackelberg en una red de transportes de Varsovia, Polonia para obtener tiempos óptimos en todo el sistema bajo la premisa de un decisor central que distribuye el flujo de tráfico para minimizar el tiempo de viaje y mejorar la eficiencia total del sistema. Este modelo se basa en un método matemático de redes donde el objetivo es minimizar la función objetivo de tiempo total de viaje en un recorrido.

En función de lo mencionado se desarrolla un modelo de gestión de recorridos en vehículos de transporte público haciendo uso de sistemas embebidos como los sensores GPS que permita obtener parámetros para proponer alternativas a una buena eficiencia energética. La eficiencia debe ir de la mano con los costos y tiempo de viaje, así mejorar la calidad de transporte urbano.

1.2 Alcance y límite de la investigación

El alcance de la Investigación es desarrollar una gestión de recorridos en buses de transporte público en rutas de la ciudad de Lima con el objetivo de mejorar la eficiencia energética usando sistemas embebidos de bajo costo (GPS), para empresas de transporte público formal.

El GPS proporciona datos de coordenadas y tiempo de 4 buses de transporte público formal (2 buses del corredor morado y 2 buses de la empresa ETUL4 S.A) por un periodo aproximado de un mes (15 de mayo al 19 de junio del 2021) , donde se obtiene los parámetros principales, tiempo de viaje y distancia, del cual obtendremos los demás parámetros como velocidad, aceleraciones y energía. La investigación se limita en estos parámetros de estudio, mas no en otros parámetros exógenos como demanda de pasajeros, plan de mantenimiento, entre otros.

El modelo de gestión de recorridos se basa en el modelo de Stackelberg y la evaluación de la propuesta de rutas y eficiencia energética se basa en el algoritmo de Dijkstra, establecido anteriormente en otras investigaciones.

1.3 Problemática

Con el cambio climático y el incremento del calentamiento global, los países del mundo vienen tomando medidas en esfuerzos de ahorro de energía y reducir la emisión de gases contaminantes. La industria del transporte por ende afronta una gran presión en mejorar su eficiencia energética y obtener una buena calidad de servicio (Zhang, 2018).

Uno de los modos de circulación más usados por los ciudadanos en el Perú es el transporte público. Desde la década de 1990 el transporte público en Lima ha estado dominado por factores informales, que prestan un servicio con muy bajos estándares de calidad. El factor principal fue el gran incremento poblacional de Lima cuya demanda genera un incremento de microbuses formales e informales que invaden rutas del casco urbano. (REDES, 2023).

En Lima, la contaminación ambiental y la calidad del transporte público son unos de los problemas más importantes que afectan la calidad de vida con 33% y 24% respectivamente, según la encuesta a la población (Lima Cómo Vamos, 2023) como se muestra en la Figura N° 4.



Figura N° 4. Gráfica de barras de los principales problemas en Lima Metropolitana y Callao.

(Fuente: Lima Cómo Vamos, 2023)

Según el Anuario Estadístico del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (2023), el transporte público en diversas ciudades del Perú comparte una característica común, y es el desorden que existe en la gestión de sus vehículos, propiciada por un manejo empírico de las unidades. Solo se conocen datos promedios de parámetros como tiempos de viaje, y, en rutas de más de 60 Km; cuando ocurren incidentes, no se puede realizar un estudio detallado de estos y los retrasos que generan.

Solo en Lima, alrededor del 50% de la población usa buses o combis para movilizarse (Lima Cómo Vamos, 2021), como se detalla en la Figura N°5. Sin embargo, también más del 40% de los ciudadanos de Lima se encuentra disconforme con el servicio brindado de buses, cústeres y combis como se muestra en la Figura N°6; y lo lista como uno de los principales problemas que afecta a la calidad de vida de las personas con un 24.7% (Lima Cómo Vamos, 2023). Además, La contaminación ambiental del aire en Lima es generada por la calidad de los combustibles y un 70% del parque automotor.

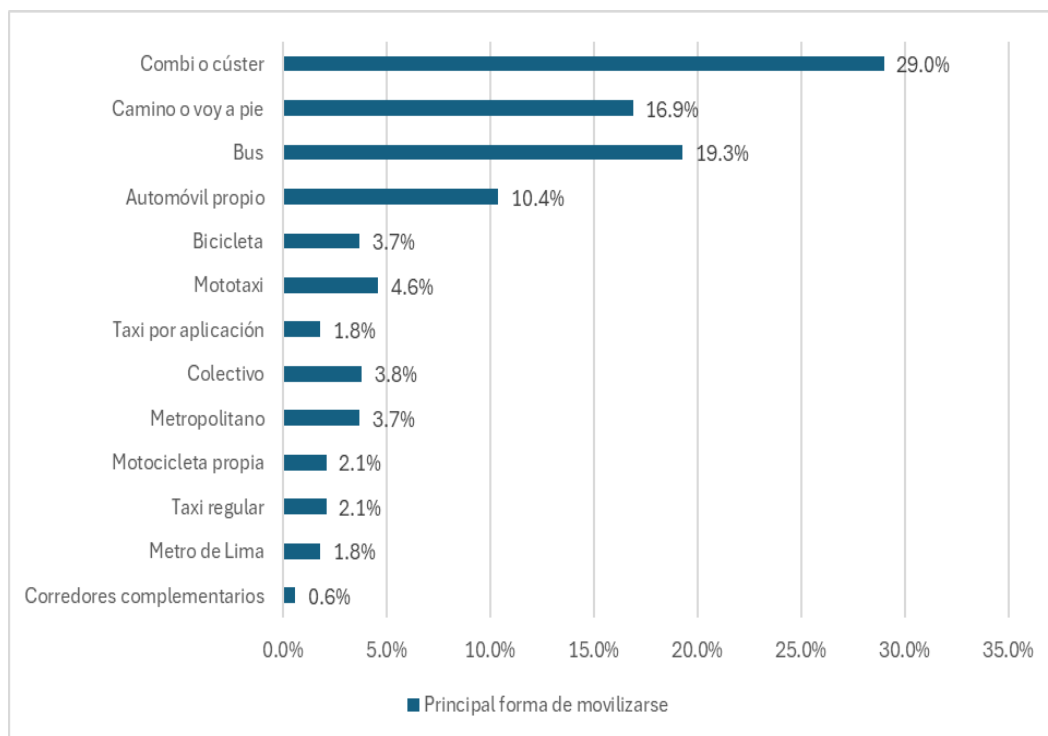


Figura N° 5. Modos de Viaje en Lima Metropolitana y Callao.

(Fuente: Adaptado de Lima Cómo Vamos, 2021)

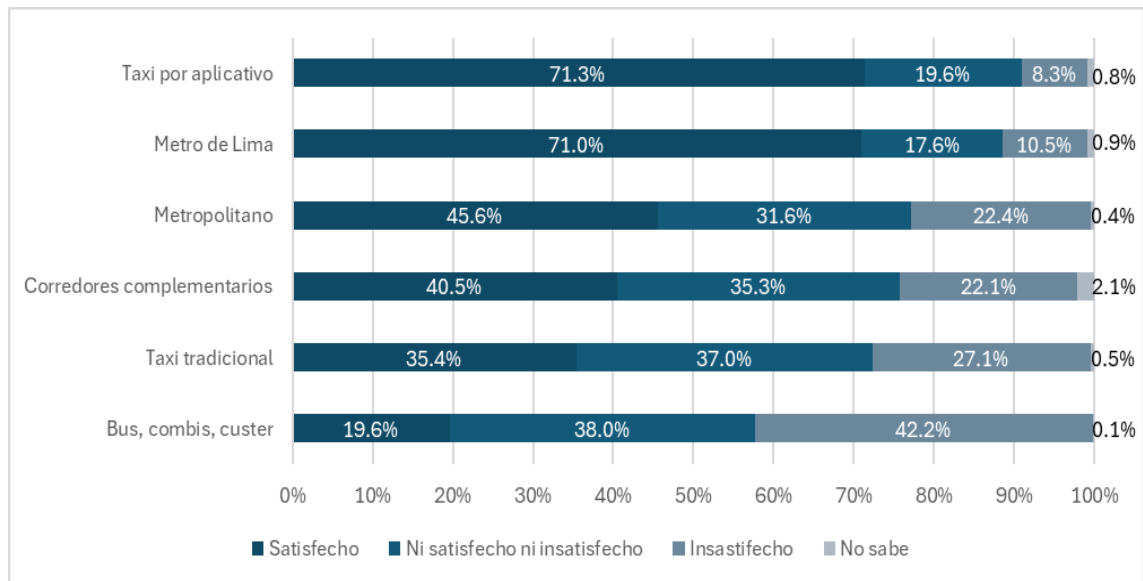


Figura N° 6. Calificación del servicio de transporte.

(Fuente: Lima Cómo Vamos, 2023)

Según Guzmán (2022), en Lima la falta de ordenamiento en las rutas y el aumento de la población hizo que los viajes diarios se incrementen en promedio en 50% más de tiempo en el año 2022 con respecto de hace 5 años, esto impacta directamente con la economía y tiempo de la población Limeña, el cual en promedio según Ramos Medina (2024) atraviesa más de 2 días adicionales en el tráfico cada año comparado con otras ciudades de la región y un máximo de 6.5 días adicionales según Noreña (2024).

Todo esto ocasiona que los tiempos de viajes sean largos según MOVEMOS (2022), la población limeña pasa entre 1 y 2 horas de viaje en el día, que los tiempos de espera se incrementen o no se tenga certeza de ellos y que la eficiencia energética tenga índices inadecuados. Es por ello, que se necesita contar con datos de los viajes de los vehículos de transporte urbano. Esto permitirá caracterizar los recorridos de las flotas, diagnosticar las fallas y/o debilidades que existan en su operación, mejorar la calidad de transporte urbano. Por tanto, un dispositivo de rastreo basado en Arduino ayudará con la recopilación de datos que, a su vez, permitirán el modelamiento para una gestión de recorridos en los vehículos de transporte público.

¿Cómo mejorar la eficiencia energética de Vehículos de Transporte Público en Lima?

1.3.1 Problemas secundarios

- ¿Cómo obtener los parámetros que definen el recorrido de una flota de vehículos de transporte público con sistemas embebidos?
- ¿Qué relación que existe entre la velocidad con el consumo energético en relación a vehículos de transporte público?
- ¿Qué alternativas se debe adoptar para obtener una mejor eficiencia energética de los vehículos de transporte público?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General.

Proponer un modelo de gestión de recorridos para vehículos de transporte público para las principales rutas de Lima que mejore la eficiencia energética mediante el empleo de sistemas de rastreo de bajo costo.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Desarrollar parámetros como el tiempo, distancia recorrida, velocidad que definen el recorrido de una flota de vehículos de transporte público con sistemas embebidos de rastreo.
- Establecer la relación que existe entre la velocidad y el consumo energético en vehículos de transporte público.
- Proponer alternativas para mejorar la eficiencia energética de rutas existentes de transporte público urbano, haciendo uso de los parámetros obtenidos en el primer objetivo.

1.5 Formulación de la hipótesis

1.5.1 Hipótesis General.

El sistema de rastreo permite mejorar la eficiencia energética a través de la gestión de los recorridos de las unidades de transporte público.

1.5.2 Hipótesis Específicos:

- El desarrollo de los parámetros de tiempo, distancia recorrida, velocidad permite definir y caracterizar el recorrido de la flota de vehículos de transporte público.

- La energía consumida de los vehículos es función de la velocidad, así como también la distancia recorrida.
- Mediante la propuesta de alternativas se logra mejorar la eficiencia energética en las rutas existentes de transporte público, el cual se demuestra mediante la medición del consumo energético.

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1 Eficiencia energética y movilidad

2.1.1 Consumo Energético

Según Posada y González-Calderón (2013), el consumo energético es una medida que refleja la cantidad de kilómetros que un vehículo puede recorrer por cada litro de combustible. El gasto en combustible es un factor clave en el costo operativo de un vehículo, y en algunos casos y regiones, puede llegar a constituir hasta el 50 % del costo total de transporte por unidad de vehículo.

2.1.1.1 Modelos

Los modelos de evaluación del consumo energético han sido desarrollados para optimizar la asignación de recursos en el sector vial según el enfoque técnico-económico. Estos modelos buscan identificar la mejor alternativa de inversión entre las opciones de diseño, construcción y mantenimiento disponibles, utilizando el principio de minimizar el costo total del transporte, un enfoque que ha sido aceptado por administradores, economistas e ingenieros en países desarrollados y economías emergentes (Posada y González-Calderón 2013).

Modelo Empírico

Estos modelos, también llamados clásicos o de estimación estadística, abordan los costos de operación vehicular considerando aspectos como el combustible y las características de la carretera. Utilizan el análisis de datos mediante la técnica de mínimos cuadrados, que incluye un término de error, como se ilustra en la ecuación.

$$c = (x * f) + e$$

Donde:

c = costo o consumo del elemento

x = vector de característica de la carretera

f = vector de coeficientes

e = error;

El error "e" no debe estar correlacionado con "x"; normalmente, "f" se calcula utilizando mínimos cuadrados. Además, se puede reemplazar "c" por log(c) para

obtener resultados lineales, lo que transformará el modelo en semilogarítmico y podría mejorar el ajuste.

Otros estudios sugieren que el consumo de combustible depende únicamente de la velocidad del vehículo, y se establece la relación funcional descrita por la ecuación:

$$F = a + \frac{b}{V} + c * V^2$$

Donde:

F = consumo de combustible por unidad de distancia

a, b y c = coeficientes

V = velocidad del vehículo;

El consumo de combustible presenta un comportamiento en forma de curva en "U", como se ilustra en la Figura N° 7. El mayor consumo ocurre a velocidades relativamente altas o bajas, mientras que el consumo es mínimo cuando la velocidad del vehículo es igual a $\frac{b}{2*c}^{1/3}$, conocida como la velocidad "óptima", que generalmente se encuentra entre 40 y 60 km/h. El coeficiente "a" depende de las características de la carretera y del vehículo, incluyendo el peso y la relación peso/potencia. La ecuación muestra otra expresión obtenida mediante pruebas de laboratorio.

$$L = a + b * V + c * V^2 + d * V^3$$

Donde:

L = consumo en lt/km

V = velocidad media en km/h

a, b, c y d son parámetros definidos por cada tipo de vehículo

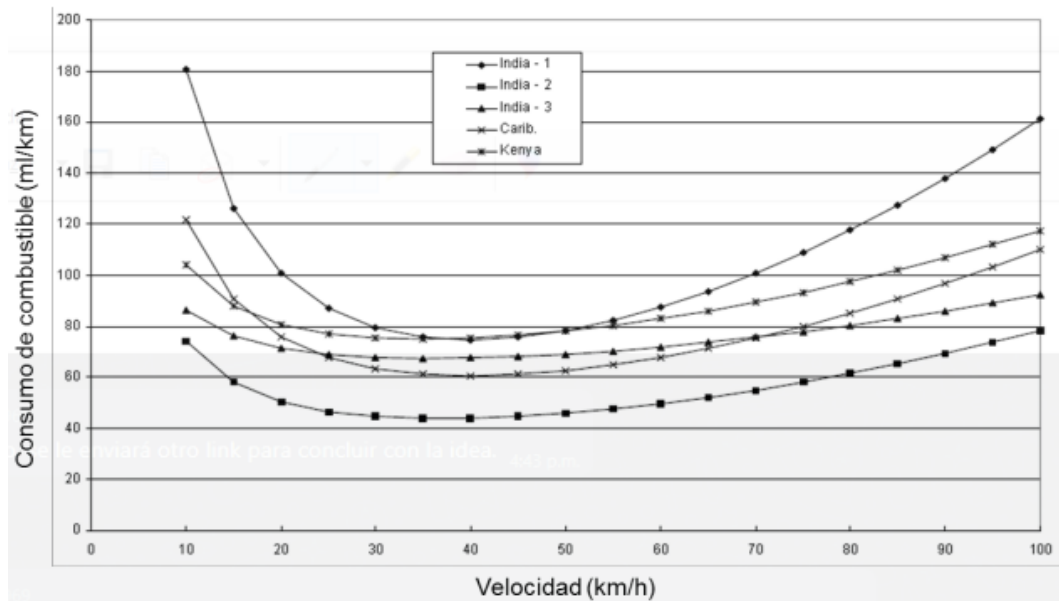


Figura N° 7. Efecto de la velocidad sobre el consumo de combustible en automóviles
(Fuente: Posada & González-Calderón, 2013)

2.1.2 Eficiencia Energética

La Eficiencia Energética en la actualidad es una solución rápida para que un sistema energético sea sostenible. (Kreuzer & Wilmsmeier, 2014). Los indicadores para medir la Eficiencia energética y definirla en un cociente, es el siguiente:

$$\text{Eficiencia Energética } (\varepsilon) = \frac{\text{Energía consumida actual} - \text{Energía consumida con una gestión de recorridos}}{\text{Energía consumida con actual}}$$

Por ello las definiciones se basan en una reducción del consumo energético a través de avances tecnológicos, y también por una decisión consciente de las personas para reducir su consumo.

Para definir la Eficiencia energética en el ámbito del transporte se debe tener en cuenta la definición de movilidad. El servicio de transporte es una demanda derivada ya que se desea obtener el servicio de desplazamiento a través de la energía necesaria para ello.

2.1.3 Movilidad

Es el traslado de mercancías, personas, información o bienes de un lugar a otro, y es una acción inherente de las personas. La movilidad se puede dar de diferentes formas como se muestra en el siguiente gráfico (referencial).

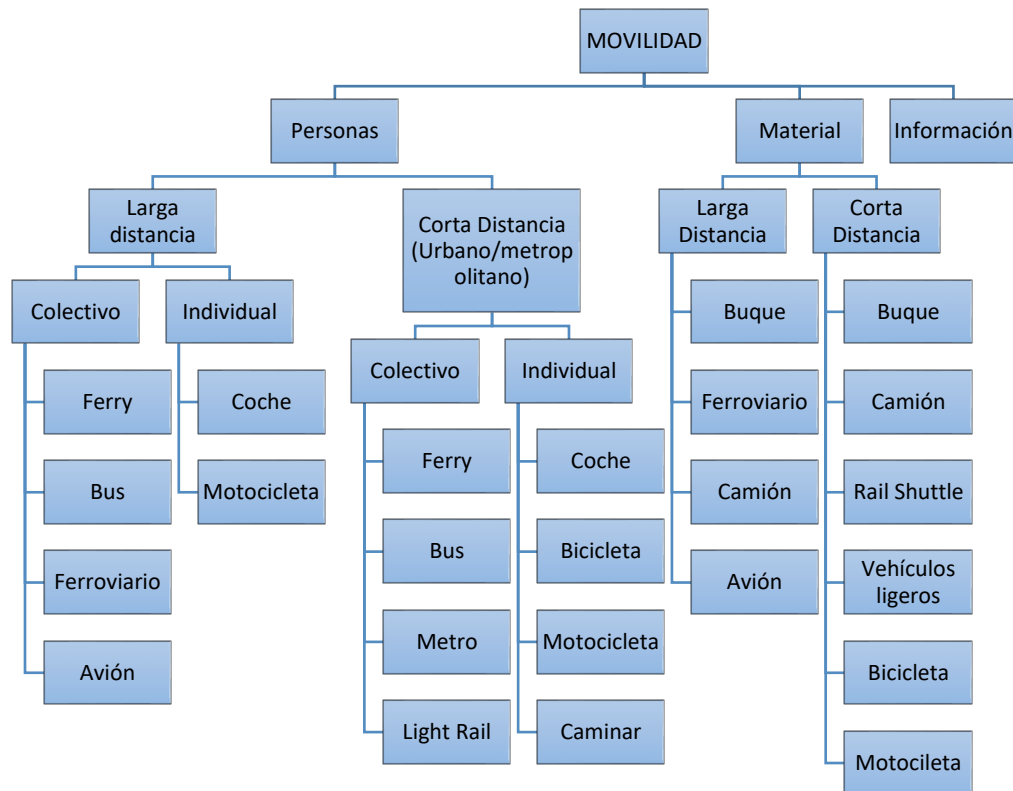


Figura N° 8. Formas de Movilidad de Personas, Material e información
(Fuente: Adaptado de Kreuzer & Wilmsmeier, 2014)

La movilidad es como encontrar un equilibrio entre poco o demasiado movimiento. (Kreuzer & Wilmsmeier, 2014). El equilibrio de estos reducirá el consumo de energía y por ende una mayor eficiencia energética.

La movilidad tiene como parámetros el volumen transportado y la distancia recorrida. En transporte público, se habla de pasajeros/km.

El enfoque para analizar en el contexto de movilidad la eficiencia energética es el enfoque en término inglés llamado A-S-I; Avoid, Shift e Improve respectivamente. (Kreuzer & Wilmsmeier, 2014)

- **AVOID, EVITAR:** Las personas evitan los viajes. Esto es casi imposible ya que es una necesidad la movilidad diaria en la mayoría de los casos.
- **SHIFT, CAMBIAR:** Las personas cambian la movilidad por otro sistema de transporte más eficiente. Por ejemplo, en vez de viajar individualmente pueden viajar en un transporte público.
- **IMPROVE, MEJORAR:** En el transporte, mejorar la eficiencia del consumo de combustible a través de programas o alternativas de gestión vehicular.

2.1.4 Energía consumida en vehículos

Bouzada et al. (2008), menciona las principales causas del consumo energético de los automóviles, los parámetros que influyen en ella y también como optimizarlas.

El consumo energético se centra básicamente en la energía neta que requiere para desplazarse y funcionar, obviando todas las transformaciones y trasmisiones energéticas internas del vehículo.

Las principales causas físicas para que un vehículo funcione son:

- Acelerar toda su masa incluida su carga.
- En el aspecto de rodadura, vencer su resistencia.
- Con respecto al aire, vencer su resistencia.

Para cada una de estas causas, se analiza las potencias que influyen.

Potencia de Circulación (P_b): Es la energía por unidad de tiempo requerido por el vehículo para acelerar y desplazar el mismo. Se utiliza la siguiente ecuación para determinar la potencia de circulación.

$$P_b = \frac{1}{2} * m * \frac{v^3}{d}$$

Donde:

m = masa del vehículo (kg)

v = velocidad del vehículo $\left(\frac{m}{s}\right)$

d = distancia recorrida (m)

Potencia Aerodinámica (P_a): Es la energía por unidad de tiempo que utiliza el vehículo para vencer la fuerza que ejerce el aire respecto a su desplazamiento. Se utiliza la siguiente ecuación para determinar la potencia aerodinámica:

$$P_a = \frac{1}{2} * C_d * A * p * v^3$$

Donde:

p = densidad del aire $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

C_d = coeficiente de arrastre

A = superficie frontal del vehículo (m^2)

Potencia de Fricción (P_f): Es la energía por unidad de tiempo que utiliza el vehículo para vencer la resistencia de rodadura. Se utiliza la siguiente expresión para determinar la potencia de fricción:

$$P_f = u * m * g * v$$

Donde:

u = resistencia de rodadura

g = aceleración de la gravedad ($\frac{m}{s^2}$)

Las potencias calculadas se convierten en energía al multiplicarlas por un segundo.

2.2 Arduino

Es un conjunto de prototipos electrónicos basados en hardware y software de código abierto que permiten la interacción con el entorno. Su funcionamiento se basa en una placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, con un escenario donde se pueda crear programas; por ello su uso es multidisciplinario para cualquier entusiasta o experto. Desde que salieron al mercado, las placas Arduino han ido desarrollándose continuamente y se han lanzado al mercado una gran variedad de sensores compatibles con estas. Entre estos sensores, se encuentran sistemas de posicionamiento GPS (Peña, 2020).

2.2.1 Componentes

Según Peña (2020), se divide en:

- Hardware: Se encuentra la placa Arduino con un microcontrolador y un conjunto de puertos digitales y analógicos de entrada y salida. Además, también tiene un puerto USB por donde se alimenta de energía y se comunica con un controlador o PC.

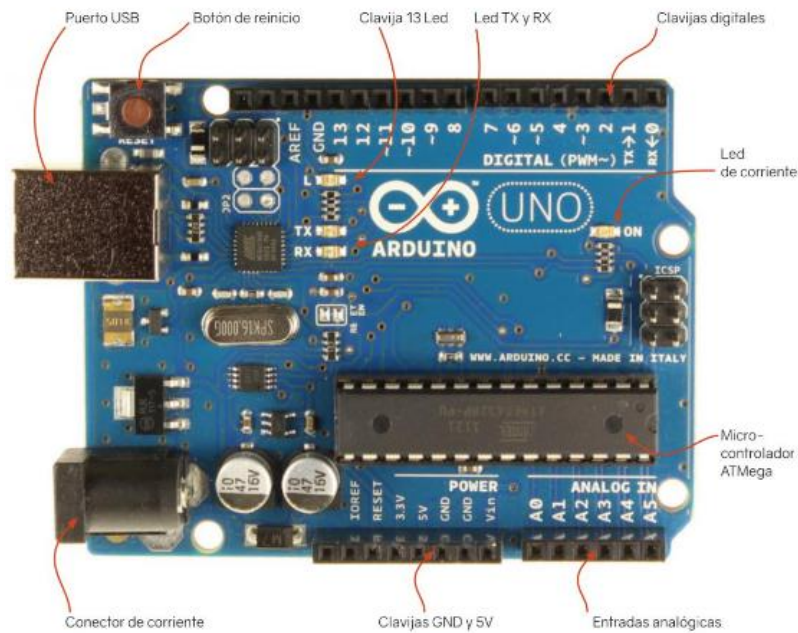


Figura N° 9. Hardware de un Arduino (Placa)

(Fuente: Peña, 2020)

- Software: Es la plataforma donde se puede programar el código necesario para controlar el correcto funcionamiento de los sensores que se conecta a la placa.
- Comunidad: Es el grupo de usuarios que comparten y publican contenidos, proyectos y resuelven dudas; todo ello con el fin de la divulgación de Arduino en el mundo.

2.3 Sistema de posicionamiento global “gps”

En sus siglas en inglés, Global Positioning System “GPS” es un sistema de navegación que proporciona a los usuarios información sobre posicionamiento, navegación y cronometría; compuesto por una flota de satélites en órbita, situados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. Funciona en cualquier parte del mundo y está disponible de forma libre para todos los usuarios (Rey, 2006).



Figura N° 10. Placa GPS Arduino
(Fuente: Adaptado de Rahman et al., 2016)

2.3.1 Funcionamiento

A través de un proceso llamado Trilateración, el receptor obtiene la posición exacta en un tiempo preciso de cada satélite. Combinando la información de cuatro satélites, se puede obtener la posición en un tiempo determinado en Tierra.

El proceso es el siguiente: Se obtiene la distancia de un satélite, con esta distancia se forma una esfera con centro en el satélite; de igual forma se puede obtener con un segundo satélite, con la intersección se obtiene un área en tres dimensiones donde en un punto se encuentre la posición a hallar; de igual forma con el tercer satélite se obtiene con la intersección dos puntos como se muestra en la Figura N° 11, uno de los cuales es la posición que se desea ubicar y el otro es una representación absurda, la cual puede descartarse con un cuarto satélite. Debido a que las señales de radio viajan a una velocidad igual a 1×10^9 km/h (velocidad de la luz) los tiempos entre satélites a receptores es muy pequeña, por ende, se necesitan relojes atómicos en los satélites. La distancia se estima midiendo el tiempo que toma la señal, en el que el error puede presentarse en el receptor que no lleva relojes atómicos. El mínimo error de cronometraje puede conllevar errores en distancia enormes; por ello el cuarto satélite es necesario para corregir ya que la esfera formada por éste satélite no cruzará con las otras tres; el error es el mismo para las cuatro medidas, por ende, una corrección en el receptor hace que las cuatro esferas se crucen y así obtener la correcta posición. (Rey, 2006).

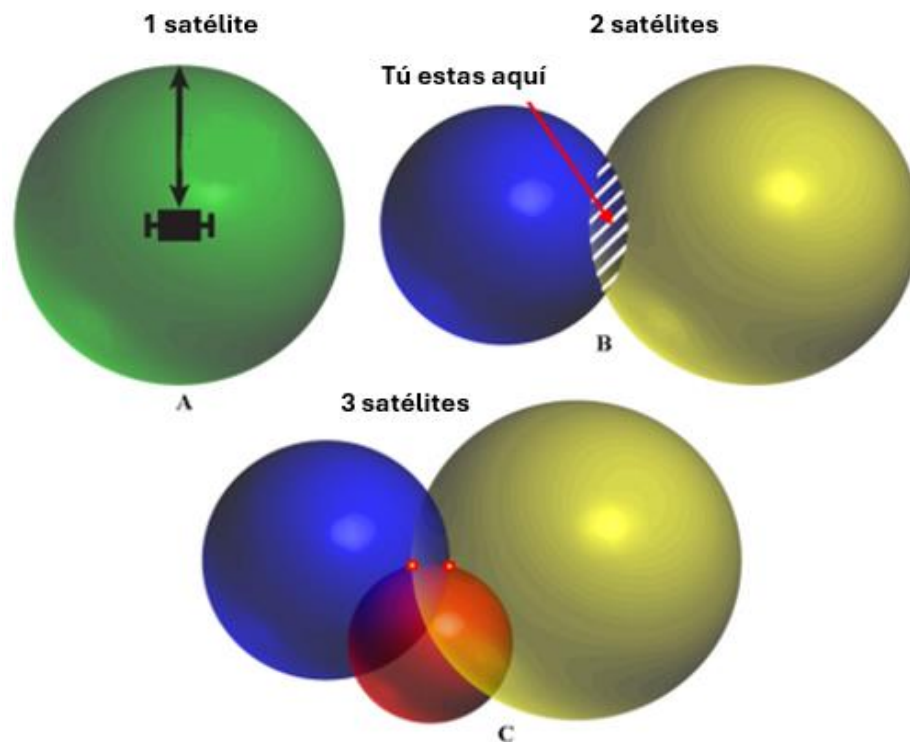


Figura N° 11. Cálculo de la posición usando tres satélites.
(Fuente: Rey, 2006)

2.4 Sistema de información geográfica

El Sistema de Información Geográfica es una integración organizada de software, hardware y datos diseñada para recopilar, procesar, analizar, integrar, almacenar, compartir y mostrar información georreferenciada en todas sus formas con el objetivo de solucionar problemas o dificultades complejas de procesos de gestión y planificación. El Sistema de Información Geográfica funciona como una base de datos con información geográfica que está vinculada por identificadores comunes a objetos gráficos de un mapa. (Santovenia et al., 2009).

2.4.1 Aplicaciones

El Sistema de Información Geográfica tiene varias aplicaciones en el campo de la Ingeniería Civil, entre los más destacados están; productos cartográficos obtenidos por dispositivos remotos, vistas en tres dimensiones de megaproyectos en diferentes etapas de desarrollo, construcciones aeroportuarias para mejorar la productividad, análisis de suelos y determinación de áreas para expansión urbana, el proceso de transformación espacial de las ciudades, y gestión del transporte urbano y rural. (Gómez, 2006).

transporte rápido, eficiente, seguro y cómodo entre los lugares de origen y destino. (Celi Ortega, 2018).

Los medios de transporte que está disponible para todas las personas son: autobuses, trolebuses, trenes, tranvías, vehículos que ayuden a la movilización y tengan una tarifa. (Celi Ortega, 2018).

2.6.1 Transporte Sostenible

Un transporte urbano sostenible va de la mano con una ciudad sostenible, esto quiere decir que el transporte a lo largo de los años sea eficiente. La promoción de transporte masivo y políticas de manejo de demanda futura con la planificación urbana para garantizar una buena calidad de vida a los pobladores de una ciudad. (Celi Ortega, 2018).

2.6.2 Objetivos para un Sistema de Transporte Sostenible

Son 4 objetivos para una Sostenibilidad a futuro sin perjudicar a la población futura. (Celi Ortega, 2018).

- Protección del medioambiente: Evitar impactos ambientales negativos reduciendo el ruido y la contaminación.
- Seguridad: Los accidentes de tránsito son inevitables por factores humanos, mecánicos, infraestructura; por ello debe reducirse en gravedad y número.
- Ciudades Habitables: Reducir el uso de vehículos privados y fomentar el uso de transporte a pie y en bicicleta, para fomentar actividades sociales, culturales y de ocio.
- Igualdad e integración social e intergeneracional: El uso del transporte masivo debe ser equitativo en calidad y acceso para todas las personas de cualquier parte de una ciudad. Esto para aumentar las oportunidades de las personas más desfavorecidos.

2.7 Planeamiento urbano vial y planes de desvío

2.7.1 Definición planeamiento Urbano Vial

Según Zhang et al. (2014), para realizar una planificación eficaz de la red vial urbana, optimizar su estructura y promover la estrategia de “prioridad de tránsito”, es crucial entender el continuo aumento en la propiedad de automóviles y la falta de buenas carreteras. Una descripción precisa y científica de la red vial urbana es

fundamental para la planificación, optimización y diseño de las futuras líneas de tránsito.

Investigaciones previas han explorado las características del pequeño mundo en las redes viales urbanas, demostrando que las carreteras urbanas tienden a tener rutas más cortas y coeficientes de agrupamiento más altos. A pesar de los amplios estudios sobre la red vial, la descripción completa de la misma aún está incompleta. Los investigadores de tráfico han comenzado a centrarse en la capacidad y el modelo de la red vial urbana, proponiendo métodos para abordar problemas en la planificación y gestión del tráfico.

2.7.2 Definición de Planes de desvío

Según Barceló (2010), un plan de desvío vehicular es una estrategia utilizada para redirigir el tráfico en situaciones donde el flujo normal de vehículos es interrumpido. Estos planes requieren una cuidadosa planificación y coordinación para minimizar el impacto en el tráfico y garantizar la seguridad de los usuarios de la vía.

La importancia del plan de desvío vehicular es que pueda prevenir congestiones severas y reducir el tiempo de viaje de los conductores afectados. También se destaca que puede disminuir el incremento de emisiones contaminantes y riesgos de accidentes.

2.7.3 Elementos para la Planificación de Desvíos

- **Análisis del Tráfico:** Es importante para determinar el impacto del desvío. Las simulaciones de tráfico pueden ser herramientas útiles para predecir como afectara el flujo de vehículos y en consecuencia una selección de ruta. (Wolshon, 2001).
- **Selección de la Ruta:** Debe basarse en la capacidad de las vías, distancia adicional o acortada, presencia de intersecciones que puedan causar demoras. Se propone que las rutas alternas deben estar claramente señalizadas y comunicadas con los conductores de antemano para evitar confusión y asegurar un desvío eficiente. (Wolshon, 2001).
- **Señalización y Comunicación:** Según Garber y Hoel (2009), la correcta señalización del desvío es crucial para guiar a los conductores. Las señales debes ser claras y visibles para garantizar que los conductores puedan seguir el desvío sin dificultad.

2.7.4 Flota de Vehículos

La flota de transporte público en Lima es diversa y se compone de una mezcla de vehículos formales e informales. Según un informe del Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI (2020) la ciudad cuenta con un vasto número de buses, combis, coasters, y taxis colectivos que operan en rutas establecidas, pero muchas veces de manera desorganizada.

En base a los estudios del Plan JICA (2004 y 2013), GIZ (2018) adaptado por Tapia (2021), los buses tienen mayor preponderancia en el uso modal de transporte por la población en Lima y Callao

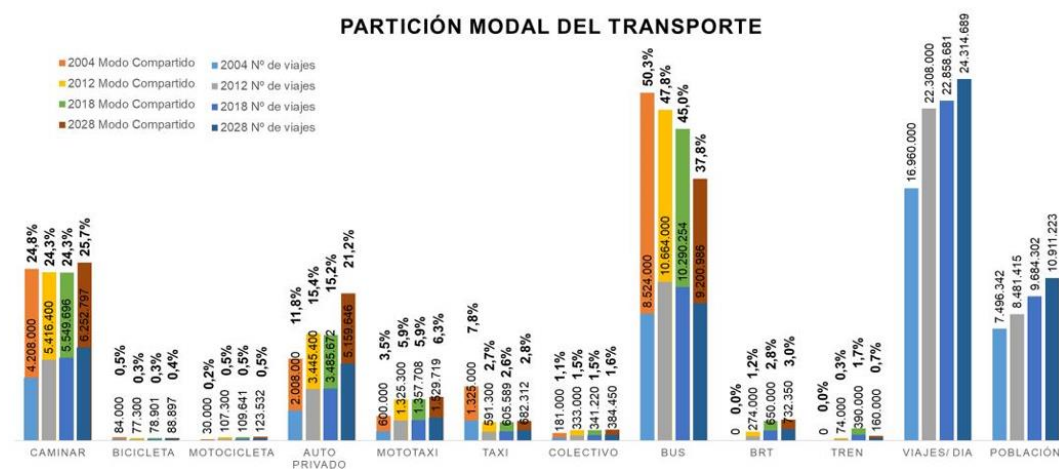


Figura N° 13. Variación de los modos de transporte

(Fuente: Equipo de Estudio JICA, 2013)

(Fuente: Equipo de Estudio GIZ, 2018)

(Fuente: Adaptado por Tapia, 2021)

Transporte Público Informal: El transporte informal en Lima, que incluye combis y taxis colectivos operan de gran medida fuera del control regulatorio del Estado. Su característica es la competencia desleal, conducción temeraria y la falta de mantenimiento. Entre otros aspectos se destaca la flexibilidad como una fortaleza. (Thomas & Sáenz-Acosta, 2024)

Transporte Público Formal: Buses de transporte servicio formal y regulado que cumplen una serie de normativas en cuanto a rutas, paraderos, mantenimiento de vehículos y calidad de servicio. (Alvarado et al., 2021)

Corredores Complementarios: Fueron implementados por la Municipalidad de Lima para reorganizar y formalizar ciertas rutas de transporte. Estos buses operan

con buses de mayor capacidad y cumplen con regulaciones más estrictas en términos de seguridad y eficiencia. (REDES, 2023)

BRT Metropolitano: Sistema de Tránsito Rápido (BRT) que utiliza buses articulados y carriles exclusivos para conectar el norte y el sur de Lima. Es uno de los pocos sistemas de transporte en Lima que opera de manera formal y estructurada, con estaciones específicas y horarios definidos. Este sistema ha sido clave en la reducción de la congestión en sus rutas, y ha servido como modelo para futuros desarrollos en transporte público en la ciudad. (REDES, 2023).

2.8 Gestión de recorridos

2.8.1 Definición

La gestión de recorridos es el proceso mediante el cual se planifican, organizan, supervisan y optimizan las rutas de transporte público con el objetivo de maximizar el uso de los recursos disponibles y garantizando el flujo adecuado de vehículos. (Zhong, 2013)

Existen modelos de planificación y gestión del transporte basado en enfoque de programación bilevel y en métodos de medición. La programación sugiere un enfoque iterativo donde el operador imponga límites de velocidad para modificar los flujos de tráfico y los usuarios eligen sus rutas en función de estas restricciones. Esta planificación hace uso de los juegos de Stackelberg. (Liu et al., 2012)

2.8.2 Autoridad de transporte urbano para Lima y Callao (ATU)

La ATU es un organismo técnico especializado, encargado de planificar, gestionar, regular, supervisar, fiscalizar y promover la eficiente operatividad del Sistema Integrado de Transporte de Lima y Callao. También busca, desde un enfoque de movilidad sostenible, crear una red integrada de servicios de transporte urbano masivo de pasajeros; con una buena calidad, amplia cobertura, moderno, limpio, eficiente y económicamente sustentable. (Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao, 2020).

2.9 Velocidad media, instantánea

2.9.1 Definición de Velocidad Media

Según Talero et al. (2013), la velocidad media de un móvil o cuerpo es igual al cociente entre la diferencia de posiciones en un tiempo determinado y el intervalo de esos tiempos. Se define como:

$$v_m = \frac{x(t_2) - x(t_1)}{t_2 - t_1}$$

Donde:

v_m = *velocidad media*

$x(t_n)$ = *Posicion del cuerpo en un tiempo "n"*

t_n = *tiempo "n" del cuerpo*

2.9.2 Definición de Velocidad Instantánea

Según Talero et al. (2013), la velocidad instantánea de un cuerpo o móvil es la velocidad que posee en un instante de tiempo. También se establece como el límite de la velocidad media cuando el intervalo de tiempo tiende a cero. Se define:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} v_m$$

2.9. Congestión vehicular

La congestión vehicular es una condición que destaca si la entrada de un vehículo en una vía con flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás vehículos. También, la definición de congestión vehicular es el exceso de vehículos en una vía determinada, lo cual implica que los vehículos avancen lenta e irregularmente a comparación de las condiciones normales de operación. (Thomson & Bull, 2001)

Según Fernandez (2011), la congestión es un efecto directo y primario sobre los usuarios del sistema de transporte, donde el conflicto se produce cuando dos o más usuarios pretenden usar simultáneamente un mismo recurso del sistema de transporte. También la densidad vehicular se puede expresar bajo los conceptos de capacidad y concentración de vehículos en un tramo y periodo de tiempo con la siguiente formula:

$$q = v_l * k - \frac{v_l}{k_e} * k^2$$

Donde:

q = Cantidad de vehiculos observados en un punto en un periodo T

k = Cantidad de vehiculo observados en un instante en un tramo L

v_l = Velocidad flujo libre

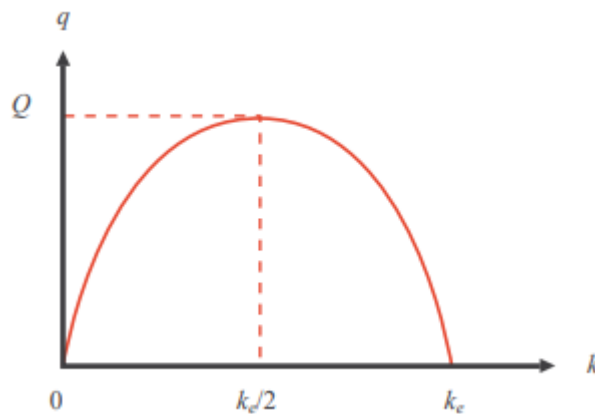


Figura N° 14. relación parabólica de concentración y capacidad vehicular
(Fuente: Fernandez, 2011)

Se observa que se forma una parábola con un máximo de capacidad Q, que depende de los parámetros v_l y k_e .

De la formula fundamental se obtiene la Figura N° 14, donde la capacidad máxima se logra a un medio de concentración de embotellamiento.

v_l = Velocidad de flujo libre

k_e = concentración de embotellamiento (nadie se atreve a moverse)

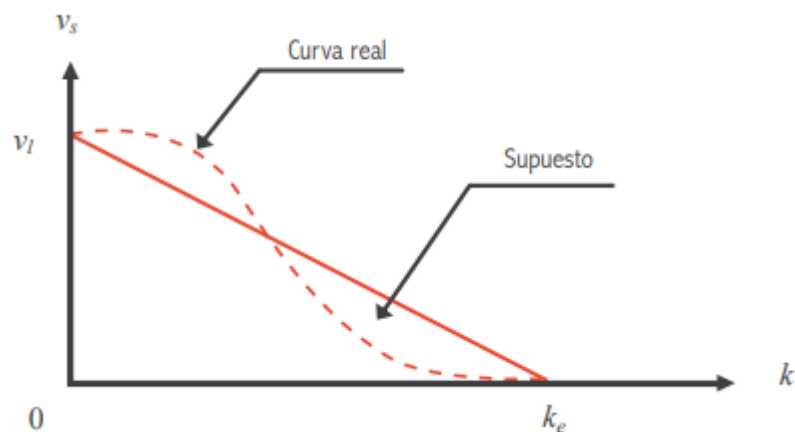


Figura N° 15. relación Velocidad Flujo Libre versus concentración de embotellamiento
(Fuente: Fernández., 2011)

De la Figura N° 15 se observa que a mayor concentración vehicular, la velocidad disminuye.

Se llega a la conclusión que la capacidad máxima depende del flujo libre y concentración de vehículos en un tramo que se debe a características físicas de la vía, características del conductor, características del vehículo, entre otros.

2.9.1. Causa de la congestión vehicular

La causa principal es la interferencia entre los vehículos en la vía, Los vehículos pueden circular hasta una velocidad permitida para tal vía, pero, a mayores volúmenes cada vehículo adicional dificulta el libre movimiento de los demás. También es causada por el incremento del uso del automóvil por diferentes motivos y la poca planificación sostenible de las vías. (CEPAL, 2003).

2.9.2. Congestión vehicular y contaminación ambiental en Lima Metropolitana

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), informo en el año 2016 que hay 1,752,916 vehículos en circulación en Lima Metropolitana y Callao, esto representa el 66% del total de vehículos en el Perú. Estableciendo como la principal causa de los niveles de congestión de tránsito. (Posada, 2018).

Marketwin (2018), en su encuesta, menciona que el 67% de los habitantes de Lima Metropolitana sienten estrés por la congestión vehicular, el 39% manifestó una gran depresión y el 51% que su calidad de vida baja considerablemente ya que pueden estar más de dos horas diarias en el tráfico vehicular.

Solís et al., (2022) muestra a través de encuestas a 22 consultores especialistas en el área del transporte que más del 30% están de acuerdo que la congestión vehicular es causada por una deficiente gestión y planificación vial, paraderos informales, omisiones de norma y falta de fiscalización; como se muestra en la Figura N° 16, Asimismo, que la congestión vehicular es la principal causa de la gran contaminación ambiental.

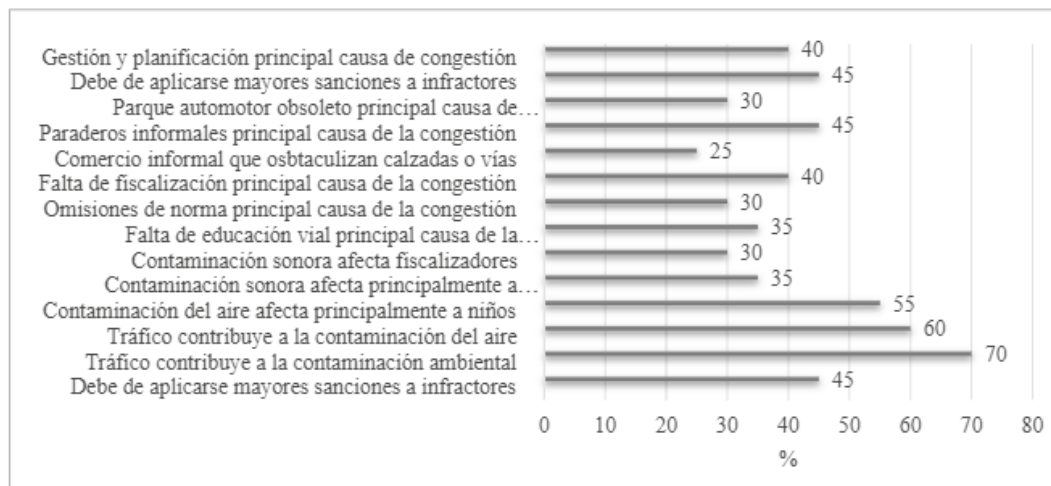


Figura N° 16. Distribución de respuestas a los consultores especialistas en Transporte.

(Fuente: Solís et al., 2022)

Solís et al., (2022) al aplicar el análisis de Pareto, detalla según la encuesta a los expertos, que el 20% de los problemas son causadas por una mala gestión y planificación de la vialidad.

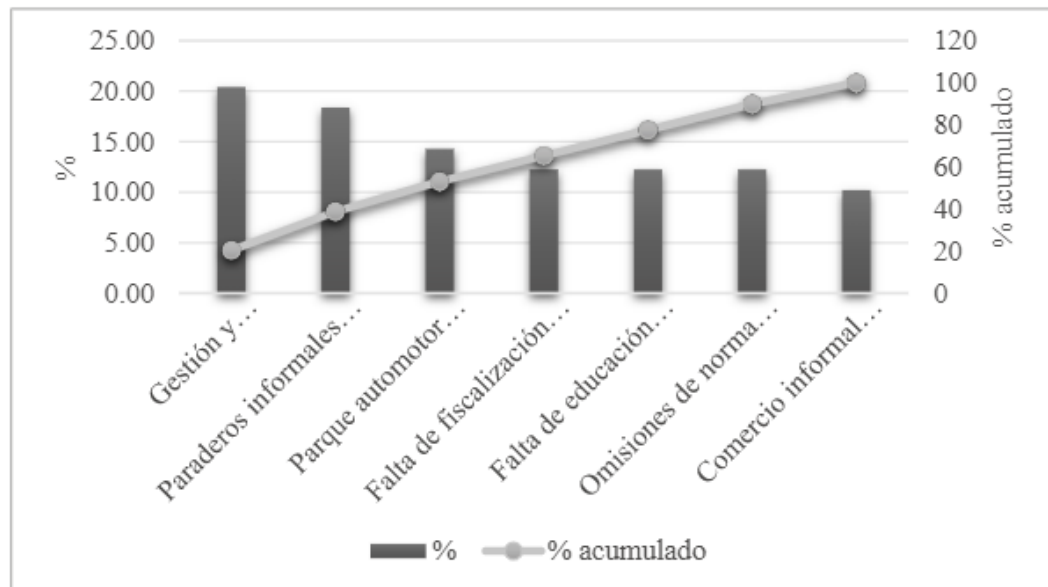


Figura N° 17. Diagrama de Pareto, causas de congestión vehicular en Lima Metropolitana de acuerdo a los especialistas en Transporte.

(Fuente: Solis et al., 2022)

2.10. Contaminación ambiental

Se define como contaminación ambiental a la presencia de componentes nocivos como físicos, biológicos o químicos en el entorno natural y artificial; y que ellos causan daños nocivos para los seres vivos incluyendo los humanos que habitan tal lugar. (Estrada Paneque y otros, 2016)

2.10.1. Contaminación atmosférica en Lima

Según la OMS, Lima es la segunda región más contaminada en América Latina, con un valor de material particulado (PM 2.5) de $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por año. (Hernández-Vásquez & Díaz-Seijas, 2017)

Las cifras expuestas en la siguiente Figura N° 18. muestra la mala calidad de aire en Lima. El registro se da desde el 29 de febrero hasta el 31 de diciembre del 2016. El valor promedio es de $38.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores que fluctúan entre 10 a $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$, donde junio tuvo el mayor promedio con $55.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Así también, las horas donde se concentra mayor PM 2.5 es a las 11am con $47.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (Hernández-Vásquez & Díaz-Seijas, 2017).

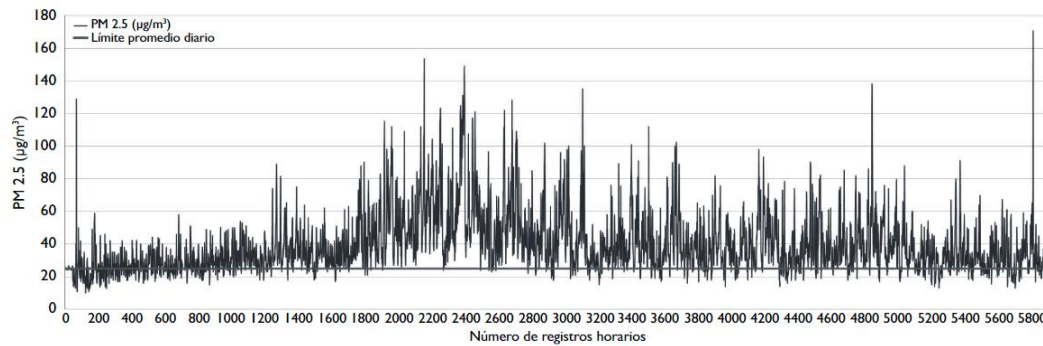


Figura N° 18. Niveles de PM 2.5 en una estación de monitoreo en el distrito de Surco, Lima – Perú
(Fuente: Hernández-Vásquez y Díaz-Seijas, 2017)

2.11. Outliers e inliers

2.11.1. Outliers

La definición de un valor atípico (en inglés outlier), es una observación que se desvía demasiado de las otras observaciones, lo cual genera sospechas de que es generado por otro mecanismo diferente como puede ser falla de un instrumento, una respuesta basada en una mala interpretación o ambigua, error administrativo o de transcripción, error del marco del muestreo, u otro. (Ghosh & Vogt, 2012).

El tratamiento de los outliers se trata generalmente de la siguiente forma:

- Mantener el outlier y tratarlo como cualquier otro dato
- Asignarle menos peso o modificar su valor para que esté más cerca de los demás valores (winsorize).
- Eliminar de la data

El peligro de cada uno de estos métodos es que pueden producir estimaciones deficientes de los parámetros. Modificar su valor o eliminar de la data pueden infravalorar el valor atípico, mientras que mantenerlo puede sobrevalorarlo. (Ghosh & Vogt, 2012).

2.11.2. Inliers

Un inliers es un valor de datos que se encuentra en el interior de una distribución y es erróneo. Los valores internos son muy difíciles de encontrar y corregirlos ya que se encuentran dentro de la data sin ninguna observación de valor atípico. Para tratar los inliers, es necesario identificarlos de alguna forma lógica a través de relaciones con los demás datos, para luego convertirlos en outliers y tratarlo como tal. (Winkler, 1998).

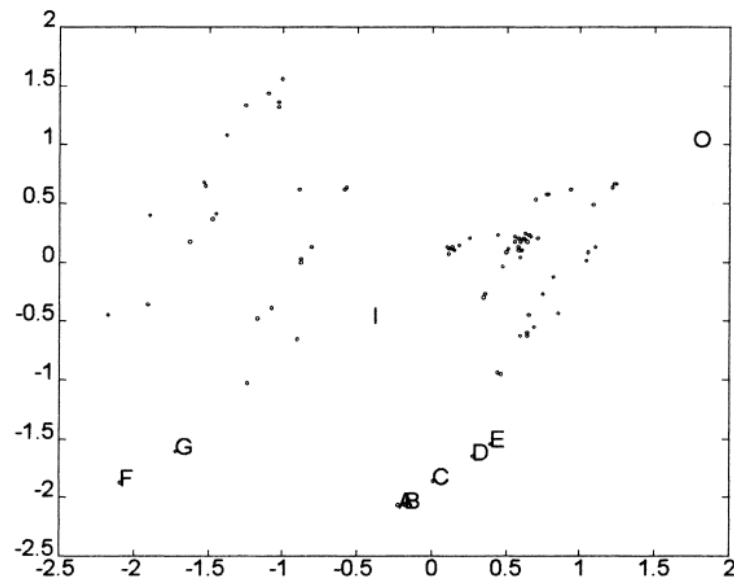


Figura N° 19. Ejemplo de identificación de outliers (valores atípicos lejanos) e inliers.

Fuente: Jouan-Rimbaud et al., (1999)

2.12. Seudocódigo

El Seudocódigo es un lenguaje intermedio entre el natural y el de programación seleccionado, por ende, debe tomarse como un lenguaje de pseudo programación. El seudocódigo une lenguaje natural, sintaxis, símbolos, términos y otras características de programación de nivel avanzado. El seudocódigo describe lo que se hace en el diseño de un algoritmo. El seudocódigo es fácil de expresar en cualquier lenguaje de programación y es independiente de cualquier lenguaje de programación. (Doersing, 2015).

2.13. Algoritmo de Dijkstra

Según Huang (2018), el algoritmo de Dijkstra es un algoritmo típico para resolver el camino más corto desde una fuente única, con la idea de expandir el nodo de la capa exterior uno por uno desde el punto de inicio, de modo que se pueda obtener el camino más corto desde el vértice hacia los otros nodos de manera secuencial.

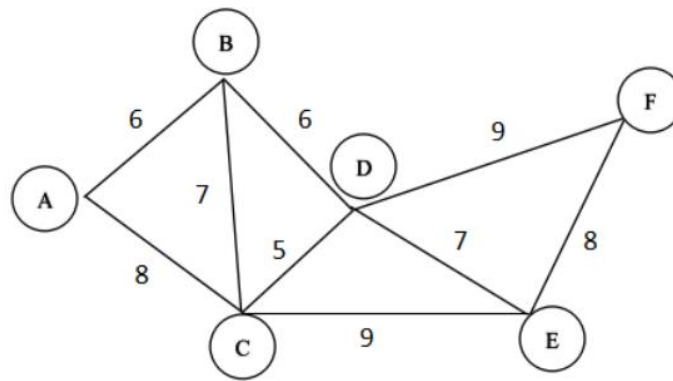


Figura N° 20. Ejemplo del uso del algoritmo de Dijkstra
(Fuente: Huang, 2018)

2.13.1. Usos del Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo fue propuesto por Dijkstra en 1959 para encontrar la ruta más corta e implementarlo en la planificación de rutas en recorridos dirigidos. Actualmente es ampliamente utilizado en el campo de la navegación GPS, planificación urbana y señalización de rutas. Existe y se desarrollan investigaciones para adaptarlo en situaciones más complejas. (Huang, 2018).

2.13.2. Algoritmo de Dijkstra en investigaciones de consumo Energético eficiente

Eklund et al. (1996) destacan que la modificación de algoritmos puede tener múltiples aplicaciones, incluyendo la planificación de emergencias, la gestión de rutas, el transporte público, el tráfico vial y las redes de comunicación. Su investigación se enfoca en identificar puntos críticos, es decir, áreas con respuesta lenta, y en encontrar maneras de aliviar la congestión. Las adaptaciones y mejoras en los algoritmos incluyen componentes heurísticos tanto estáticos como dinámicos. Lo que diferencia esta investigación es la incorporación de variables adicionales, como la velocidad de viaje y el gradiente, además de la distancia. También se considera el camino previo al escanear un nodo para evaluar diferentes rutas hacia un punto calculado anteriormente. Por ejemplo, girar en una carretera de cuatro carriles puede ser más difícil que hacerlo en una calle de un solo carril, por lo que una ruta más larga que minimice estos giros puede ser más eficiente. Además, los criterios evaluados pueden incluir caminos interrumpidos debido a terremotos, el estado de las carreteras, el consumo energético y el tráfico.

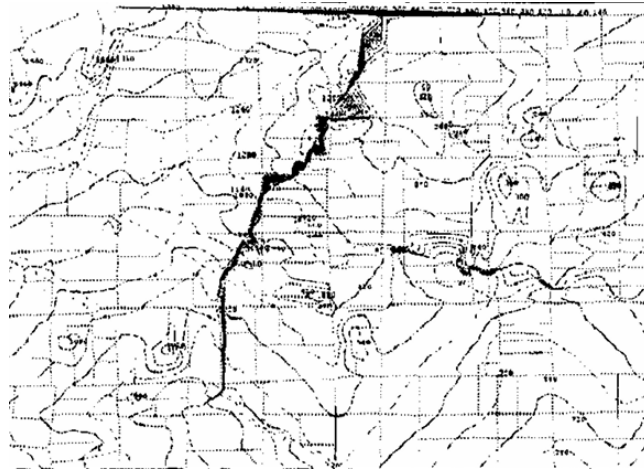


Figura N° 21. Aplicación del algoritmo de Dijkstra modificado de rutas en la ciudad de Okayama en Japón

(Fuente: Eklund et al., 1996)

Zhang et al. (2016), propone en su investigación que el algoritmo OCW-Dijkstra es una innovadora adaptación del algoritmo clásico de Dijkstra, diseñado específicamente para la planificación de rutas en áreas urbanas con el objetivo de minimizar el consumo de combustible. Este enfoque es fundamental para la optimización del transporte público, ya que se centra en reducir tanto el consumo de combustible como las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo así una mayor eficiencia energética y un impacto ambiental reducido.

El proceso del algoritmo OCW-Dijkstra comienza extrayendo datos de las vías urbanas y creando matrices de coeficientes relacionados. Estas matrices transforman todas las variables de la ruta en términos de consumo de combustible. El algoritmo analiza estos coeficientes para calcular y generar la ruta que minimiza el consumo de combustible. A diferencia del algoritmo de Dijkstra original, que se basa en una serie de condiciones de tráfico y una modelización estática de las rutas, el OCW-Dijkstra simplifica la congestión al asumir solo dos estados de tráfico: detenerse y conducir.

El OCW-Dijkstra ofrece varias ventajas significativas:

1. **Optimización del Consumo de Combustible:** Utiliza parámetros como distancia, velocidad, tiempo de conducción, tiempo de ralentí, y el consumo de combustible asociado a cada uno de estos factores para calcular el

consumo total de combustible, lo que permite una reducción en el uso de combustible y en las emisiones.

2. **Actualización en Tiempo Real:** El algoritmo actualiza la base de datos y las matrices de ponderación con nuevos datos después de cada ruta, lo que permite adaptarse a cambios en tiempo real y mejorar continuamente la planificación de rutas.



Figura N° 22. Procesamiento del mapa usando el OCW-Dijkstra de la ciudad de Changchun en China

(Fuente: Zhang et al., 2016)

Capítulo III: Análisis Metodológico

La gestión de recorridos de los vehículos de transporte público en la mayoría de las empresas en la actualidad hace uso de modelos tradicionales y rutinarios como llenados en lista de llegada y salida de vehículos en las estaciones, el marcaje en ciertos paraderos de su hora de llegada, la recaudación diaria (indicador de demanda) y frecuencias históricas que varían entre 4min a 15min normalmente según el día y la hora del día. Con el objetivo de obtener una gestión de recorridos eficiente es necesario optar por nuevas tecnologías que nos ayuden a dar una visión más cercana de los problemas en el transporte público. Se usa la plataforma Arduino para el diseño del GPS, el cual será embebido a los buses, este es un indicador importante para la eficiencia energética y para la gestión de recorridos en vehículos de transporte público. Se hará uso de herramientas de programación en el lenguaje Python para la limpieza de datos y análisis de gráficas. Además del algoritmo de Dijkstra para la predicción de generación de rutas eficientes.

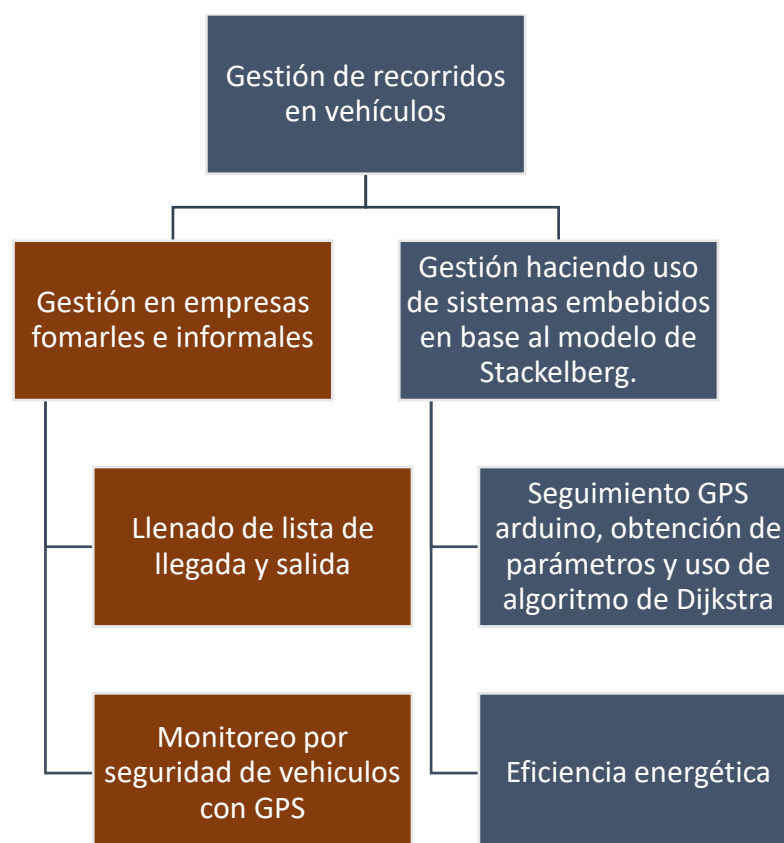


Figura N° 23. Comparación de gestión de vehículos.

(Fuente: Elaboración propia)

3.1 Estudio de la investigación

La presente investigación se describirá el enfoque y nivel de la investigación, diseño de estudio y población y muestra según Hernández – Sampieri et al. (2014)

3.1.1 Enfoque y nivel de la investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo con un nivel exploratoria - descriptiva – correlacional. La variable consumo energético se halla a través de fórmulas que están en función de la velocidad las cuales están relacionadas de manera predecible; sin embargo, se analizará la normalidad de los datos de velocidad para poder obtener una relación numérica a través de una regresión lineal entre las variables. Según su lógica es deductiva porque se tiene principios generales para llegar a conclusiones específicas en cada ruta estudiada. Según su resultado se clasifica como aplicada porque se va a resolver el problema de la mejora de la eficiencia energética en las rutas de estudio.

3.1.2 Diseño del estudio

Para esta investigación, se tiene un diseño no experimental – transversal ya que se basa en la observación y análisis de datos sin manipulación activa de las variables en un punto específico en el tiempo para evaluar el consumo energético y la gestión de recorridos.

3.1.3 Población y muestra

En la investigación se desea analizar el consumo energético de buses de transporte público en vías de Lima, se delimita la investigación en 3 rutas de 2 empresas de transporte.

En relación con lo mencionado en el párrafo anterior, se identifica la población como los buses de transporte público en las 3 rutas de estudio, y la muestra son los cuatro buses de transporte público cubriendo tales rutas como se muestra en la siguiente Tabla N° 1.

Tabla N° 1. Población y muestra de la investigación

Población	Muestra
Buses de transporte público en 3 rutas	Dos buses en la ruta 1: Jicamarca – Chorrillos (ETUL4 S.A.)
	Un bus en la ruta 2: 404 del Corredor morado
	Un bus en la ruta 3: 412 del Corredor morado

(Fuente: Elaboración propia)

La muestra en estudio es no probabilística del tipo por conveniencia ya que los buses fueron seleccionados en función de la disponibilidad y permisos por parte de la empresa.

3.2 Proceso metodológico general de la investigación

El objetivo es definir los pasos a seguir para la gestión de recorridos apropiado. Cada paso tiene procesos a seguir y herramientas a utilizar como se muestra en la Figura N° 24

- Paso 0: Definición de datos
- Paso 1: Recolección de datos
- Paso 2: Data Analytics (pre procesamiento)
- Paso 3: Limpieza y orden de datos
- Paso 4: Definición de parámetros
- Paso 5: Estructuración de los datos
- Paso 6: Análisis de los datos
- Paso 7: Generación y análisis de las gráficas
- Paso 8: Gestión de recorridos. Propuesta de alternativas
- Paso 9: Evaluación a través del Algoritmo de Dijkstra
- Paso 10: Eficiencia energética



Figura N° 24. Proceso metodológico.

(Fuente: Elaboración propia)

3.2.1 Recolección de datos.

Según Hernández – Sampieri et al. (2014), la técnica de recolección de datos se clasifica como observación estructurada mediante dispositivos tecnológicos ya que se emplea sistemas embebidos GPS Arduino, además son datos objetivos y cuantitativos sin intervención directa. Para el paso del 2 de preprocesamiento se utiliza los softwares de Python y Qgis.

La toma de datos se hizo aproximadamente por 1 mes en cada vehículo. Se empieza por la instalación de estos equipos por debajo de los carros, este es el día 0; luego, el día 1 empieza el registro de los datos. La batería de 20 mAh dura aproximadamente para 3 días de toma de datos, por ello se recoge la data de las

memorias cada 3 días en cada vehículo, y se cambia la batería y memoria para los siguientes 3 días de toma de datos.

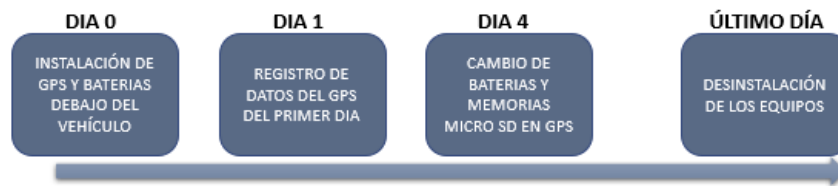


Figura N° 25. Proceso Metodológico de toma de datos de posicionamiento.

(Fuente: Elaboración propia)

Para el paso 3 de limpieza y orden de datos, se hace uso de lenguaje de programación en Python y las herramientas del Qgis. Se reconoce y se trata los outliers e inliers para luego corregir los recorridos. Se detalla los pasos a seguir en la siguiente Figura N° 26.



Figura N° 26. Proceso de limpieza de data

(Fuente: Elaboración propia)

- Data primitiva se considera a la data recolectada y almacenada después del preprocesamiento
- La data con primera limpieza se considera a la data seleccionada y tratada de datos anómalos identificados en el proceso de verificación en el preprocesamiento.
- La data con segunda limpieza es la data seleccionada sin outliers e inliers con respecto a las rutas de estudio.
- La data con tercera limpieza es la data seleccionada sin outliers e inliers con respecto a la velocidad.
- La data final se refiere a la data de estudio con el proceso de imputación de datos faltantes.

3.2.2 Análisis de datos

En esta parte de la investigación se detalla los pasos 4, 5, 6 y 7 como se muestra en la Figura N° 24 del proceso metodológico. Se obtiene los parámetros de distancia, velocidad, aceleración y consumo energético. Se analiza los resultados obtenidos a través del estudio estadístico, luego se realiza las gráficas en 2 y 3

dimensiones de los parámetros, finalmente se obtiene mapas de calor de la velocidad. Estos pasos se detallan en la siguiente figura.

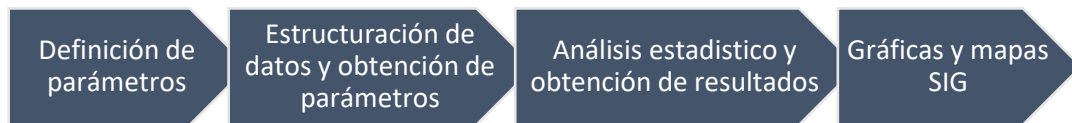


Figura N° 27. Proceso metodológico de análisis de resultados.

(Fuente: Elaboración propia)

3.2.3 Propuesta de gestión de recorridos

En esta parte de la investigación, se detalla los pasos 8, 9 y 10 como se muestra en la Figura N° 24. Para la gestión de recorridos se usa el modelo de Stackelberg y en base al análisis previo de la data se desarrolla las rutas optimas con el Algoritmo de Dijkstra. Finalmente se obtiene cuadros comparativos del consumo energético de la data y del modelo matemático para hallar la eficiencia energética.

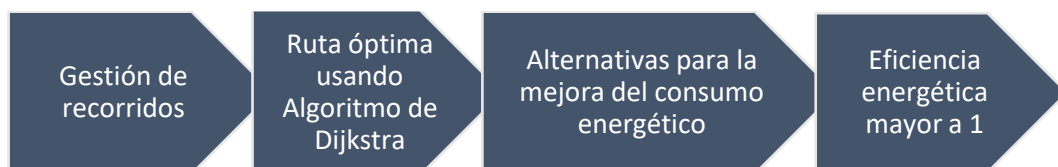


Figura N° 28. Proceso metodológico de la propuesta de gestión de recorridos

(Fuente: Elaboración propia)

3.3 Limitaciones del estudio

Las limitaciones para la investigación se basan en que es una muestra no probabilística y puede limitar la generalización de los resultados en diferentes rutas o tipos de vehículos en Lima.

Capítulo IV: Recolección y procesamiento de datos

4.1 Dispositivo Arduino

4.1.1 Características del dispositivo Arduino GPS

El equipo GPS fue diseñado para ser de fácil instalación en diferentes tipos de vehículos. Es sistema hace uso de placas Arduino los cuales están conectados a sensores GPS y módulos microSD para el almacenamiento de datos.

- Placas Arduino: Actúan como el núcleo del sistema, encargadas de gestionar la interacción con los sensores.
- Sensores GPS: Capturan la información de ubicación (latitud, longitud y altura) y el tiempo (hora y fecha) en tiempo real.
- Módulos microSD: Permiten almacenar los datos recolectados de manera eficiente, lo que facilita el análisis posterior.

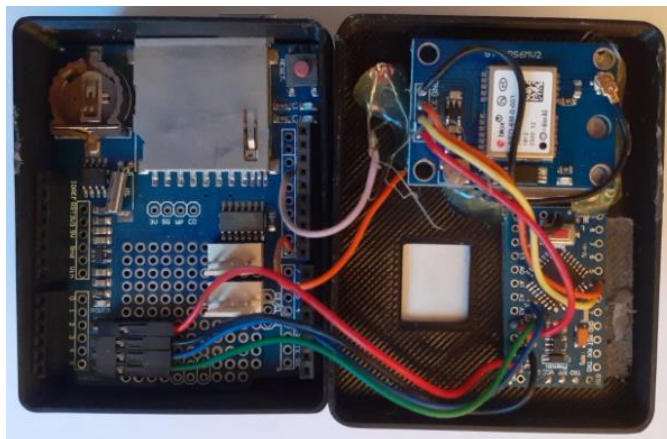


Figura N° 29 Equipo GPS Arduino desarrollado
(Fuente: Elaboración propia)

Desarrollado el dispositivo se conecta con el cable alimentador de energía a la batería externas de 20 000 mAh y una memoria microSD de 32 GB. Este es el equipo final para instalar a los vehículos.



Figura N° 30. Equipo final GPS a instalar en los vehículos

Fuente: Foto por elaboración propia

La distribución final de la instalación de los equipos se muestra en la Figura N°31, las baterías de los GPS se cambian cada 2 días.

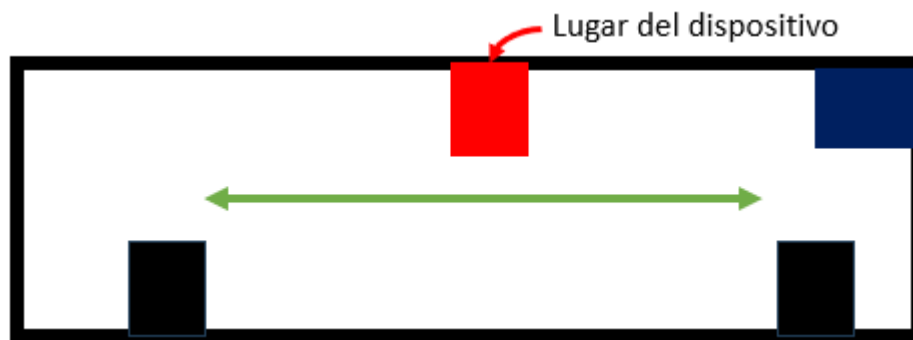


Figura N° 31. Equipo final GPS a instalar en los vehículos

(Fuente: Elaboración Propia)

4.1.2 Costo del ensamble dispositivo Arduino GPS

En esta sección se detallará el costo estimado del prototipo GPS Arduino utilizado para la recolección de datos en los vehículos de transporte público. El prototipo fue diseñado y ensamblado manualmente, con un enfoque en la reducción de costos mediante el uso de componentes accesibles y de bajo costo; y se compara

con un dispositivo GPS comercial. A continuación, se desglosan los principales componentes del prototipo y sus respectivos costos.

El prototipo incluye los siguientes elementos:

Tabla N° 2. Costo del prototipo

DESCRIPCIÓN	COSTO
Arduino UNO	\$8
Antena GPS	\$5
Tarjeta Micro SD	\$8
NEO-6M Placa	\$14
Carcasa Protectora	\$0.5
Cableado y conectores	\$1

(Fuente: Elaboración Propia)

Como se detalla en la Tabla N°2, el costo total del prototipo GPS Arduino es de \$36.5 por prototipo.

Los dispositivos GPS comerciales destinados para el rastreo en flotas de transporte público suelen tener un costo considerablemente más alto debido a su diseño robusto, capacidad de conectividad en tiempo real y características avanzadas de seguimiento. Algunas cotizaciones mencionan precios de \$150 a \$400; lo cual es significativamente menor. Al ser un sistema abierto, el prototipo puede ser fácilmente ajustado según las necesidades del estudio, añadiendo o eliminando funcionalidades de acuerdo con los requerimientos, lo que permite adaptarse mejor a proyectos experimentales o con presupuesto limitado. La implementación de este sistema permite realizar un seguimiento eficiente y de bajo costo en flotas de transporte, brindando la posibilidad de optimizar recorridos sin recurrir a dispositivos GPS comerciales costosos.

4.2 Características de los vehículos

4.2.1 Tipo de vehículo instalado

Para esta investigación, los dispositivos GPS se instalaron en un sólo tipo de vehículos utilizados en el transporte público de Lima:

Autobuses: vehículos de entre 11 a 15 metros de longitud, con capacidad para aproximadamente 50 pasajeros. La Figura N° 32 muestra la clasificación de los buses de transporte público, según la fuente "Revista AUTO CRASH 2016".

Microbús 6 m a 7 m	
Buseta 7 m a 10 m	
Busetón 10 m a 11 m	
Autobús 11 m a 15 m	
Articulado 17 m a 19 m	

Figura N° 32. Clasificación de buses de Transporte Público
(Fuente: Revista Autocrash, 2016)



Figura N° 33. Autobuses usados para la investigación
(Fuente: Investigación Propia)

4.2.2 Características de los vehículos instalados

El coeficiente de rodadura (Crr), según Engineering Toolbox, (2008) en su página, de un bus de 50 pasajeros depende de varios factores como el tipo de neumáticos, la superficie de la carretera, las condiciones ambientales y el inflado de los neumáticos. Sin embargo, se puede estimar un valor típico basándose en estudios de resistencia al rodamiento de vehículos pesados.

Para buses o vehículos de transporte pesado en carreteras pavimentadas y en condiciones normales, el Crr generalmente está en el rango de:

- 0.006 a 0.010 para buses en buen estado y carreteras asfaltadas

Si consideramos un bus con neumáticos estándar y en condiciones normales de operación en carretera:

- Superficie pavimentada seca: $Crr \approx 0.006 - 0.008$
- Superficie mojada o rugosa: $Crr \approx 0.008 - 0.010$

Para los vehículos se toma un Coeficiente de rodadura de neumáticos es 0.0085

El coeficiente aerodinámico (Cd) de un vehículo depende de varios factores, como su diseño, la sección frontal y la resistencia al avance. En el caso de los buses, aunque circulan a velocidades relativamente bajas en comparación con vehículos deportivos, su gran tamaño y forma menos aerodinámica aumentan considerablemente la resistencia al aire.



Figura N° 34. Coeficiente aerodinámico en buses

(Fuente: Adaptado de Aerodyne, 2025)

A partir de la imagen, se ha logrado interpolar el coeficiente aerodinámico de los buses de transporte público, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla

Tabla N° 3. Coeficientes aerodinámicos para los buses de transporte público

VEHICULO	Cd
Bus ETUSA	0.475
Corredor	0.475

(Fuente: Adaptado de Aerodyne, 2025)

Superficie frontal del vehículo: Se procedió a tomar medidas de los buses de las diferentes rutas y se tiene las siguientes áreas frontales:

Tabla N° 4. Área de buses de investigación

VEHICULO	Área
Bus ETUL4 SA	6.33
Corredor	6.14

(Fuente: Investigación Propia)

La masa de los buses se tiene por dato un peso de diecisiete toneladas según el reporte del jefe de operaciones de la empresa ETUL4 S.A.

4.2.3 Instalación de dispositivos Arduino GPS

El sistema embebido compuesto por los GPS Arduino fue instalado con métodos de fijación simple con cintillos de plástico, que aseguran la inmovilidad del sistema ante el recorrido del bus. El cambio de las baterías y memorias se realiza cada dos días siguiendo el mismo procedimiento de instalación como se muestra en la Figura N°36



Figura N° 35. Instalación de equipo GPS

(Fuente: Investigación propia)

4.3 Datos registrados por el GPS

4.3.1 Definición de datos

En este paso 0 de definición de datos, se identifica los datos a necesitar para la investigación. Se programa el sistema Arduino para recolectar la data necesaria y los procesos a seguir.

Los dispositivos GPS instalados en los buses de transporte público proporcionan los siguientes datos:

- Posición: Latitud y Longitud.
- Fecha y hora: Precisión horaria en GMT
- Altura: Elevación respecto al nivel del mar.

La Tabla N°5 muestra los resultados obtenidos por el GPS en un bus de la empresa de transportes "ETUL4 S.A."

Tabla N° 5. Resultados GPS de los buses

	LAT	LON	ALTURA	FECHA Y HORA GMT
0	-12.084229	-76.974311	226.0	03/12/2020 00:12:29
1	-12.084227	-76.974288	225.2	03/12/2020 00:12:30
2	-12.084225	-76.974250	224.2	03/12/2020 00:12:31
3	-12.084227	-76.974235	223.6	03/12/2020 00:12:32
4	-12.084229	-76.974205	223.2	03/12/2020 00:12:33
...	...	...	...	...
83408	-11.935074	-76.965301	459.6	03/12/2020 23:58:44
83409	-11.935077	-76.965301	459.6	03/12/2020 23:58:45
83410	-11.935074	-76.965301	459.7	03/12/2020 23:58:46
83411	-11.935085	-76.965301	460.1	03/12/2020 23:58:47
83412	-11.935085	-76.965301	460.1	03/12/2020 23:58:48

83413 rows x 4 columns

(Fuente: Elaboración Propia)

4.3.2 Recolección de datos

El paso 01 de la investigación refiere a la recolección de datos. Este paso consiste en el proceso de recoger la información dada por el dispositivo GPS Arduino de los cuatro buses de transporte público instalados para la investigación.

Para el estudio se considera 3 rutas:

- Ruta Jicamarca – Chorrillos por la empresa ETUL4 S.A.
- Ruta 404 del Corredor Morado
- Ruta 412 del Corredor Morado

La ruta de Jicamarca – Chorrillos recorre las siguientes avenidas principales mostradas en la Tabla N°6

Tabla N° 6. Recorrido de la Ruta Jicamarca – Chorrillos

Avenida
Fernando Wiese
Próceres de la Independencia
Pirámides del Sol
Vía Evitamiento
Panamericana Sur
Alipio Ponce
Guardia Civil
Defensores del Moro
Alameda Sur
Alameda Ballestas
Alameda los Horizontes

(Fuente: Elaboración Propia)

Se muestra el recorrido en la siguiente Figura N°37.

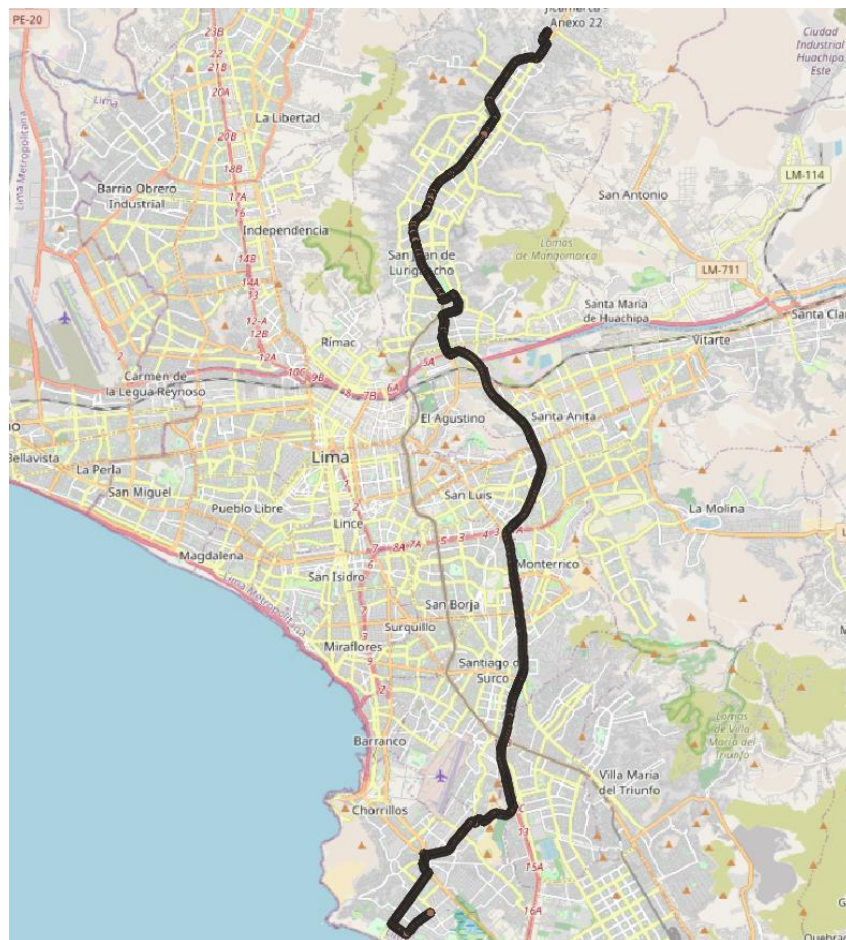


Figura N° 36. Recorrido del bus ETL4 S.A.- San Juan de Lurigancho a Chorrillos

(Fuente: Elaboración Propia)

La ruta 404 del corredor morado recorre las siguientes avenidas mostradas en la Tabla N°7

Tabla N° 7. Recorrido de la ruta 404 del corredor morado

Avenida
Fernando Wiese
Próceres de la Independencia
9 de Octubre
Abancay
Almirante Miguel Grau
Brasil

(Fuente: Investigación Propia)

Se muestra el recorrido en la siguiente Figura N°38



Figura N° 37. Paraderos de la ruta 404 del Corredor Morado.

(Fuente: Elaboración Propia)

La ruta 412 del corredor morado recorre las siguientes avenidas mostradas en la Tabla N°8

Tabla N° 8. Recorrido de la ruta 412 del corredor morado

Avenida
Fernando Wiese
Próceres de la Independencia
Lima
Prolongación Tacna
Tacna

(Fuente: Investigación Propia)

Se muestra el recorrido en la siguiente Figura N°38

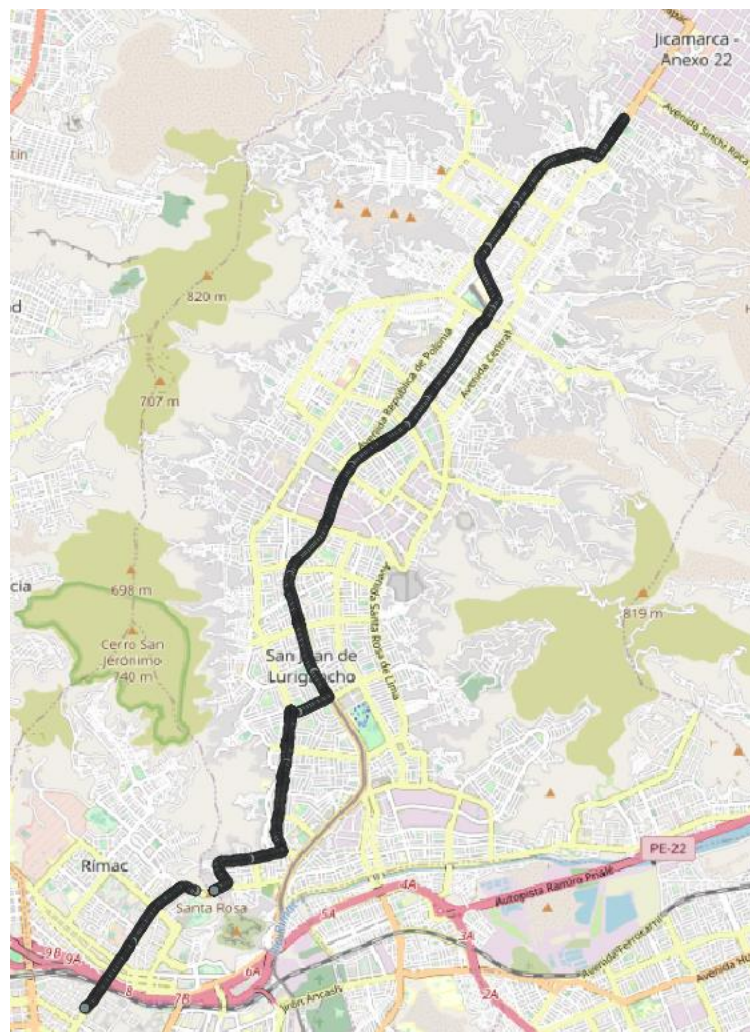


Figura N° 38. Recorrido de la ruta 412 del corredor morado

(Fuente: Investigación propia)

Los paraderos de cada recorrido se detallan en el Anexo A.

Para la investigación, se tiene recolectado para cada ruta la siguiente muestra por vehículo mostrado en la Tabla N°9. La data total se detalla en el Anexo B.

Tabla N° 9. Cantidad de rutas según el bus

Bus – Placa	Ruta	Cantidad de rutas
ANJ – 760	Jicamarca - Chorrillos	81
F5X – 713	Jicamarca - Chorrillos	63
AUY – 879	404 del corredor morado	83
AUY – 879	412 del corredor morado	12
AUZ – 900	412 del corredor morado	29

(Fuente: Elaboración propia)

4.3.3 Preprocesamiento de datos

El preprocesamiento de datos es el paso 02 del proceso metodológico que consiste en el análisis inicial de datos recolectados con el objetivo de obtener una visión general de la información y preparar para el proceso de limpieza de datos.

En este proceso se dan 3 tareas: organizar, explorar y verificar; las cuales aseguran que los datos sean adecuados para el estudio.

4.3.3.1 Organización de los Datos:

El primer paso en el preprocesamiento es organizar los datos de manera que sean legibles y manejables para el análisis posterior. Esto incluye:

- Formateo de fecha y hora: se estandarizan los registros de tiempo en un formato uniforme (YYYY-MM-DD HH:MM), facilitando su análisis.
- Conversión de zonas horarias: los datos de tiempo, inicialmente registrados en formato GMT-0, son convertidos a la zona horaria local de Lima (GMT-5) para que reflejen con precisión el tiempo real de los eventos.

4.3.3.2 Exploración de los Datos:

Una vez organizados, los datos se exploran para obtener una visión inicial de su distribución y comportamiento. Esta exploración incluye:

- Distribución de las posiciones: se mapea la secuencia de coordenadas GPS para verificar si las ubicaciones están dentro del área geográfica esperada (rutas de transporte en Lima). Cualquier desviación importante se marca para una revisión posterior.
- Intervalos de tiempo entre registros: se analiza la frecuencia con la que se tomaron los datos de GPS, asegurando que los intervalos de tiempo entre

registros sean de un segundo o en su defecto razonables sin grandes desviaciones.

- Visualización inicial de las rutas: se crean visualizaciones preliminares (mapas) para observar las rutas de los vehículos y obtener una idea general de la distribución espacial y temporal.

4.3.3.3 Verificación de la Calidad de los Datos:

El siguiente paso es verificar la calidad de los datos para identificar posibles errores o anomalías. La verificación incluye:

- Detección de valores faltantes: se verifica si existen registros incompletos, donde falten datos de tiempo o posición. Los registros faltantes serán marcados para imputación.
- Coherencia temporal: se asegura que los tiempos estén registrados en secuencia cronológica sin saltos inesperados.
- Verificación de coordenadas GPS: se comprueba que las coordenadas GPS sean razonables y coherentes con las ubicaciones reales en Lima, evitando posiciones que caigan fuera del rango geográfico esperado.
- Revisión de intervalos temporales y espaciales: se evalúa la coherencia entre los intervalos de tiempo y los cambios en la posición. Grandes desplazamientos en cortos intervalos de tiempo, o viceversa, son identificados como posibles outliers.



Figura N° 39. Preprocesamiento de datos
(Fuente: Elaboración propia)

4.4 Limpieza de datos

El siguiente proceso de la investigación es el paso 03 de limpieza y orden de datos que permite asegurar la calidad de la información y precisión en los resultados. La limpieza de data se realiza de forma heurística y combina tanto algorítmicos automáticos como intervención manual. Además de la limpieza, se hace un

proceso de imputación de data para que los datos sean continuos y tengan una frecuencia adecuada para el cálculo de consumo energético por ruta.

El enfoque está dividido en dos partes principales: la eliminación de outliers y la eliminación de inliers.

4.4.1 Limpieza de Outliers

Los outliers son puntos de datos que se encuentran fuera de los rangos geográficos o de comportamiento esperados.

- Algoritmos de limpieza automática: Se utilizan algoritmos en Python para eliminar automáticamente los outliers que están fuera del área de estudio, es decir, aquellos puntos de GPS que están significativamente alejados de la ciudad de Lima o de las rutas establecidas. El algoritmo emplea límites de latitud y longitud para filtrar los datos y asegurar que solo se consideren aquellos dentro del área relevante.
- Limpieza manual de outliers cercanos: Después de la limpieza automática, se realiza una revisión manual de los puntos que, aunque geográficamente cercanos a la ruta normal, presentan comportamientos atípicos, como retrocesos o desviaciones notorias del trayecto. Estos puntos se eliminan manualmente bajo el criterio de que los vehículos no deben retroceder ni desviarse de su recorrido lógico.

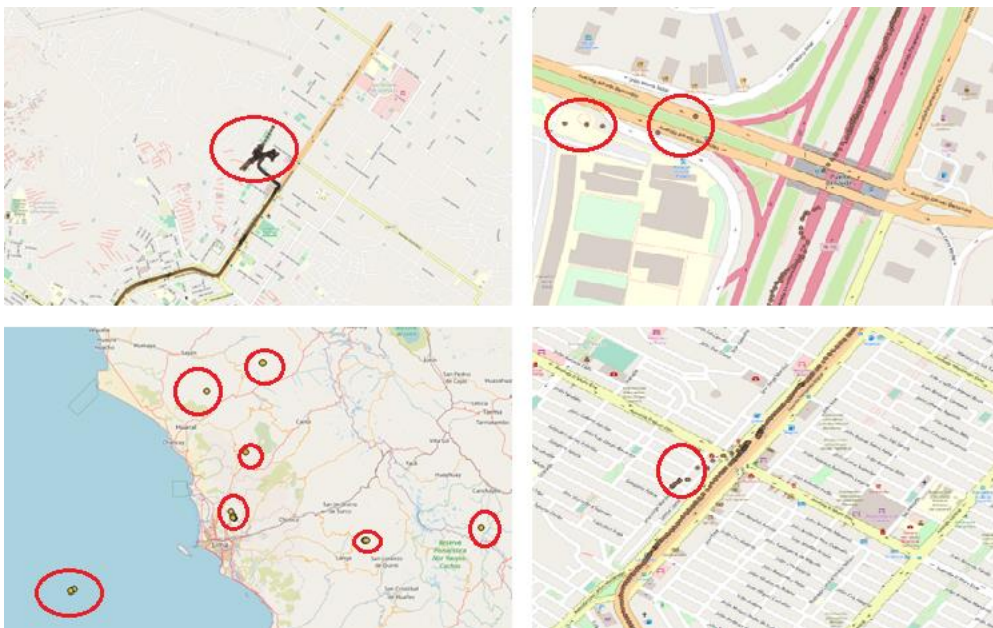


Figura N° 40. Limpieza Manual de Outliers Cercanos

(Fuente: Elaboración propia)

4.4.2 Limpieza de Inliers

Los inliers son puntos de datos que se encuentran dentro del rango esperado, pero que aún pueden mostrar comportamientos anómalos o inconsistentes con la lógica del recorrido. En este trabajo, se emplean tanto códigos en Python como una revisión manual para eliminarlos.

- Limpieza manual inicial: Inicialmente, los inliers se eliminaron manualmente mediante una inspección lógica de los datos. Se identificaron puntos donde el comportamiento del vehículo era inconsistente, como retrocesos inesperados o detenciones prolongadas en lugares que no corresponden al trayecto normal. Sin embargo, tras un análisis más detallado, se detectaron inliers que no habían sido eliminados en esta fase.
- Limpieza con Python: Posteriormente, se implementaron algoritmos en Python para identificar y eliminar automáticamente los inliers que pasaron desapercibidos en la limpieza manual. Estos algoritmos se centraron en eliminar puntos con velocidades incongruentes.

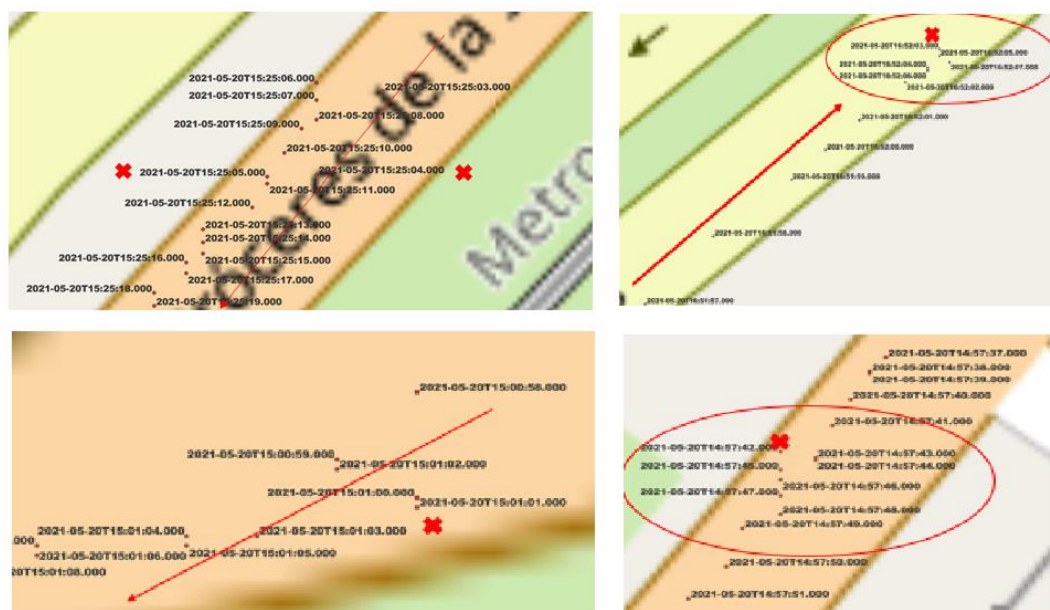


Figura N° 41. Limpieza de inliers con Qgis

(Fuente: Elaboración propia)

4.5 Procesamiento de datos

4.5.1 Definición de parámetros

La definición de parámetros es el paso 04 del proceso de investigación, donde la distancia recorrida, tiempo, velocidad y energía son fundamentales para el análisis

del comportamiento de los vehículos de transporte público y su relación con la eficiencia energética. Los parámetros de distancia recorrida y tiempo son calculados a partir de datos de posición (latitud y longitud) y marcas temporales que proporcionan la base para evaluar el desempeño del vehículo en cada tramo de su recorrido.

- El tiempo entre dos puntos consecutivos en el recorrido del vehículo se obtiene a partir de las marcas temporales (fecha y hora) registradas por el sistema GPS. El tiempo es un parámetro que no solo permite medir la duración total del viaje, sino también determinar el intervalo entre puntos consecutivos.
- La distancia recorrida entre dos puntos se basa en las coordenadas de latitud y longitud proporcionadas por el GPS. Esta distancia representa el desplazamiento real del vehículo en un segmento del recorrido.
- La velocidad promedio es calculada como la razón entre la distancia recorrida y el tiempo de viaje. Este parámetro nos permite analizar el rendimiento de los vehículos en condiciones de tráfico variable y para identificar segmentos de ruta con potenciales problemas de congestión.
- La energía consumida es el parámetro de la variable dependiente para evaluar la eficiencia energética de cada ruta. El cálculo de esta variable se basa en el uso de los datos de velocidad y aceleración, además de parámetros como la resistencia aerodinámica, la fricción y la masa del vehículo.

Tabla N° 10. Coeficiente de fricción y densidad del aire

Coeficiente	Valor	Unidad
u (fricción)	0.0085	
p (densidad del aire)	1.12	Kg/m ³

(Fuente: Becerra et al., 2003)

El análisis de la energía consumida permite evaluar qué rutas o segmentos específicos consumen más energía, lo que puede ayudar a identificar posibles mejoras en la planificación de las rutas para aumentar la eficiencia energética.

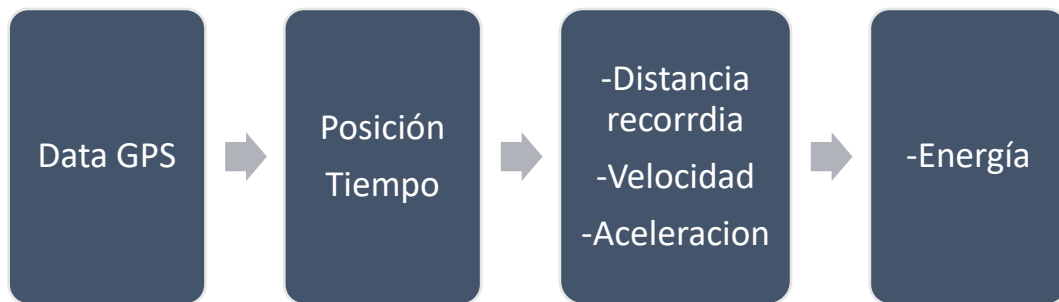


Figura N° 42. Obtención de Variables

(Fuente: Elaboración propia)

4.5.2 Estructuración de los datos

La estructuración de datos es el paso 05 de la investigación que permite procesar la información por ruta y bus. También definir las con los parámetros a analizar.

4.5.2.1 Muestra de datos

Los datos corresponden a las rutas:

- Jicamarca – Chorrillos
- Ruta 404 del corredor morado
- Ruta 412 del corredor morado

Se detalla la muestra del primer recorrido en la Tabla N°10

Tabla N° 11. Ruta Jicamarca - Chorrillos

FECHA	IDA	VUELTA
15/05/2021	1	0
18/05/2021	1	0
19/05/2021	1	0
20/05/2021	7	7
21/05/2021	2	2
22/05/2021	3	3
23/05/2021	0	1
25/05/2021	3	3
26/05/2021	4	2
27/05/2021	7	8
28/05/2021	1	1
29/05/2021	2	1
1/06/2021	0	1
4/06/2021	2	2
5/06/2021	4	4
7/06/2021	2	1

8/06/2021	5	3
9/06/2021	3	3
10/06/2021	2	2
11/06/2021	3	2
12/06/2021	1	1
14/06/2021	3	2
15/06/2021	7	7
16/06/2021	3	4
17/06/2021	5	3
18/06/2021	3	3
19/06/2021	1	2

(Fuente: Elaboración propia)

Se detalla la muestra del segundo recorrido en la Tabla N° 11

Tabla N° 12.Ruta 404 del corredor morado

FECHA	IDA	VUELTA
26/05/2021	3	1
27/05/2021	4	4
28/05/2021	4	3
30/05/2021	6	6
31/05/2021	4	5
2/06/2021	2	2
3/06/2021	4	4
5/06/2021	4	4
8/06/2021	5	5
9/06/2021	4	4
10/06/2021	3	3

(Fuente: Elaboración propia)

Se detalla la muestra del tercer recorrido en la Tabla N°12

Tabla N° 13. Ruta 412 del corredor morado

FECHA	IDA	VUELTA
20/05/2021	6	6
21/05/2021	3	3
22/05/2021	4	4
24/05/2021	1	1
26/05/2021	1	2
31/05/2021	2	4
2/06/2021	0	1
3/06/2021	0	1
8/06/2021	0	1
9/06/2021	0	1
10/06/2021	0	1

(Fuente: Elaboración propia)

4.5.2.2 Ocupación vehicular

Para la ocupación vehicular para el cálculo de la energía se considera el promedio de 28 pasajeros para la ruta 1, 38 para la ruta 3 y 28 para la ruta 3, debido a la subida y bajada constante en cada paradero y la cantidad de asientos disponibles en el bus. La masa es directamente proporcional a la energía de circulación, por ende, si hay cambios la energía también debería cambiar.

Si bien el alcance de esta investigación no hace mención el estudio de la demanda, se realizó el procesamiento de datos de ocupación vehicular de la ruta 404 del corredor morado a las 7pm del lunes 31 de mayo del 2021 siendo los resultados:

Tabla N° 14. Valores de ocupación vehicular de la ruta 404 del corredor morado

Indicador	Valor
Máximo	65
Mínimo	0
Promedio	38
Capacidad	50

(Fuente: Elaboración propia)

La masa de los pasajeros podría llegar a más de 20% de la masa del vehículo sin pasajeros, lo cual nos da un índice no tan incidente en el estudio del consumo energético.

La data final estructurada para su análisis quedaría como se detalla en la siguiente Tabla N°15

Tabla N° 15. Data estructurada final

Ruta	Latitud	Longitud	Fecha y hora	Distancia (m)	Velocidad (KPH)	Energía Total (KJ)
404	-11.93	-76.969	1/6/21 8:15:10	10	15	50000
404	-11.94	-76.970	1/6/21 8:15:11	15	30	55000

(Fuente: Elaboración propia)

La velocidad, y energía consumida se calculó en base a las fórmulas descritas anteriormente:

- Potencia de Circulación (P_b): $P_b = \frac{1}{2} * m * \frac{v^3}{d}$

Donde:

m = masa del vehículo (kg)

v = velocidad del vehículo $\left(\frac{m}{s}\right)$

d = distancia recorrida (m)

- Potencia Aerodinámica (P_a): $P_a = \frac{1}{2} * C_d * A * p * v^3$

Donde:

p = densidad del aire $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

C_d = coeficiente de arrastre

A = superficie frontal del vehículo (m^2)

- Potencia de Fricción (P_f): $P_f = u * m * g * v$

Donde:

u = resistencia de rodadura

g = aceleración de la gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

La energía total consumida por recorrido es la suma de las potencias por segundo en el total del tramo.

Capítulo V: Análisis y diagnóstico de resultados

En este capítulo se desarrolla el análisis de los resultados de los recorridos de los buses de transporte público estudiados.

5.1 Relación de velocidad y consumo energético

En la presente investigación se tiene como objeto de estudio desarrollar la correlación existente entre la velocidad y el consumo energético total. Para analizar la correlación se desarrolla el modelo de regresión cúbica.

5.1.1 Normalidad de Velocidades

Para determinar si un conjunto de datos específicos sigue una distribución normal, se utiliza un procedimiento de bondad de ajuste aplicado a cada muestra seleccionada por ruta. Existen diferentes métodos para comprobar la normalidad de los datos, entre los cuales destacan las pruebas de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para tamaños de muestra superiores a 50, y Shapiro-Wilk (S-W) para tamaños inferiores a 50. Estos métodos permiten generar gráficos de normalidad y realizar un contraste de hipótesis, facilitando así la decisión sobre la normalidad de la distribución. Dado que en cada ruta la muestra es mayor de 50, se optó por utilizar la prueba de Kolmogorov - Smirnov (KS).

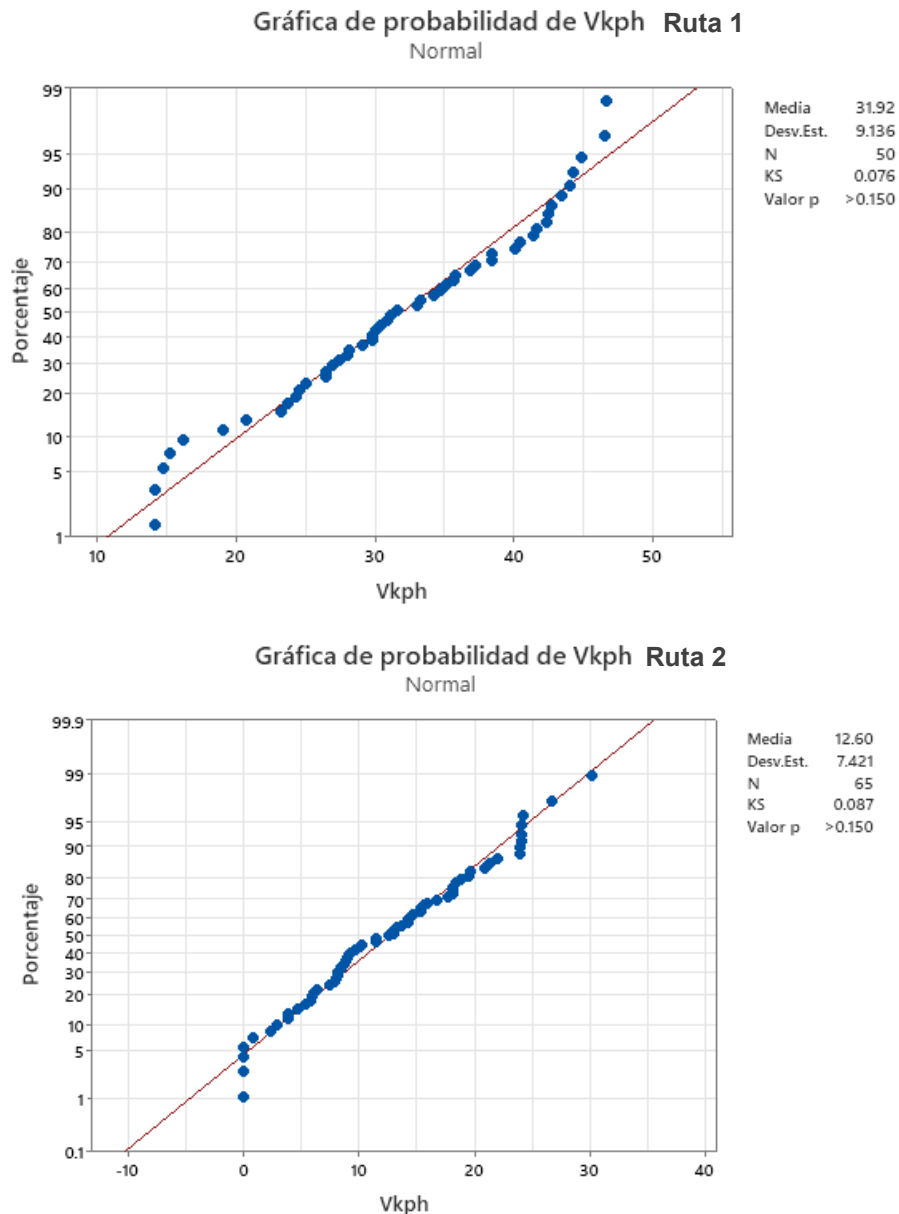
En la prueba no paramétrica seleccionada, la hipótesis nula (H_0) plantea que los datos siguen una distribución homogénea, y será rechazada si el valor p es menor a 0.05. Por consiguiente, para confirmar que la muestra analizada sigue una distribución normal, el nivel de significancia debe ser igual o superior a 0.05.

Para la ruta de Jicamarca a Chorrillos, el jueves 10 de junio del 2021 a las 7:00pm se verifica la prueba de normalidad con un KS – p_{valor} mayor a 0.150, aceptando la hipótesis nula (H_0) que sigue una distribución homogénea.

Para la ruta 404 del corredor morado de Jicamarca a Magdalena, el jueves 03 de junio del 2021 a las 6:00pm se verifica la prueba de normalidad con un KS – p_{valor} mayor 0.150, aceptando la hipótesis nula (H_0) que sigue una distribución homogénea.

Para la ruta 412 del corredor morado de Jicamarca a Av. Ica, el jueves 20 de mayo del 2021 a las 11:00am, se verifica la prueba de normalidad con un KS – p_{valor} de 0.055, aceptando la hipótesis nula (H_0) que sigue una distribución homogénea.

Como se observa en la Figura N° 43 , en relación con la significación, es decir, el valor p necesario para validar que la muestra sigue una distribución normal, se obtiene un valor superior a 0.05, esto implica que se acepta la hipótesis nula. Por lo tanto, con base en estos resultados, es posible generalizar los datos obtenidos.



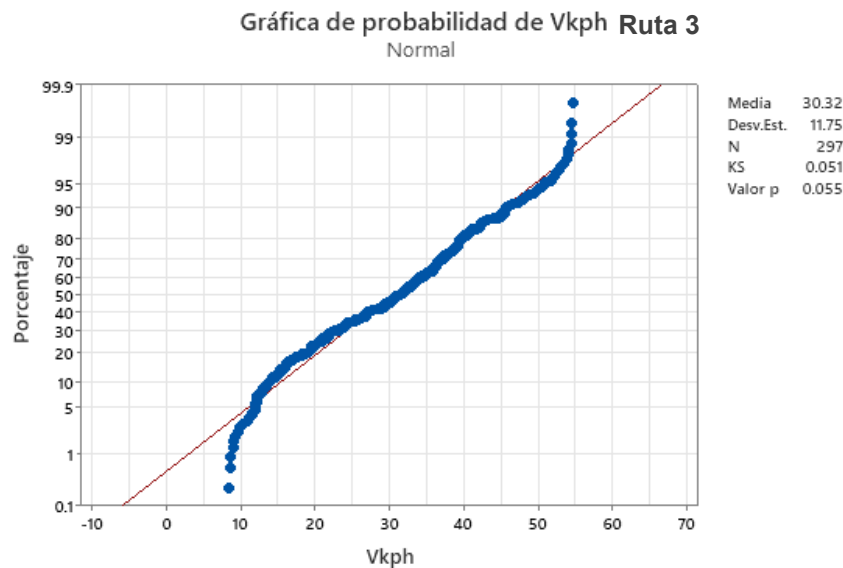


Figura N° 43. Normalidad de datos en las 3 rutas de estudio

(Fuente: Elaboración propia)

En este contexto, se concluye que los datos recopilados presentan una distribución normal.

5.1.2 Relación velocidad – energía

Dado que el modelo es determinístico, ya que sigue una formula planteada para hallar la energía en cada punto a través de una formula en función de la velocidad, se halla una regresión cúbica para tener los coeficientes más exactos de cuanto varia la energía respecto a la velocidad con las condiciones planteadas.

Para confirmar la relación y que el modelo planteado sea el correcto, se tiene como datos el consumo de combustible de los buses por recorrido y el porcentaje de eficiencia del motor de estos buses que varía entre 20 y 30%.

Se obtiene la energía media consumida por recorridos como se presenta en la siguiente Tabla N°16. Esta parte de la investigación será estudiada más a detalle en el subcapítulo 5.4 Consumo energético total

Tabla N° 16. Energía promedio consumido por ruta en MJ

	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3
Energía mediana (MJ)	508.83	299.12	200.51
Recorrido (Km)	40.1	24.1	16.7
Energía/Recorrido (MJ/Km)	12.7	12.4	12.0

(Fuente: Elaboración propia)

Se convierte de Kilowatts hora a litros de petróleo (combustible usado por los buses) según la Tabla N°17.

Tabla N° 17. Conversión de Kwh a litro del petróleo pesado

Tipo de combustible	Unidad de medida	Kwh
Petróleo pesado	1 litro (l)	11.84

(Fuente: The Environmental Association for Universities and Colleges, 2010)

Los litros consumidos por un recorrido se hallan dividiendo la energía en kilowatts hora entre la equivalencia mostrada en la tabla N°17.

Tabla N° 18. Litros por un recorrido en cada ruta estudiada con los datos obtenidos de los buses

	MJ	kWh	Lts (energía consumida)
Ruta 1	508.83	141.3	11.9
Ruta 2	299.12	83.1	7.0
Ruta 3	200.51	55.7	4.7

(Fuente: Elaboración propia)

Según datos de los grifos, cada tancada rinde una cantidad de recorridos mostrados en la Tabla N°19.

Tabla N° 19. Litros por un recorrido de las rutas estudiadas según consumo de petróleo

	1 Tancada (Lts)	Recorridos	Lts (energía embarcada)
Ruta 1	216	5	43.2
Ruta 2	216	8	27
Ruta 3	216	12	18

(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente se halla la eficiencia del motor comparando la cantidad de litro consumidos dado por la data (energía consumida) y por consumo de petróleo (energía embarcada) como muestra en la Tabla N°20.

Tabla N° 20. Eficiencia del motor acorde a los datos obtenidos de los buses vs consumo de petróleo

	Lts (energía consumida) Datos	Lts (energía embarcada) Combustible	Eficiencia Motor
Ruta 1	11.9	43.2	28%
Ruta 2	7.0	27	26%
Ruta 3	4.7	18	26%

(Fuente: Elaboración propia)

Por ende, como se muestra en los resultados; la eficiencia del motor está en los límites mencionados y se verifica la validez del modelo.

5.1.2.1 Regresión cúbica en la ruta Jicamarca – Chorrillos

Se detalla los resultados del modelo de regresión cúbica en la siguiente Figura N° 44 para la ruta Jicamarca – Chorrillos.

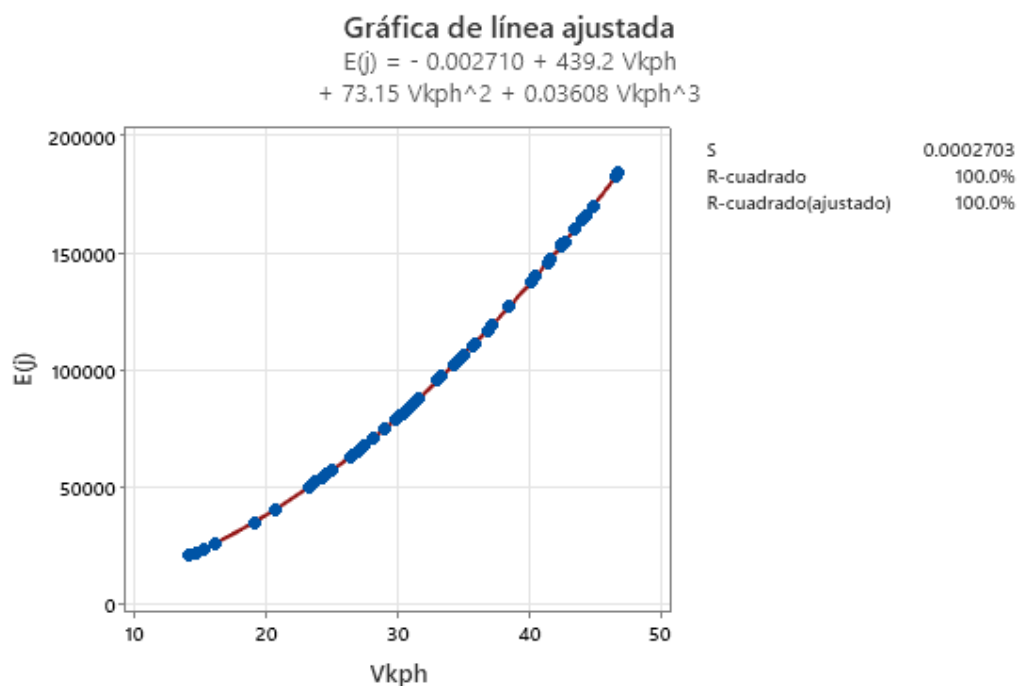


Figura N° 44. Modelo de regresión cúbica de ruta Jicamarca – Chorrillos
(Fuente: Elaboración propia)

Como se detalla en la Figura N°44, el intercepto tiene un valor de -0.002710, y el exponente cúbico de la velocidad en kilómetros tiene un valor de 0.03608. La ecuación para el comportamiento del presente recorrido es:

$$E(j) = -0.002710 + 439.2 * Vkph + 73.15 * Vkph^2 + 0.03608 * Vkph^3$$

El modelo muestra que, por cada incremento en la velocidad, el consumo energético aumenta significativamente.

Se tiene un ajuste robusto ($R^2 = 100\%$). El intercepto de menor valor, indica la tendencia a cero cuando la velocidad es cero.

Tabla N° 21. Calidez de ajuste del modelo de la ruta Jicamarca - Chorrillos

S	R- cuadrado	R-cuadrado (ajustado)
0.0002703	100.00%	100.00%

(Fuente: Elaboración propia)

Esto indica que no solo la velocidad tiene un impacto directo en el consumo, sino que el incremento de velocidad a un ritmo acelerado también eleva el gasto energético.

Dentro de los supuestos de la regresión cúbica se tiene:

- Relación funcional adecuada (que tenga la forma cúbica de curva)
- Normalidad de residuos
- Aleatoriedad de residuos
- No multicolinealidad VIF (relación de variables)
- Homocedasticidad
- Combinación lineal de parámetros (ecuación cúbica coherente)

Para el análisis cumple todos los supuestos.

La relación funcional se justifica con el ajuste perfecto del modelo cubico y con los puntos sobre la curva. La normalidad de residuos alcanza un valor “p” encima de 0.150, con lo cual se justifica la normalidad como se muestra en la siguiente Figura N° 45.

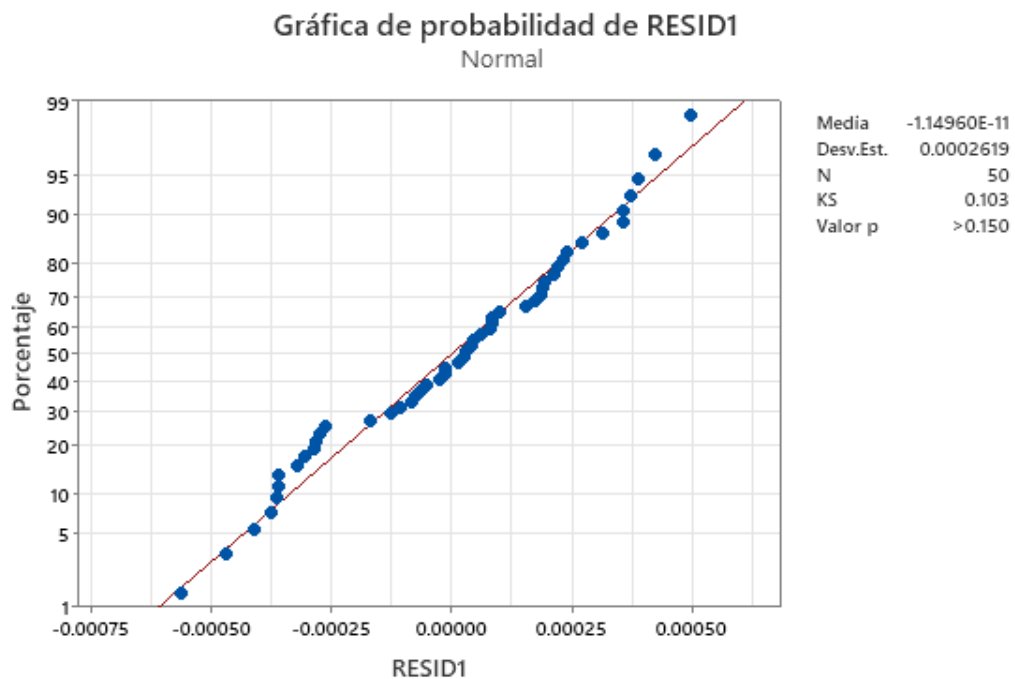


Figura N° 45. Probabilidad del Residuo de datos de la ruta Jicamarca - Chorrillos

(Fuente: Elaboración propia)

La aleatoriedad de residuos y la no multicolinealidad se justifica con el análisis de la siguiente Figura N° , donde se observa que los residuos tienen diferentes valores sin un orden lineal y con valores en un rango pequeño de 0.001 de amplitud.

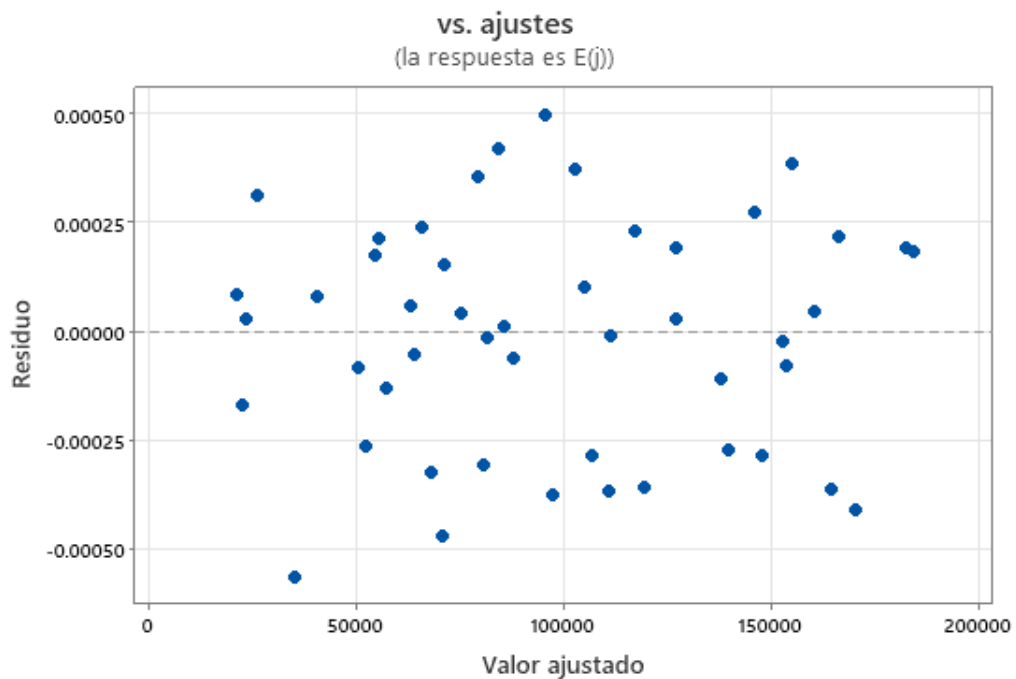


Figura N° 46. Aleatoriedad de residuos de la ruta Jicamarca - Chorrillos

(Fuente: Elaboración propia)

La homocedasticidad de las variables velocidad en kph, distancia en metros y energía se justifica porque los intervalos se traslapan entre sí, lo cual es un indicativo de homocedasticidad como se muestra en la Figura N° 47.

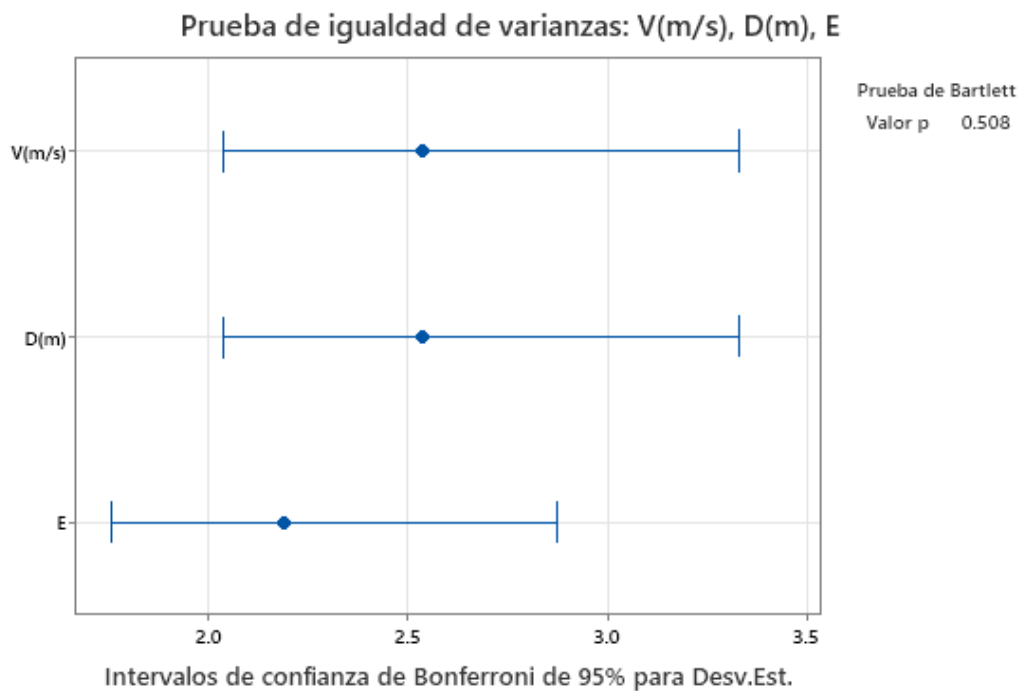


Figura N° 47. Homocedasticidad de datos de la ruta Jicamarca - Chorrillos

(Fuente: Elaboración propia)

Por último, la relación lineal de variables se justifica con la ecuación encontrada con un R robusto de 100%.

5.1.2.2 Regresión cúbica ponderada en la ruta 404 del corredor morado

Se detalla los resultados del modelo de regresión cúbica en la siguiente Figura N° 48 para la ruta 404 del corredor morado

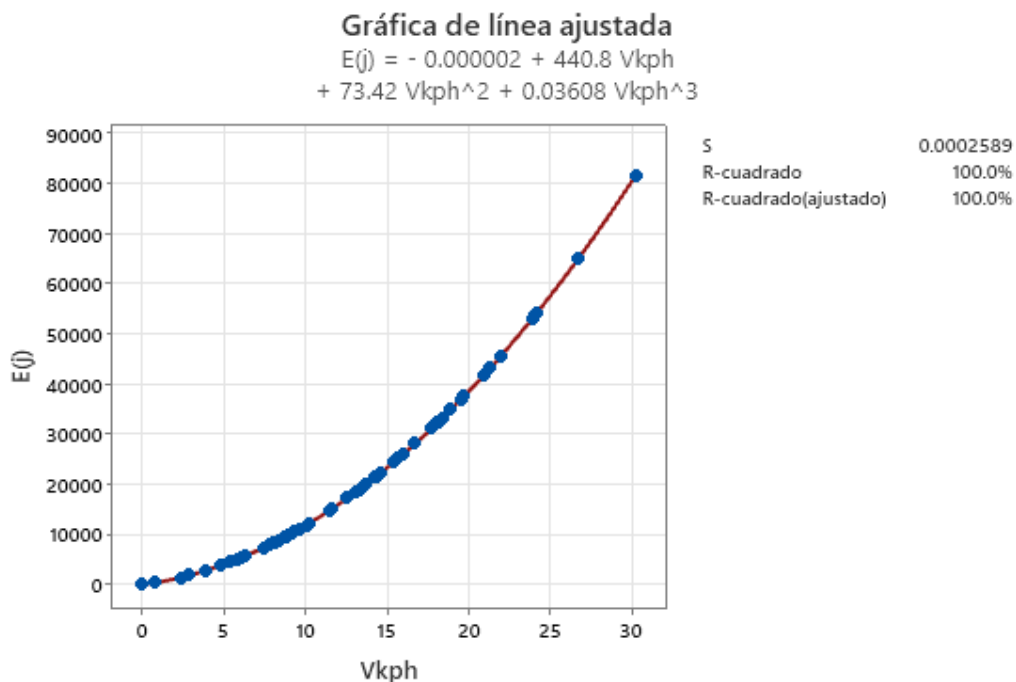


Figura N° 48. Resultados de regresión cúbica de la ruta 404 del corredor morado

(Fuente: Elaboración propia)

Como se detalla en la Figura N° 48, el intercepto tiene un valor de 0.000105, y el exponente cúbico de la velocidad en kilómetros tiene un valor de 0.03608. La ecuación para el comportamiento del presente recorrido es:

$$E_{(j)} = -0.000002 + 440.8 * \text{Vmph} + 73.42 * \text{Vmph}^2 + 0.03608 * \text{Vmph}^3$$

Al igual que el modelo anterior muestra que, por cada incremento en la velocidad, el consumo energético aumenta significativamente.

Se tiene un ajuste robusto ($R^2 = 100\%$). El intercepto de menor valor, indica la tendencia a cero cuando la velocidad es cero.

Tabla N° 22. Validez del modelo de la ruta 404 del corredor morado

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)
0.0002589	100.00%	100.00%

(Fuente: Elaboración propia)

Se llega a las mismas conclusiones que la ruta anterior.

5.1.2.3 Regresión cúbica ponderada en la ruta 412 del corredor morado

Se detalla los resultados del modelo de regresión cúbica en la siguiente Figura N° 49 para la ruta 412 del corredor morado.

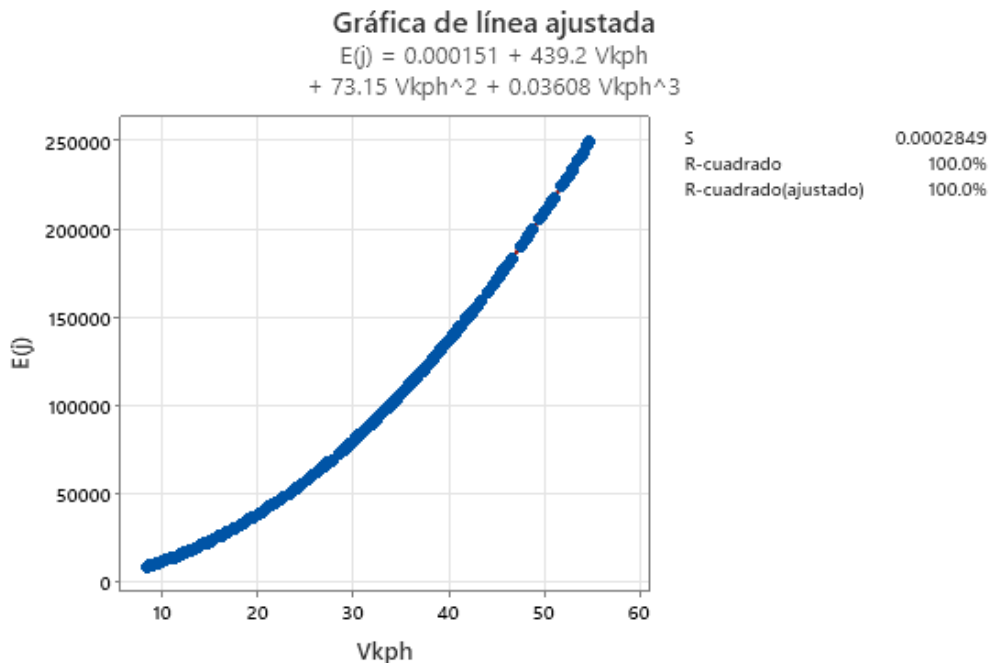


Figura N° 49. Resumen regresión cubica de la ruta 412 del corredor morado

(Fuente: Elaboración propia)

Como se detalla en la Figura N°49, el intercepto tiene un valor de 0.000151, y el exponente cúbico de la velocidad en kilómetros tiene un valor de 0.03608. La ecuación para el comportamiento del presente recorrido es:

$$E(j) = 0.000151 + 439.2 * Vkph + 73.15 * Vkph^2 + 0.03608 * Vkph^3$$

Al igual que los modelos anteriores muestra que, por cada incremento en la velocidad, el consumo energético aumenta significativamente.

Se tiene un ajuste robusto ($R^2 = 100\%$). El intercepto de menor valor, indica la tendencia a cero cuando la velocidad es cero.

Tabla N° 23. Validez del modelo de la ruta 412 del corredor morado

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)
0.0002849	100.00%	100.00%

(Fuente: Elaboración propia)

Se llega a las mismas conclusiones que las rutas anteriores.

Se presenta la siguiente Tabla N°24 con el resumen de los modelos empleados para analizar la correlación entre la velocidad y el consumo energético de las rutas estudiadas.

Tabla N° 24. Comparación de los modelos empleados en las 3 rutas estudiadas

MODELO	PREDICTOR	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3
Cúbico	Intercepto	-0.002710	-0.000002	0.000151
	Velocidad	439.2	440.8	439.2
	Velocidad ²	73.15	73.42	73.15
	Velocidad ³	0.03608	0.03608	0.03608

(Fuente: Elaboración propia)

Los valores de las rutas tienen similitudes en el intercepto con tendencia a cero y valores iguales en los coeficientes lineal, cuadrático y cúbico, confirmando el comportamiento de incremento de consumo energético respecto a la velocidad.

5.2 Análisis de parámetros

El uso del GPS Arduino nos permite caracterizar el recorrido de los buses de transporte público a través de los parámetros de distancia recorrida, velocidad, aceleraciones y consumo energético.

5.2.1 Análisis de velocidades

El gráfico de cajas muestra la distribución de las velocidades (en KPH) por cada hora del día. En general, la velocidad tiene mayor dispersión entre las horas de la madrugada (3:00 a 6:00), donde también se observan valores atípicos más pronunciados, sugiriendo que los vehículos tienden a alcanzar mayores velocidades durante ese periodo. A medida que avanzan las horas del día, la velocidad media tiende a estabilizarse entre 20 y 40 KPH, con menos dispersión entre los cuartiles y una mayor concentración de datos. Durante las horas pico (7:00 a 8:00 am, 2:00 a 3 pm y 5:00 a 7:00 pm), hay una disminución en la velocidad, probablemente debido a un aumento del tráfico y comportamiento del conductor.

Se presenta la distribución de las velocidades en KPH de la ruta 1, Jicamarca – Chorrillos en la siguiente Figura N°50.

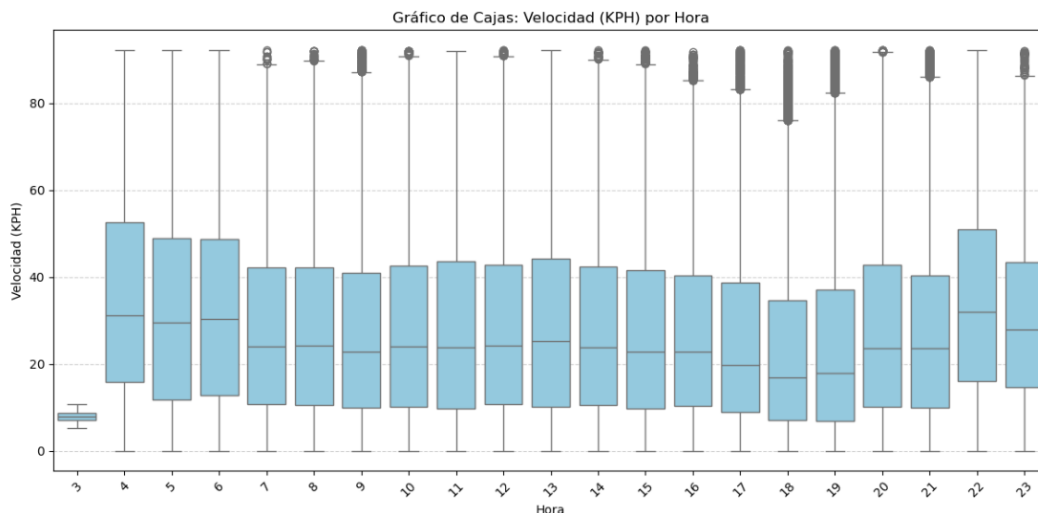


Figura N° 50. Distribución KPH de la ruta Jicamarca - Chorrillos
(Fuente: Elaboración propia)

En la distribución KPH de promedio cada 10min de la ruta Jicamarca – Chorrillos se aprecia con mayor exactitud las horas de congestión y flujo libre como se muestra en la siguiente Figura N° 51.

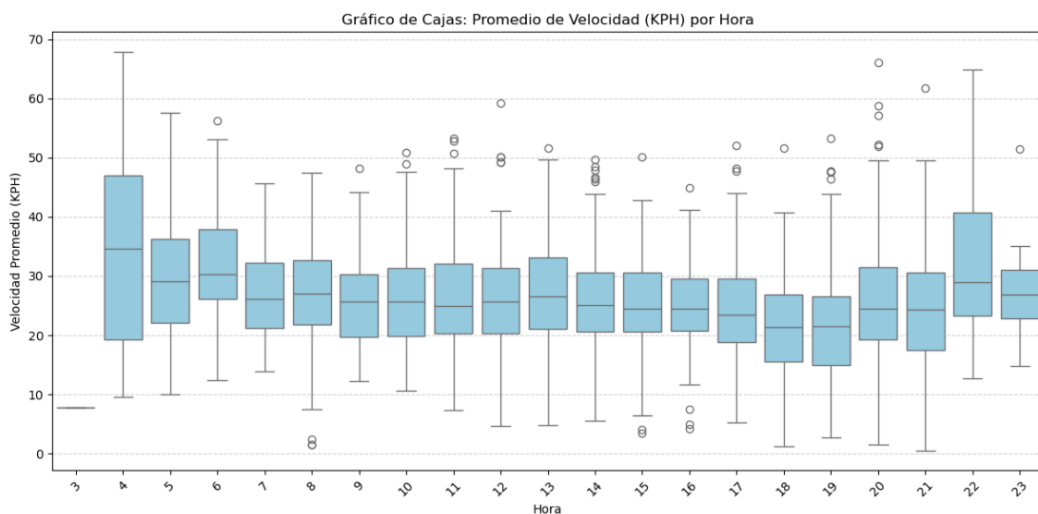


Figura N° 51. Distribución KPH de la ruta Jicamarca – Chorrillos en promedio de 10min de la ruta Jicamarca – Chorrillos.

(Fuente: Elaboración propia)

Las horas de flujo libre son 4:00am, 5:00am, 6:00am, 22:00pm, y 23:00pm. Se parecía horas extremas del día donde las velocidades promedio pueden alcanzar velocidades mayores a 30kph con picos altos de casi 70kph. Las demás horas varían en intervalos menores a 20 kph y 30 kph.

Como en la distribución anterior, se presenta el mismo comportamiento para la ruta 404 del corredor morado, presentando horas pico entre las 8:00 a 11 am, 1:00 a 3:00pm y de 5:00 a 8:00pm.

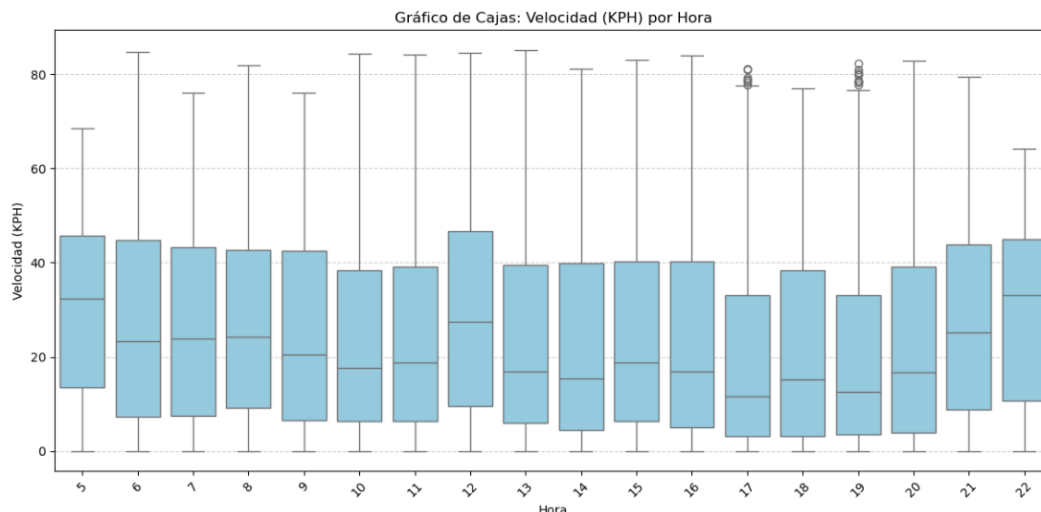


Figura N° 52. Distribución KPH de la ruta 404 del corredor morado

(Fuente: Elaboración propia)

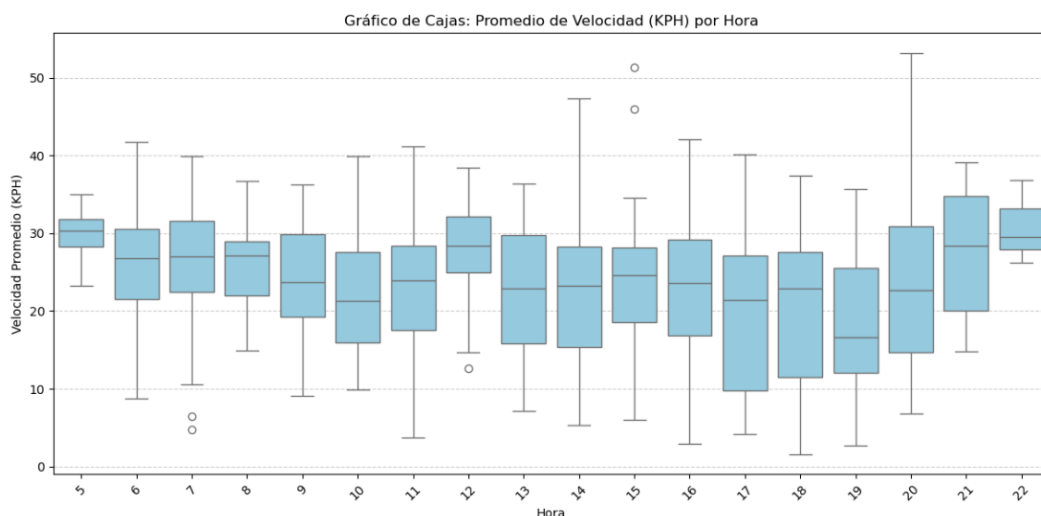


Figura N° 53. Distribución KPH de la ruta 404 del corredor morado en promedio de 10min de la ruta Jicamarca – Chorrillos.

(Fuente: Elaboración propia)

Las horas de flujo libre son 4:00am, 5:00am, 6:00am, 21:00pm, y 22:00pm. Se parecía horas extremas del día donde las velocidades promedio pueden alcanzar velocidades mayores a 30kph con picos altos de casi 50kph. Las demás horas varían en intervalos menores a 20 kph siendo la hora de mayor congestión a las 19 horas.

Para la ruta 412 del corredor morado, presenta un comportamiento similar a la ruta 404 del corredor morado como se muestra en la siguiente distribución.

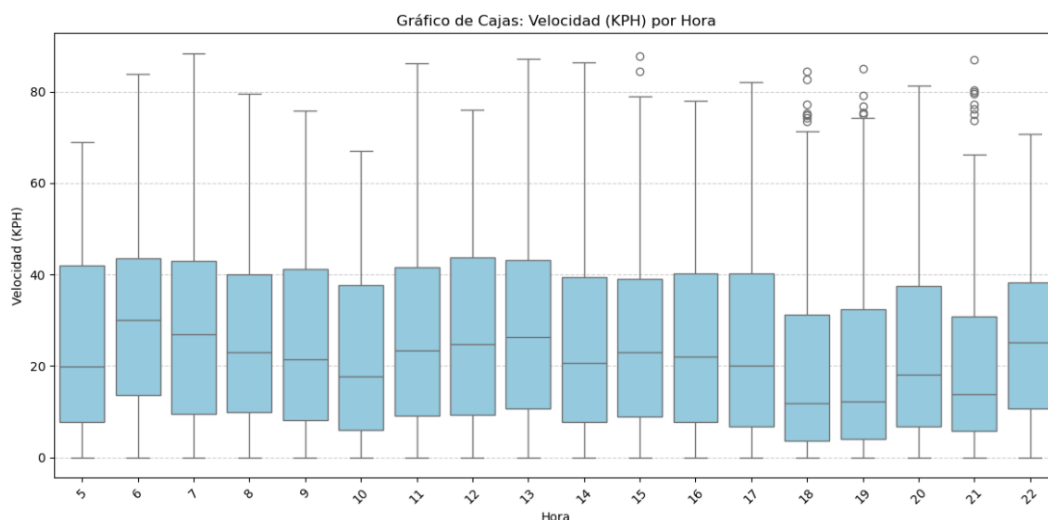
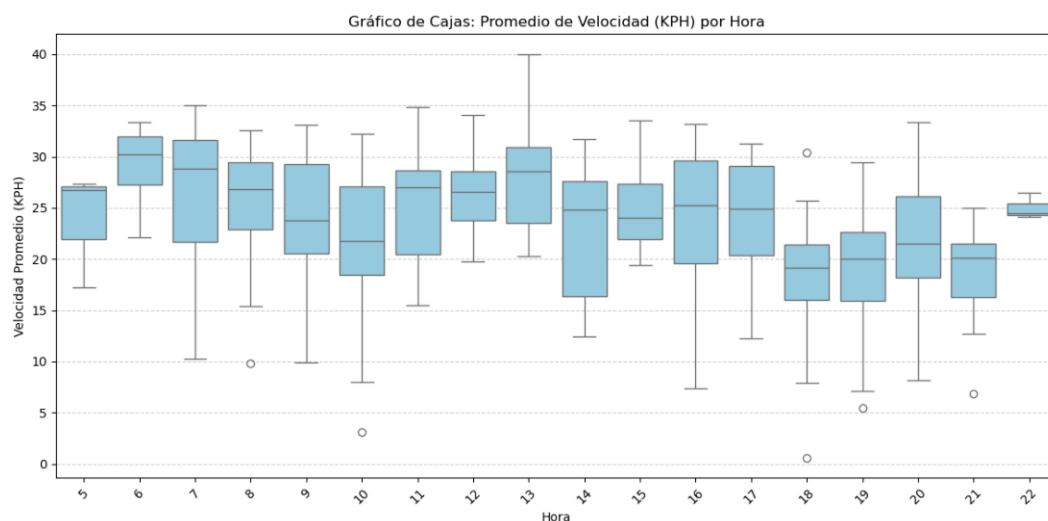


Figura N° 54. Distribución KPH de la ruta 412 del corredor morado

(Fuente: Elaboración propia)



(Fuente: Elaboración propia)

Las horas de flujo libre son 6:00am y 22:00pm. Se parecía horas extremas del día donde las velocidades promedio pueden alcanzar velocidades mayores a 25kph con picos altos de casi 40kph. Las demás horas varían en intervalos menores a 20 kph siendo la hora de mayor congestión a las 18 horas.

También se puede caracterizar los recorridos con velocidades por días de semana, Se observa que la mediana de la velocidad es relativamente constante a lo largo de la semana, situándose entre los 20 y 40 km/h. Los días de semana, de

lunes a viernes, presentan una dispersión de velocidades similar, aunque el lunes y el viernes muestran una mayor dispersión en los valores máximos, lo que podría estar asociado con cambios en el tráfico. Durante el sábado, la distribución de velocidades es similar, pero con una ligera tendencia a tener velocidades más altas, lo que puede sugerir menor congestión vehicular en ese día. Sin embargo, la distribución general se mantiene constante en términos de rangos de velocidad y dispersión. El domingo presenta velocidades más altas respecto a los demás días y la dispersión de velocidad también se reduce como se muestra en las siguientes figuras:

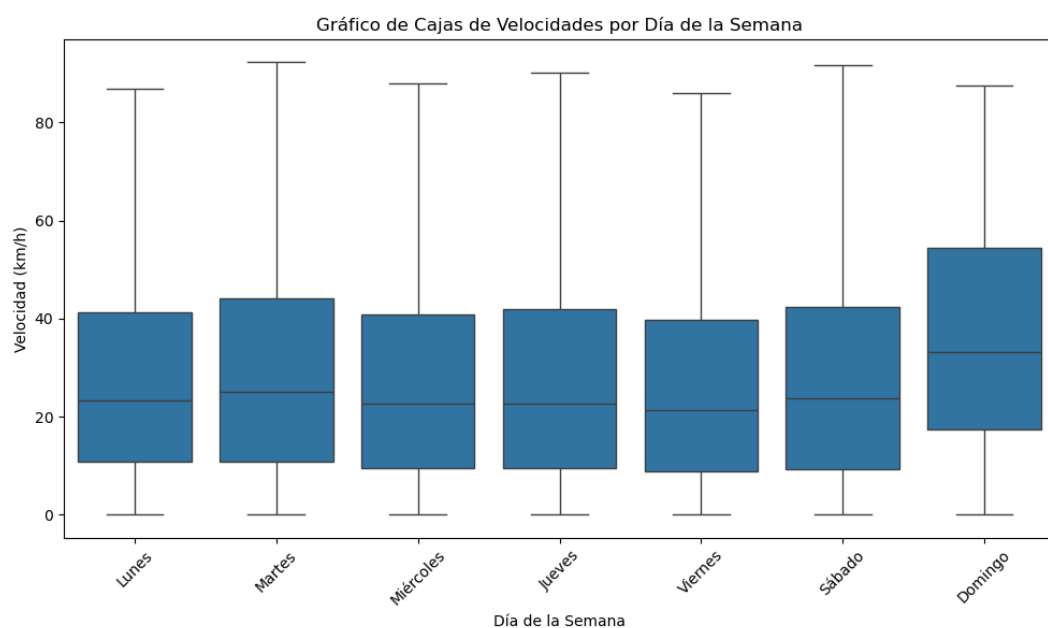


Figura N° 55. Distribución de velocidad de la ruta Jicamarca - Chorrillos
(Fuente: Elaboración propia)

La velocidad mínima en se da entre las 7:00pm y 9:00pm con velocidades promedio de 16 kph.

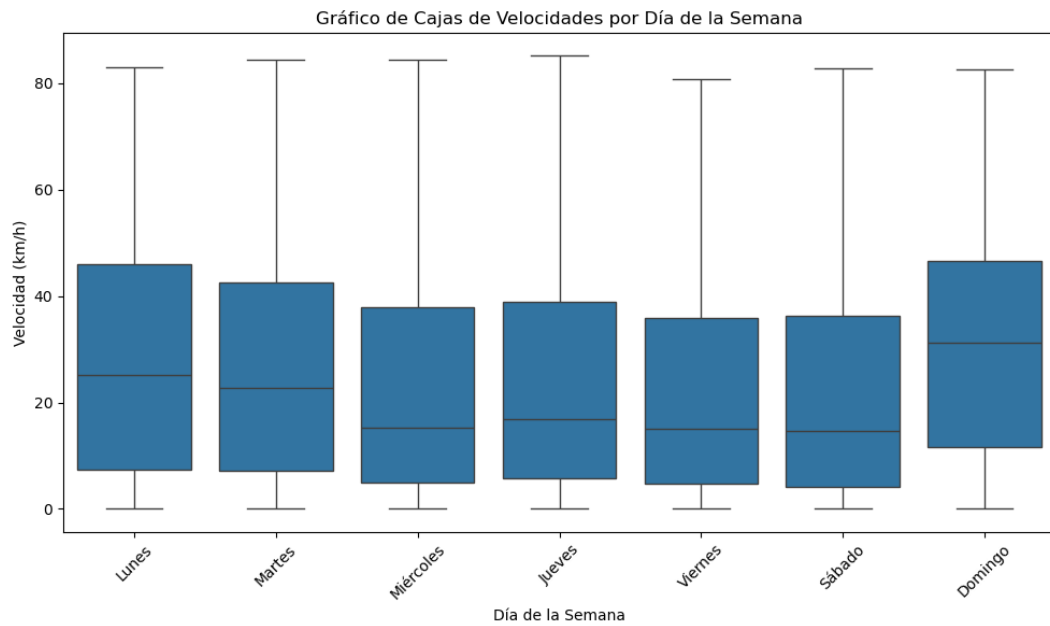


Figura N° 56. Distribución de velocidad de la ruta 404 del corredor morado
(Fuente: Elaboración propia)

La velocidad mínima en se da a las 7:00pm velocidades promedio de 19 kph.

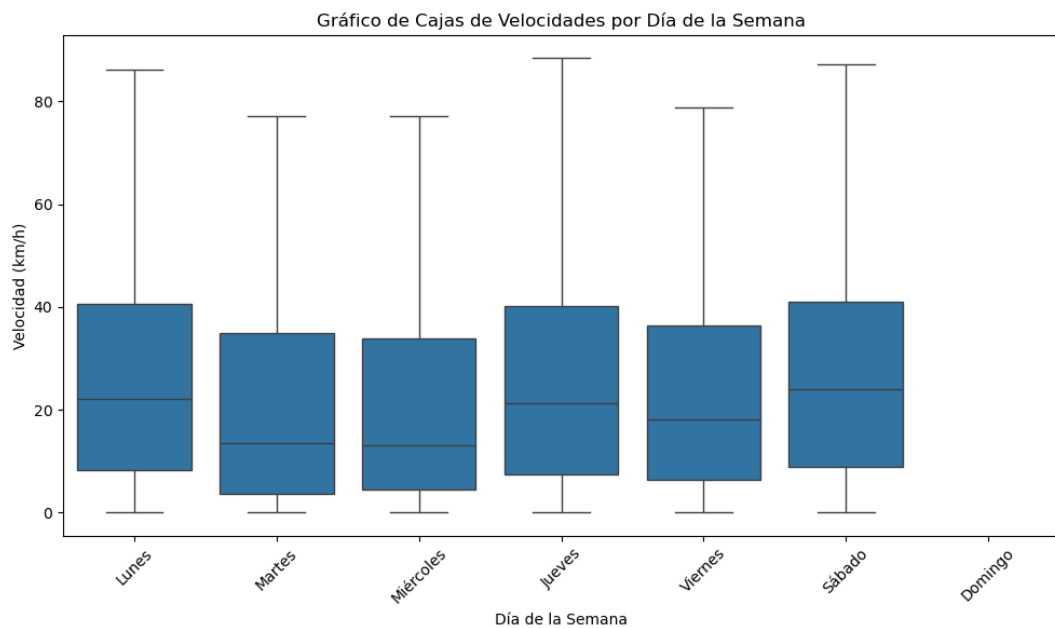


Figura N° 57. Distribución de velocidad de la ruta 412 del corredor morado
(Fuente: Elaboración propia)

La velocidad mínima en se da entre las 6:00pm y 7:00pm con velocidades promedio de 17 kph.

5.2.2 Análisis de aceleraciones y consumo energético

La siguiente Figura N°53, la aceleración se calcula con el diferencial de las velocidades contiguas entre el tiempo entre tales velocidades según la formula física.

$$a = \frac{v_f - v_0}{t}$$

Donde: a = aceleración
 v_f = velocidad final
 v_0 = velocidad inicial

El cálculo muestra la aceleración en una distancia determinada, con este dato se puede determinar un gráfico de aceleración vs distancia donde se puede analizar la relación que existe entre la aceleración y el consumo energético debido a la energía cinética.

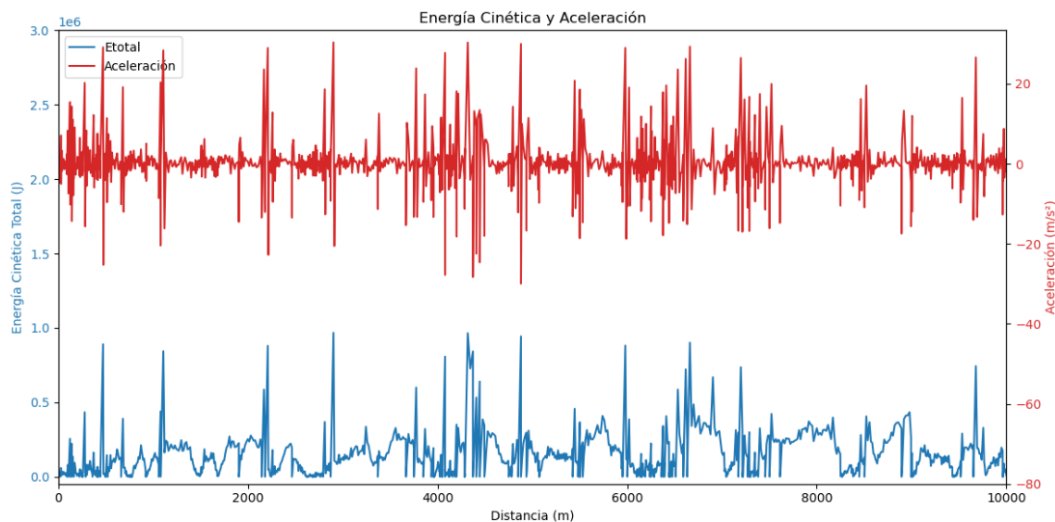


Figura N° 58. Relación entre la aceleración y el consumo energético

(Fuente: Elaboración propia)

La figura N°58 muestra la relación entre la energía total y la aceleración a lo largo de la distancia acumulada en una ruta. La energía cinética, representada en azul, muestra picos y valles que reflejan los incrementos y decrementos de la velocidad del vehículo a medida que avanza. A su vez, la aceleración, representada en rojo, varía abruptamente, con fluctuaciones tanto positivas como negativas, indicando constantes aceleraciones y desaceleraciones. Estas fluctuaciones son comunes en rutas con tráfico variable o condiciones urbanas, donde el vehículo necesita ajustar su velocidad frecuentemente. El comportamiento conjunto sugiere un

trayecto dinámico, con cambios constantes en la velocidad que impactan en el consumo energético.

Se puede concluir que a cambios en la velocidad habrá mayores consumos de energía en el recorrido de una ruta de transporte público.

5.2.3 Análisis del consumo energético

La gráfica muestra la relación entre tres tipos de energía (E_b , E_a y E_f) con respecto a la distancia acumulada en metros. Donde las energías se hallan como se detalló en el Capítulo II. Marco Teórico y Conceptual.

$$\text{Energía de Circulación } (E_b): E_b = \left(\frac{1}{2} * m * \frac{v^3}{d}\right) * 1seg$$

$$\text{Energía Aerodinámica } (E_a): E_a = \left(\frac{1}{2} * C_d * A * p * v^3\right) * 1seg$$

$$\text{Energía de Fricción } (E_f): E_f = (u * m * g * v) * 1seg$$

La energía de circulación (E_b) está representada en rojo y se observa que tiene picos significativos a lo largo del recorrido, lo que indica momentos de mayor esfuerzo del vehículo. La energía aerodinámica (E_a), en azul, se mantiene bastante estable, sugiriendo una velocidad constante y una influencia moderada del arrastre del aire. La energía de fricción (E_f), en verde, tiene fluctuaciones más notables que la de fricción a lo largo del trayecto.

La relación entre el consumo energético de circulación con el consumo energético de fricción está en el orden de más de 100 como se detalla en la Figura N° 59.

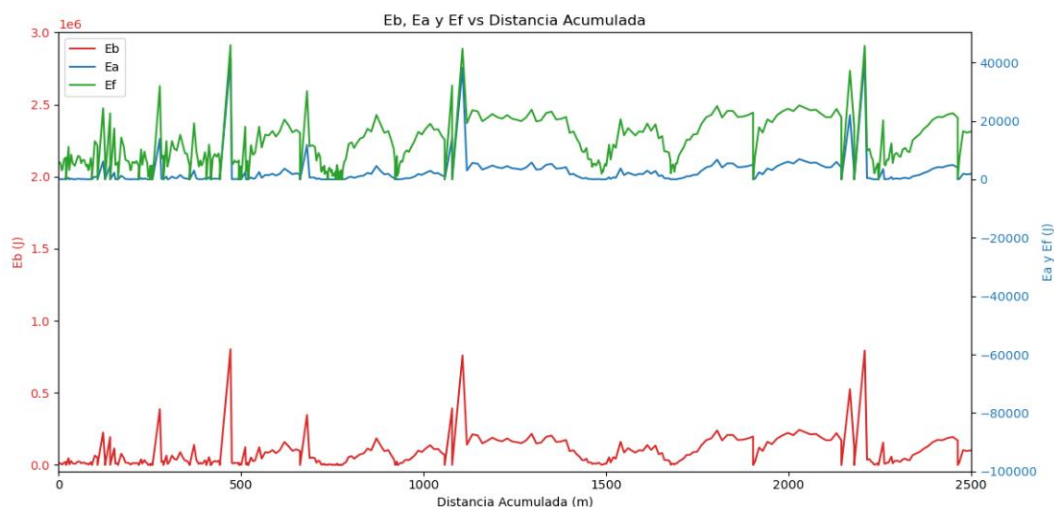


Figura N° 59. Comparación entre las energías de consumo energético.

(Fuente: Elaboración propia)

5.3 Mapa de velocidades

5.3.1 Ruta Jicamarca - Chorrillos

El mapa muestra la ruta de los vehículos entre Jicamarca y Chorrillos, utilizando colores para representar la velocidad a lo largo del trayecto. Las áreas en rojo representan velocidades más bajas (alrededor de 20 km/h o menos), mientras que las áreas en verde indican velocidades más altas (alrededor de 100 km/h). Se observa una tendencia a velocidades más altas en ciertos tramos del trayecto, probablemente en áreas con menos congestión o vías rápidas. Las zonas donde los vehículos circulan a menor velocidad, representadas en verde y amarillo, podrían corresponder a áreas urbanas con más tráfico o con mayor número de paradas. Este tipo de visualización es útil para analizar patrones de tráfico y eficiencia en la movilidad de esta ruta específica.

Tabla N° 25. Velocidades por tramo en la ruta Jicamarca - Chorrillos

Avenida	Velocidad (kph)
Fernando Wiese	00 – 30
Próceres de la Independencia	10 – 30
Pirámides del Sol	00 – 20
Vía Evitamiento	40 – 80
Panamericana Sur	50 -70
Alipio Ponce	20 – 40
Guardia Civil	20 – 40
Defensores del Moro	10 – 20
Alameda Sur	10 – 30
Alameda Ballestas	10 - 30
Alameda los Horizontes	10 - 30

(Fuente: Elaboración propia)

Ruta de los Vehículos con Colores basados en Velocidad

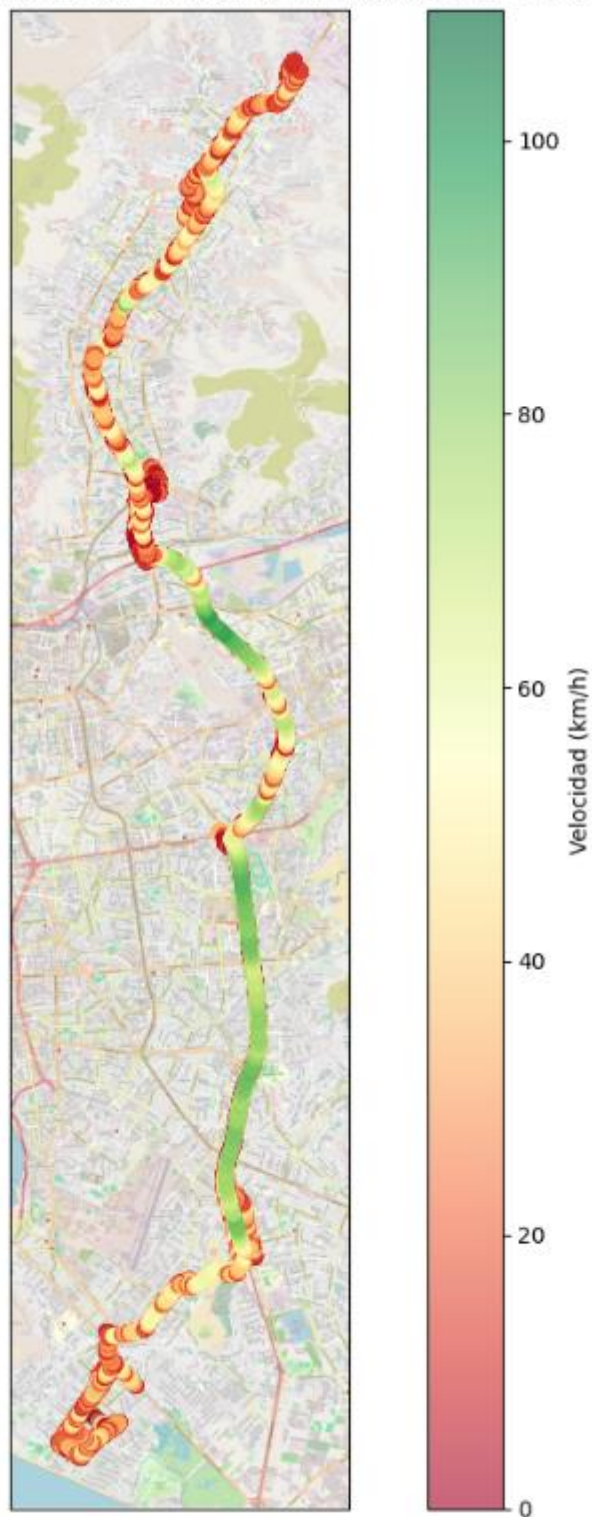


Figura N° 60. Mapa de velocidades en la ruta Jicamarca – Chorrillos
(Fuente: Elaboración propia)

5.3.2 Ruta 404 del corredor morado

El mapa muestra la Ruta 404 con velocidades representadas mediante un esquema de colores. Los tramos en verde representan las áreas donde los vehículos circulan a velocidades más bajas (alrededor de 10-20 km/h), mientras que los tramos en rojo indican velocidades más altas, superando los 60-70 km/h. Se pueden observar variaciones de velocidad a lo largo de la ruta, con tramos más lentos en zonas urbanas densas y áreas de tráfico más intenso, y tramos más rápidos en zonas con menor congestión o vías más rápidas.

Tabla N° 26. Velocidades de la ruta 404 del corredor morado

Avenida	Velocidad (kph)
Fernando Wiese	10 – 50
Próceres de la Independencia	10 – 60
9 de Octubre	20 - 50
Abancay	10 – 20
Almirante Miguel Grau	10 – 20
Brasil	30 - 70

(Fuente: Elaboración propia)

Ruta de los Vehículos con Colores basados en Velocidad

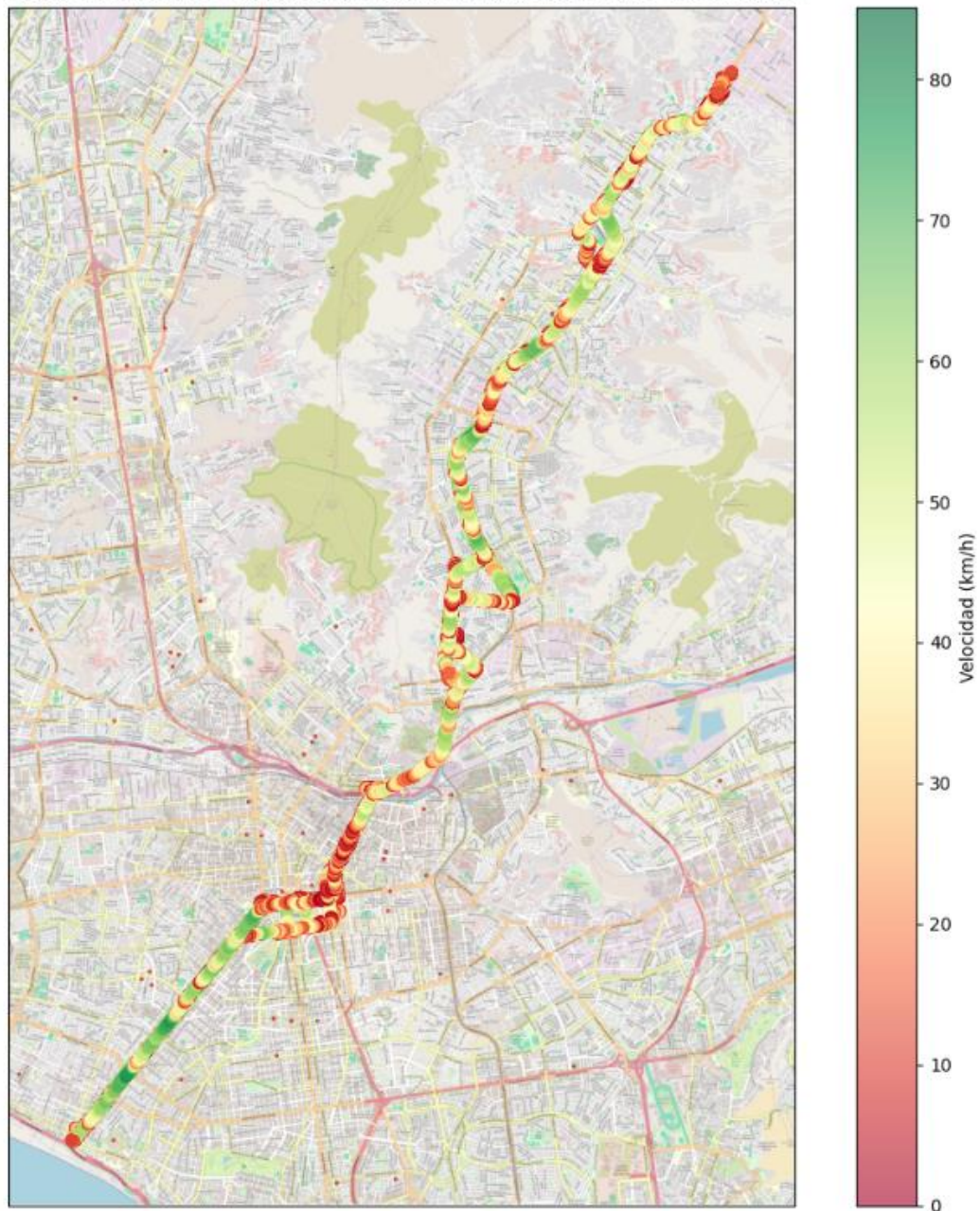


Figura N° 61. Mapa de velocidad de la ruta 404 del corredor morado
(Fuente: Elaboración propia)

5.3.3 Ruta 412 del corredor morado

El mapa muestra la ruta 412 con velocidades representadas mediante un esquema de colores. Los tramos en verde representan las áreas donde los vehículos circulan a velocidades más bajas (alrededor de 10-20 km/h), mientras que los tramos en rojo indican velocidades más altas, superando los 50 km/h.

Tabla N° 27. Velocidad de la ruta 412 del corredor morado

Avenida	Velocidad (kph)
Fernando Wiese	00 – 50
Próceres de la Independencia	10 – 50
Lima	10 – 30
Prolongación Tacna	20 – 50
Tacna	10 – 40

(Fuente: Elaboración propia)

Ruta de los Vehículos con Colores basados en Velocidad

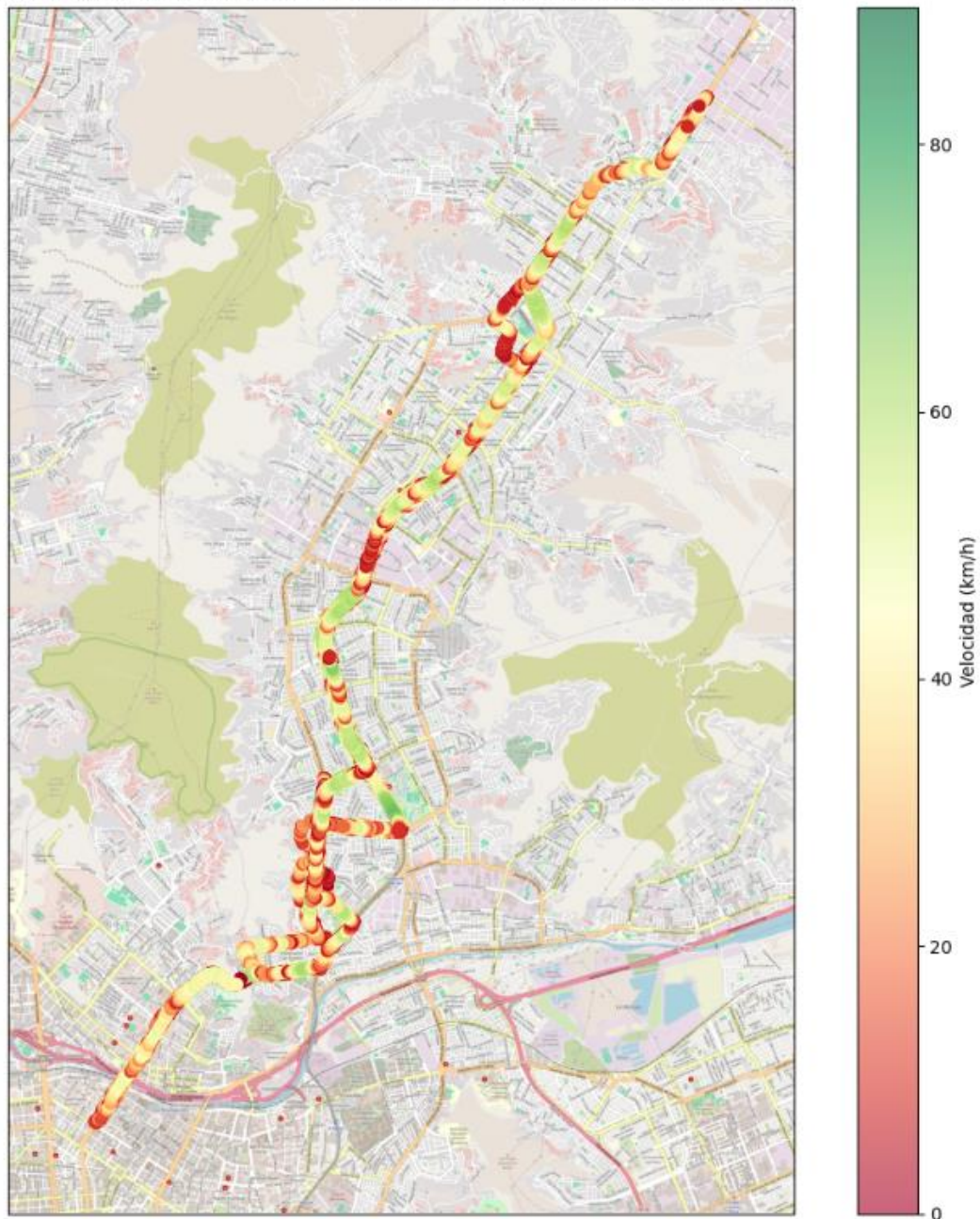


Figura N° 62. Mapa de velocidades de la Ruta 412 del corredor morado
(Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar que la velocidad en tramos iguales en las tres rutas como la Av. Wiese y Av. Próceres de la Independencia, las velocidades de los buses de la empresa ETUL4 S.A. que hace el recorrido de Jicamarca a Chorrillos tiene menores velocidades respecto a los buses del corredor morado. Puede deberse al comportamiento del conductor el cual al iniciar el recorrido prefiere avanzar lentamente para obtener el mayor beneficio.

5.4 Consumo energético total

De acuerdo con el Anexo G se analiza los consumos energéticos totales de los recorridos. En días laborales de semana se verifica consumos mayores que en días no laborales.

En la Figura N° 63 se presenta la tendencia de consumo energético por recorrido de la ruta Jicamarca – Chorrillos, verificando datos anómalos por recorridos incompletos y recorridos con variaciones grandes de velocidades que induce en el consumo energético total. Sin embargo, la variación de consumo energético presenta simetría y se comporta con variaciones de 500 millones de Joules con una media de 509 millones de Joules.

En la Tabla N°28 y Tabla N°29, se presenta las unidades funcionales que caracteriza el recorrido del bus. Estas unidades funcionales dependen directamente del consumo energético del bus.

Tabla N° 28. Unidades funcionales del recorrido de la ruta Jicamarca - Chorrillos del corredor morado - Parte 1

	Lts/Recorrido	Ocupación promedio	Lt/persona	Km recorrido promedio
Ruta 1	11.9	28	0.43	40.1

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 29. Unidades funcionales del recorrido de la ruta Jicamarca - Chorrillos del corredor morado - Parte 2

	Lt/km	Km/lit	Pasajero-km	E/Pasa-km (MJ/pas-km)
Ruta 1	0.30	3.4	1,122.8	0.45

(Fuente: Elaboración propia)

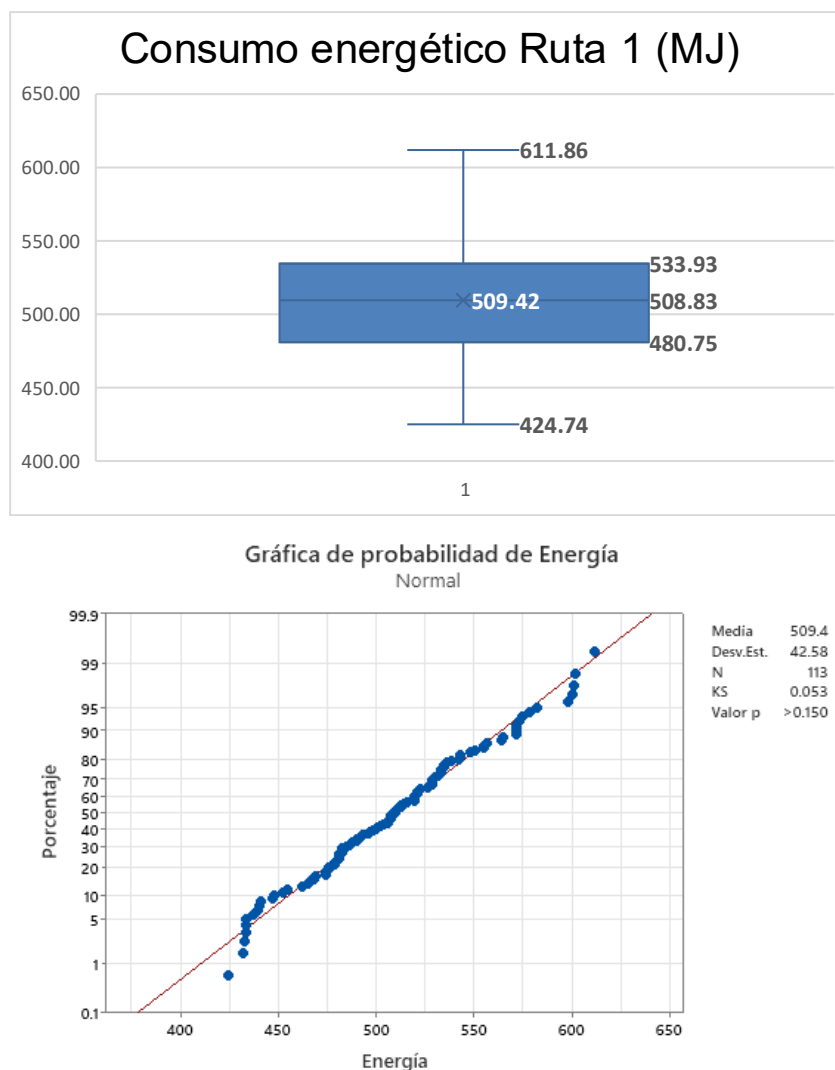


Figura N° 63. Tendencia de consumo energético por recorrido de la ruta Jicamarca - Chorrillos
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 64 al igual que en la ruta anterior, la ruta 404 del corredor morado presenta una distribución simétrica

Tabla N° 30. Unidades funcionales del recorrido de la ruta 404 del corredor morado – Parte 1

	Lts/Recorrido	Ocupación promedio	Lt/persona	Km recorrido promedio
Ruta 2	7.0	29	0.24	24.1

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 31. Unidades funcionales del recorrido de la ruta 404 del corredor morado – Parte 2

	Lt/km	Km/Lt	Pasajero- km	E/Pasa- km (MJ/pas- km)
Ruta 2	0.29	3.4	698.9	0.43

(Fuente: Elaboración propia)

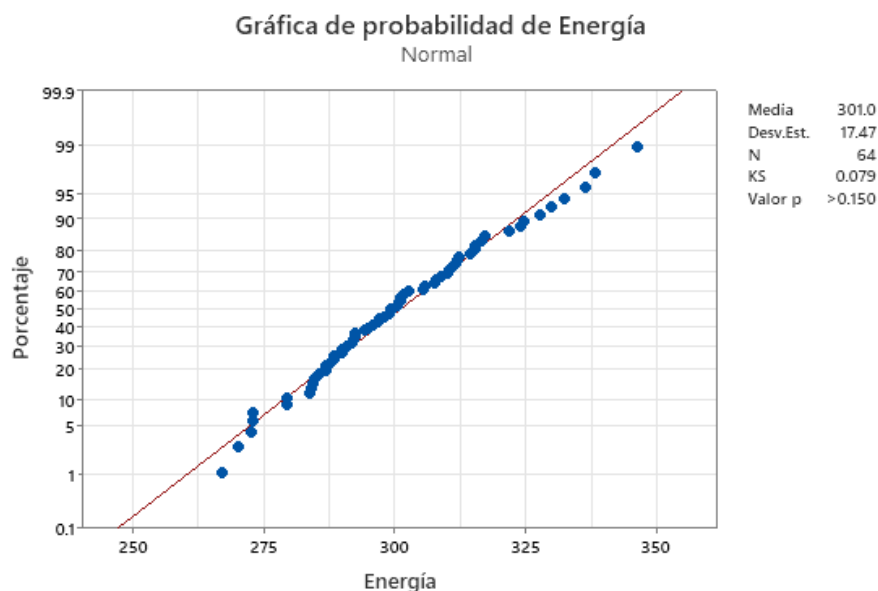
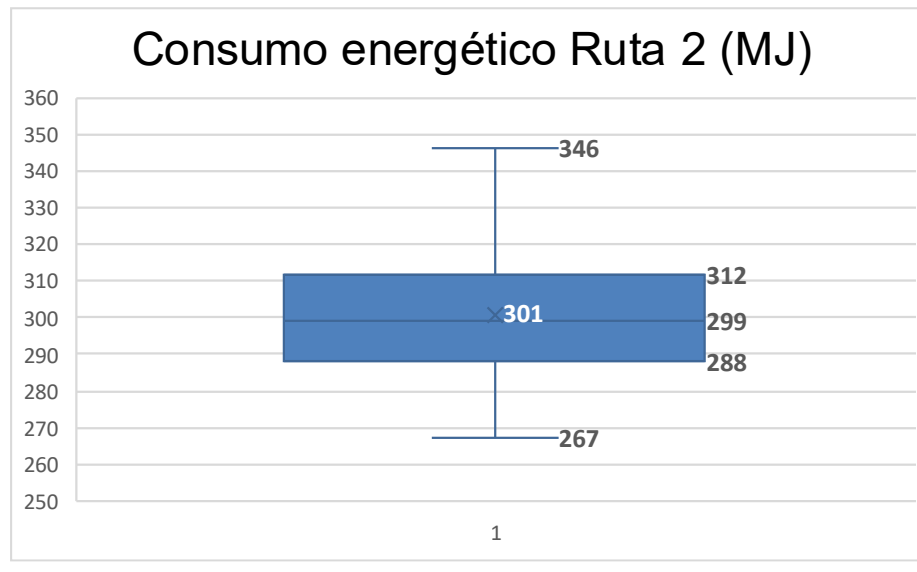


Figura N° 64. Tendencia de consumo energético por recorrido de la ruta 404 del corredor morado
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura N° 65 presenta al igual que los demás recorridos una forma simétrica con anomalías por recorridos incompletos.

Tabla N° 32. Unidades funcionales del recorrido de la ruta 412 del corredor morado – Parte 1

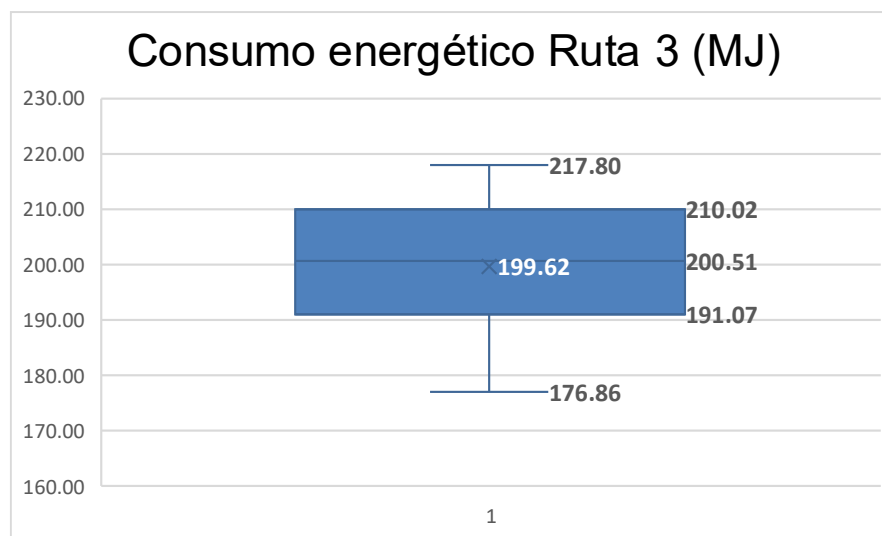
	Lts/Recorrido	Ocupación promedio	Lt/persona	Km recorrido promedio
Ruta 3	4.7	28	0.17	16.7

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 33. Unidades funcionales del recorrido de la ruta 412 del corredor morado – Parte 2

	Lt/km	Km/Lt	Pasajero-km	E/Pasa-km (MJ/pas-km)
Ruta 3	0.28	3.6	467.6	0.43

(Fuente: Elaboración propia)



Gráfica de probabilidad de Energía
Normal

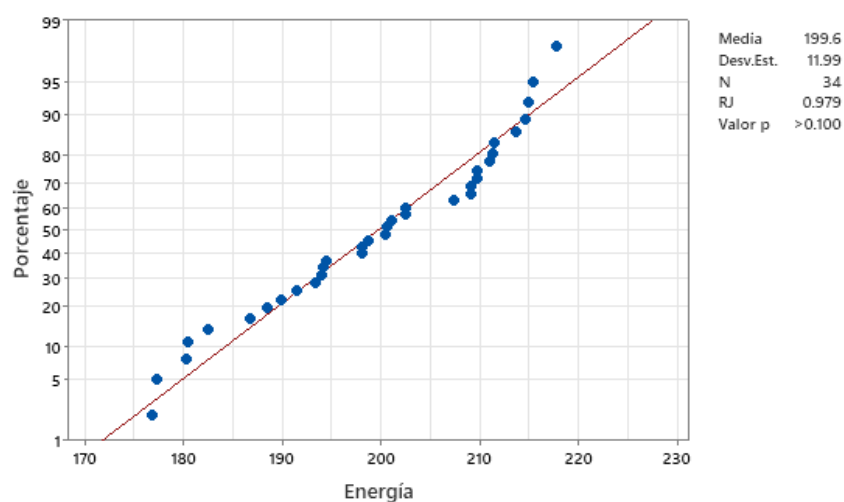


Figura N° 65. Tendencia de consumo energético por recorrido de la ruta 412 del corredor morado

(Fuente: Elaboración propia)

En resumen, en consumo energético por pasajero-km es:

Tabla N° 34. Resumen de E/pasajeo-km

	ENERGIA PROPUESTO (MJ)	Pasajeros-km	E/pasajero- km (MJ/pas- km)
Ruta 1	508.83	1122.8	0.45
Ruta 2	299.12	698.9	0.43
Ruta 3	200.51	467.6	0.43

(Fuente: Elaboración propia)

También se desarrolló el estudio de IPK (Índice de Pasajero – Kilometro) que durante años ha sido utilizado para una forma de evaluar la relación entre oferta y demanda. La relación IPK resulta de la división entre la cantidad de pasajeros totales y los kilómetros recorridos en una ruta (Lascano, 2024).

Tabla N° 35. Resultado de IPK de las 3 rutas estudiadas

	Pasajeros	Recorrido (Km)	IPK (Pasajero/Km)
Ruta 1	83	40.1	2.1
Ruta 2	95	24.1	3.9
Ruta 3	92	16.7	5.5

(Fuente: Elaboración propia)

Lascano (2024), en su investigación de los datos de 42 líneas en Buenos Aires Argentina, obtiene como resultados de su estudio valores de IPK entre 1 y 4.5, se entiende que en Lima se tiene mucha demanda de pasajeros sobre los kilómetros recorridos en cada ruta. Como se menciona en Alcance y Límite de la Investigación, la presente Tesis se enfoca en el consumo energético sin tomar en cuenta la demanda y oferta de pasajeros, pero los índices dan un enfoque extra para validar los datos a usar.

Se presenta el siguiente resumen en la Tabla N° 36. Resumen de consumo energético total de los recorridos en las rutas estudiadas.

Tabla N° 36. Resumen de consumo energético total de los recorridos en las rutas estudiadas

	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3
Energía mediana (MJ)	508.83	299.12	200.51

(Fuente: Elaboración propia)

Como se detalla en este capítulo de análisis, es posible caracterizar el recorrido de los buses a través del GPS Arduino con los parámetros de estudio. Obteniendo distancias recorridas; velocidades por hora, día y tramo; aceleraciones y consumo energético por vehículo y ruta.

Capítulo VI: Propuesta de gestión de recorridos

La propuesta de modelo de gestión de recorridos se orienta a utilizar el modelo centralizado de Stackelberg, bajo la premisa de un sistema centralizado donde un decisor central (líder) posee el poder de decidir la ruta adecuada de menor energía consumida en el recorrido total del vehículo. También se enfoca en que los seguidores sigan decisiones del líder, lo que permite lograr una solución óptima para el sistema.

El proceso busca mejorar la utilización de recursos, reducir costos operativos, minimizar tiempos de viaje y garantizar servicios de calidad. Todos estos reducidos en la mejora de la eficiencia energética.

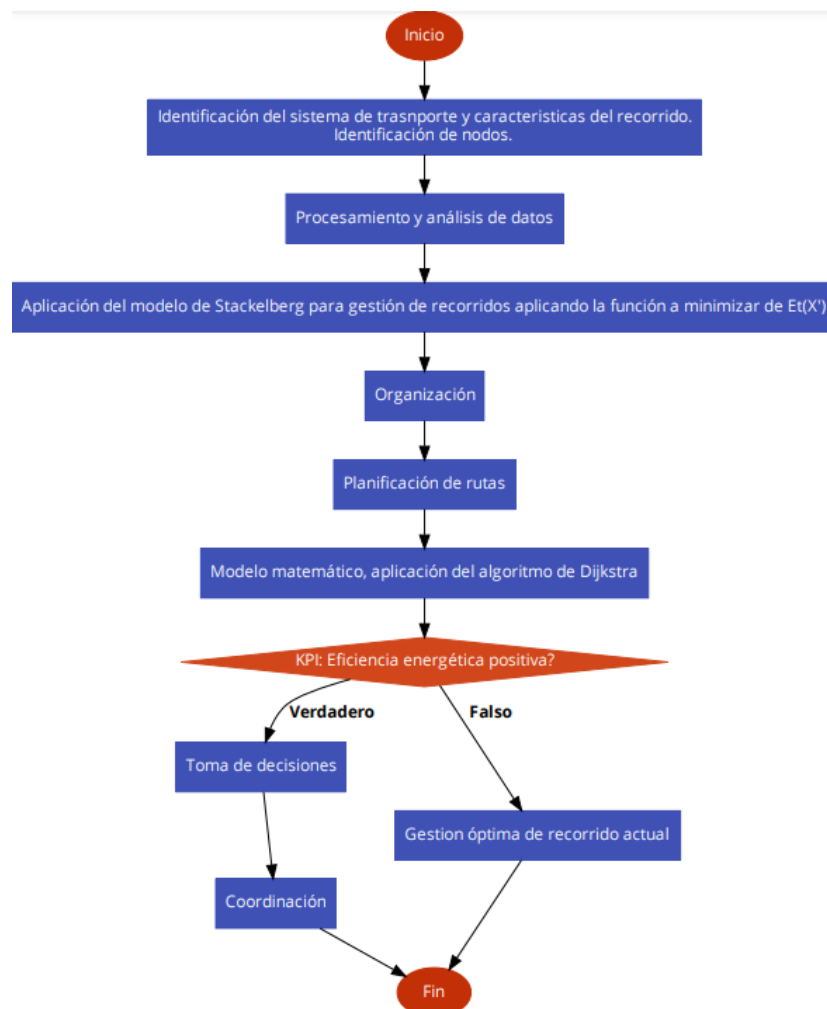


Figura N° 66. Flujo de proceso de propuesta de gestión de recorridos en buses de transporte público

(Fuente: Elaboración propia)

La gestión de recorridos se basa en principios de organización, planificación, control, toma de decisiones y coordinación.

6.1 Organización

La organización se enfoca en asignación de roles y responsabilidades, e infraestructura tecnológica a usar según el modelo de Stackelberg, para determinar el flujo de tráfico y minimizar el consumo energético el cual engloba rutas eficientes, tiempos y distancias mínimos.

6.1.1 Roles y responsabilidades

El modelo centralizado de Stackelberg da roles definidos y marcados que son la de un decisor central (líder) y de seguidores.

6.1.1.1 Decisor central (líder)

En el modelo de Stackelberg, el decisor central es el primero en tomar decisiones sobre la función objetivo y planificación de rutas, ajustando según los estudios de optimización. El decisor central está conformado por la Autoridad de Transporte Urbano (ATU), Municipalidad Metropolitana de Lima, Municipalidades relevantes y la empresa de transporte público. Esta reunión se llama “Comisión de Gestión de Transporte Urbano”

En este caso de estudio, el decisor central va a plantear nuevas rutas alternas cuyo objetivo es reducir el consumo energético. Como se analizó, el consumo energético depende de la velocidad de recorrido, variaciones de aceleraciones y desaceleración y la distancia de recorrido. El decisor central se plantea la función objetivo de minimizar el consumo energético de recorrido.

El modelo de Stackelberg plantea un modelo por niveles, donde el decisor central inicial es la Autoridad de Transporte y el seguidor inicial es la empresa de transporte. Luego, el decisor central viene a estar conformado por la empresa de transporte y los seguidores serán los usuarios.

6.1.1.2 Seguidores

En el caso de estudio, los seguidores son las entidades que responden al decisor central. Ajustan sus comportamientos en respuesta a la decisión del líder optando por aquella opción que se adapte mejor a sus necesidades en términos de tiempo de viaje.

Los seguidores inicialmente están conformados por las empresas de transporte que se rigen a las decisiones del líder. Luego los seguidores estarán conformados por los conductores de los buses de transporte y los grupos de personas (usuarios) que optan por este sistema de transporte.

Los conductores son seguidores pasivos porque siguen las directrices del decisor central sin tomar decisiones independientes.

Los grupos de personas (usuarios) son seguidores activos que observan estas decisiones y desarrollan sus propias estrategias como la elección de estas rutas alternas, horarios dentro del marco establecido por el decisor central.

6.1.2 Infraestructura Tecnológica

Para la conexión e interpretación de decisor central – seguidores se hace uso de la implementación de infraestructura tecnológica desde el procesamiento hasta las decisiones de los usuarios. Códigos abiertos en Python que proceden y analicen la data del GPS Arduino colocado en los vehículos de transporte público. El uso del algoritmo de Dijkstra para hallar las rutas optimas y su visualización en mapas SIG para la toma de decisiones de la Comisión de Gestión de Transporte Urbano. La visualización de las decisiones a través de aplicaciones, redes sociales, página web y canales de noticia.

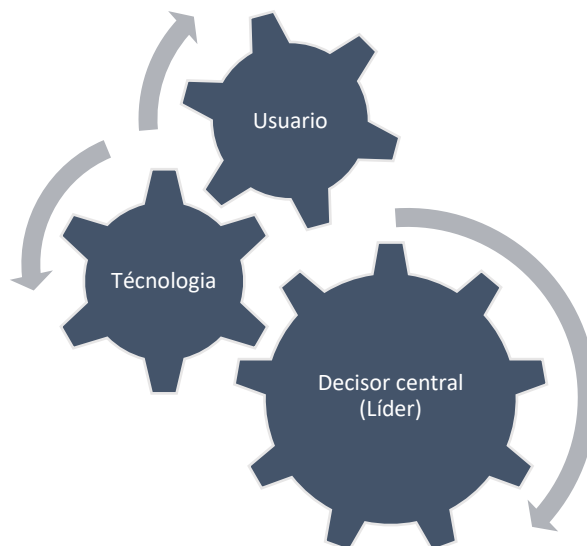


Figura N° 67. Roles en el modelo de Stackelberg
(Fuente: Elaboración propia)

6.2 Planificación de rutas

En esta parte de la investigación se diseña y optimiza las rutas del transporte público en función del consumo energético, considerando factores ideales en velocidad y aceleración propios del modelo de recorrido.

Para los casos de estudio, se optimiza la ruta Jicamarca – Chorrillos, la ruta 404 y 412 del corredor morado.

6.2.1 Modelo de recorrido eficiente

Para simular el recorrido se plantea una aceleración de 3 m/s^2 del punto de inicio y de cada paradero, hasta alcanzar una velocidad máxima de 12.5 m/s (45 kph), esta velocidad de acuerdo con las disposiciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el Decreto Supremo N° 025--2021-MTC donde indica como velocidad máxima de 50 kph en avenidas. Para la desaceleración en cada paradero se tiene a una constante de 1.23 m/s^2 . Mifsud et al. (2021), maneja escenarios complejos de control predictivo relacionados con la comodidad y seguridad de los pasajeros el cual halla desaceleraciones cómodas por debajo del límite de 1.23 m/s^2 . Y para el recorrido después de la aceleración y antes de la desaceleración en paraderos, se tiene una velocidad de 12.5 m/s (45 kph) con aceleraciones y desaceleraciones de 0.5 m/s^2 . El recorrido simula de manera ideal el comportamiento de los vehículos para hallar la energía consumida por segundo y la energía total consumida en el recorrido.

Se presenta en la siguiente Figura N° 68 el recorrido ideal del vehículo teniendo en cuenta las aceleraciones y desaceleraciones mencionadas en un tramo de ruta.

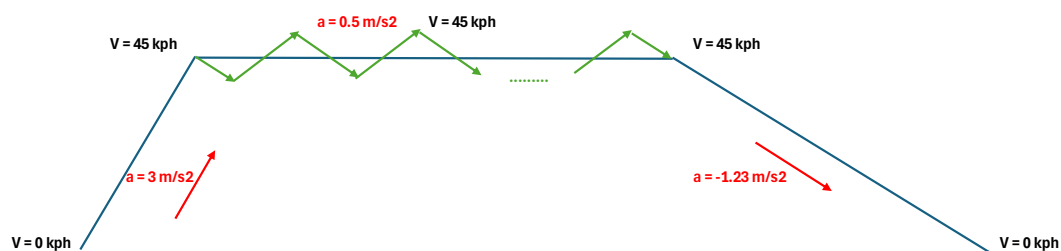


Figura N° 68. Modelo de recorrido ideal del bus de transporte público

(Fuente: Elaboración propia)

Este proceso se repite en cada tramo de inicio y fin de paraderos y también en semáforos entre paraderos, convirtiéndose en un proceso semi periódico como se muestra en la Figura N° 69.



Figura N° 69. Modelo de recorrido del bus de transporte público en la ruta óptima

(Fuente: Elaboración propia)

6.2.2 Recorridos eficientes a través del Algoritmo de Dijkstra

Para el recorrido eficiente se utiliza el algoritmo de Dijkstra, el cual emplea sistema de información espacial de Lima. El algoritmo identifica las rutas optimas en cuanto a la distancia más corta entre nodos dando como input al algoritmo el paradero inicial y final. La definición de rutas eficientes para los buses de transporte público se basa en el modelo de Stackelberg teniendo en cuenta la función objetivo de minimizar el consumo energético.

$$E_t(X^*) = \min(E_t(X))$$

Donde: $X \in D^{Sol}$, ruta optima

$$E_t = E_a + E_b + E_f$$

La energía total es la suma de la energía de circulación, aerodinámica y de fricción como se halló con el análisis de la data.

6.2.2.1 Alternativas respecto a la ruta Jicamarca - Chorrillos

Para la ruta de Jicamarca a Chorrillos se tiene como input las coordenadas de paradero inicial y final.

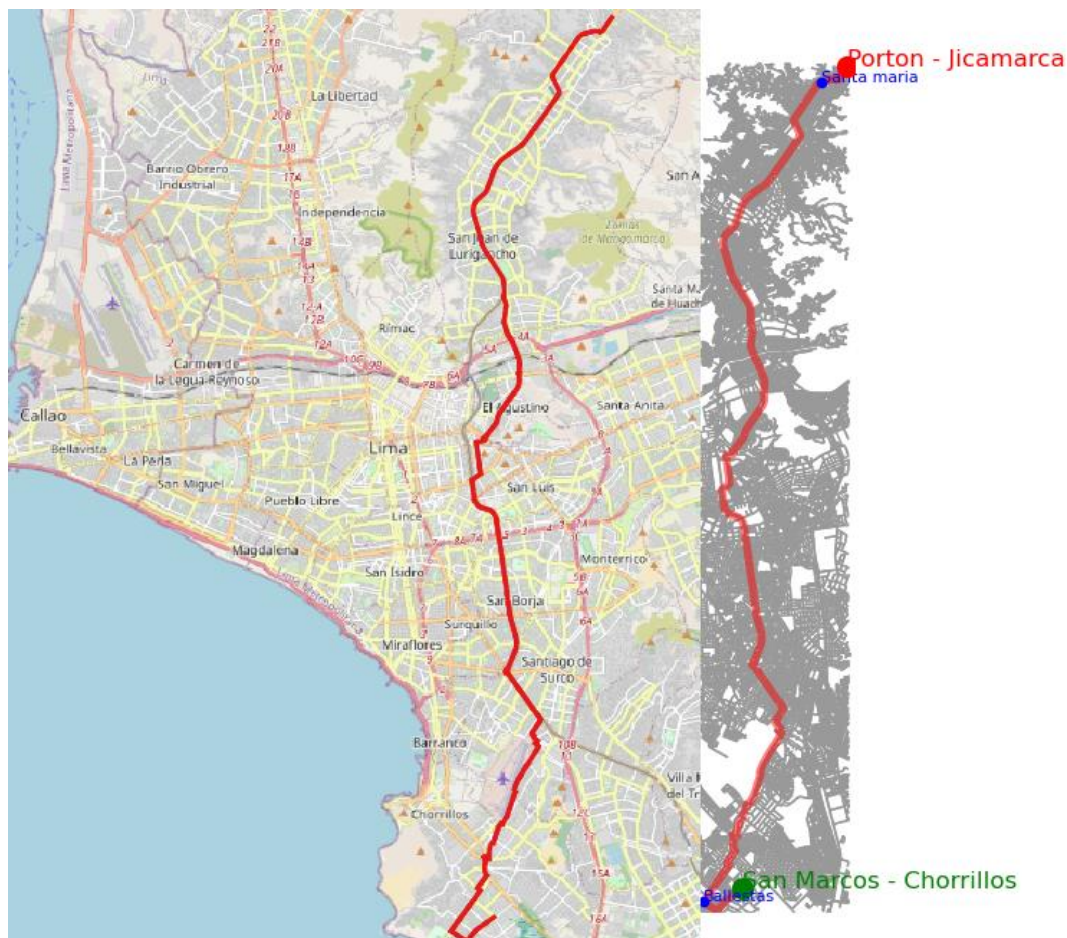


Figura N° 70. Alternativa óptima a la ruta Jicamarca – Chorrillos

(Fuente: Elaboración propia)

De la alternativa, se obtiene una distancia menor total recorrida un consumo energético menor como se detalla en la siguiente Tabla N°37.

Tabla N° 37. Distancia y consumo energético de la alternativa propuesta con el algoritmo de Dijkstra

Distancia total recorrida (km)	Consumo energético total (MJ)
37.69	446.15

(Fuente: Elaboración propia)

El consumo energético se halla con las mismas formulas descritas anteriormente, teniendo en cuenta el modelo de recorrido eficiente y el algoritmo de Dijkstra.

En esta ocasión, el algoritmo de Dijkstra propone una ruta alterna minimizando la función objetivo para optimizar el consumo energético.

Se presenta otra alternativa teniendo en cuenta que el bus de transporte público debe pasar por la Av. Evitamiento y Panamericana Sur. Se tiene esta

consideración ya que no se desea variar el recorrido en gran medida respecto del actual recorrido. Esta forma es la búsqueda correcta por no alterar el recorrido en gran medida colocando puntos donde debe pasar el bus de manera obligatoria.

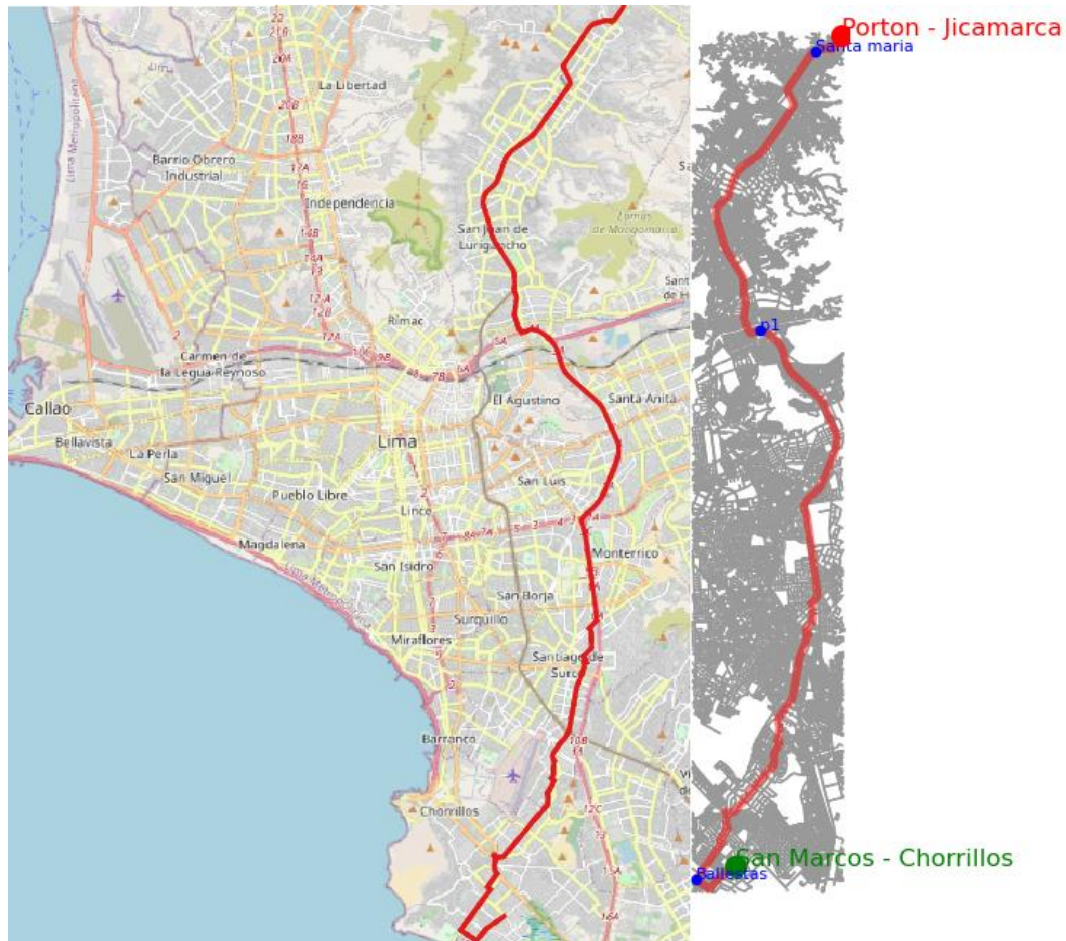


Figura N° 71. Ruta óptima propuesta por el algoritmo de Dijkstra en el recorrido de Jicamarca – Chorrillos

(Fuente: Elaboración propia)

Se observa un mayor consumo energético, pero no tan incidente como se detalla en la siguiente Tabla N°34.

Tabla N° 38. Distancia y consumo energético

Distancia total recorrida (km)	Consumo energético total (MJ)
38.36	455.22

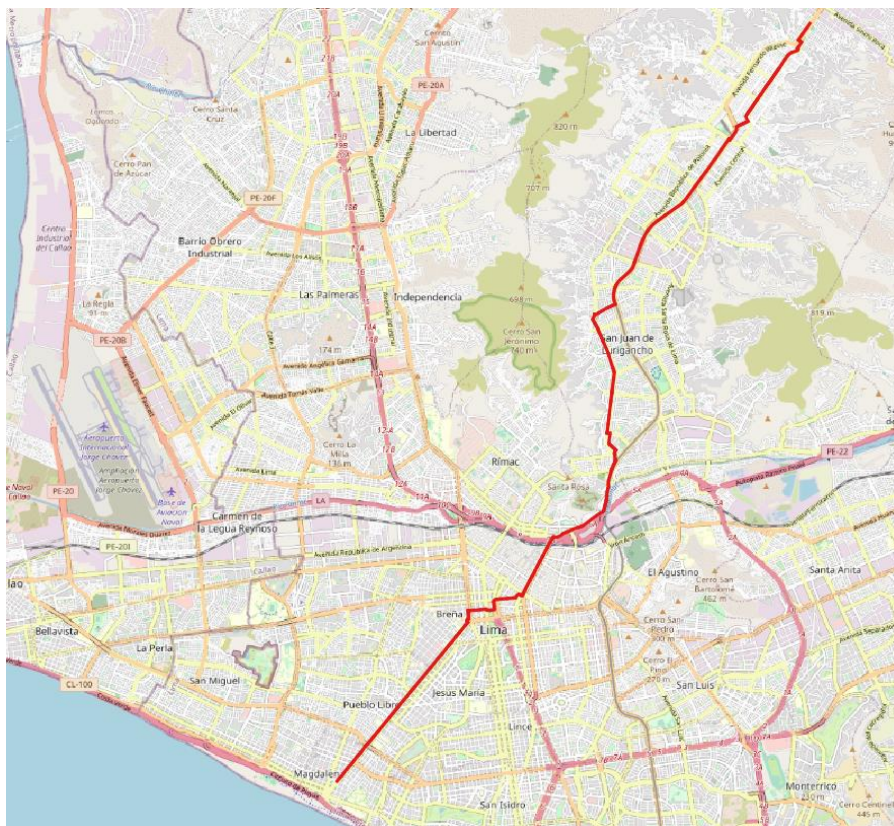
(Fuente: Elaboración propia)

	Lts/Recorrido	Ocupación promedio	Lt/persona	Km recorrido promedio
Ruta 1	10.7	28	0.38	38.36

Tabla N° 40. Unidades funcionales propuesto de la ruta Jicamarca – Chorrillos – Parte 2

	Lt/km	km/Lt	Pasajero- km	E/Pasa- km (MJ/pas- km)
Ruta 1	0.28	3.6	1074.08	0.42

Para la ruta 404 del corredor morado, se tiene los inputs de paradero de inicio y final, además de los inputs que el recorrido debe pasar necesariamente por la Av. Abancay, ya que existe otra ruta que pasa por la ruta optima propuesta para esta ruta.



(Fuente: Elaboración propia)

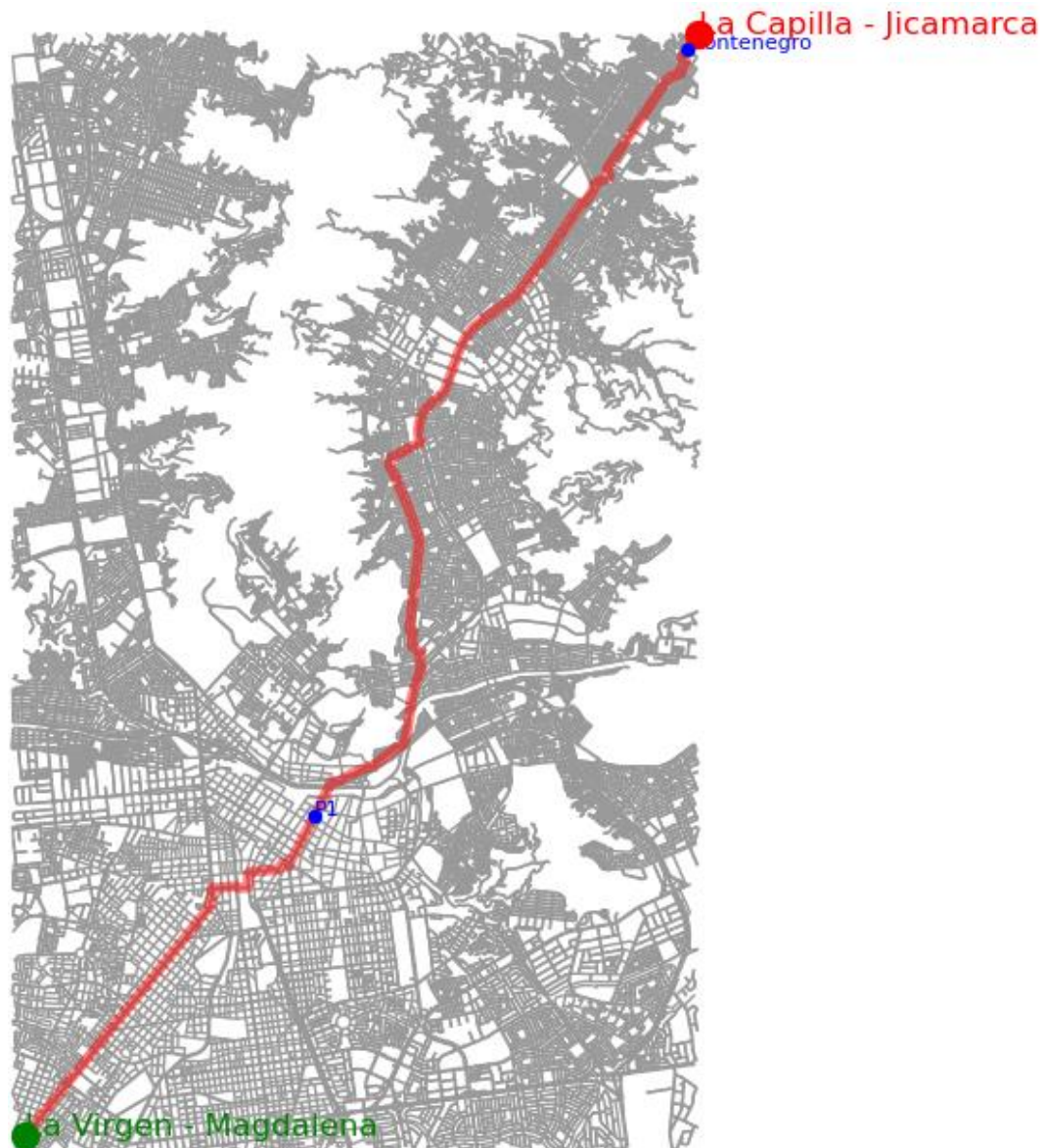


Figura N° 73. Recorrido óptimo desarrollado por el algoritmo Dijkstra para la ruta 404 del corredor morado.

(Fuente: Elaboración propia)

Se observa un mayor consumo energético, pero no tan incidente en comparación con el consumo actual de los buses como se detalla en la siguiente Tabla N°35.

Tabla N° 41. Distancia y consumo energético de la alternativa a la ruta 404 del corredor morado

Distancia total recorrida (km)	Consumo energético total (MJ)
23.34	288.63

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 42. Unidades funcionales de la ruta 404 del corredor morado – Parte 1

	Lts/Recorrido	Ocupación promedio	Lt/persona	Km recorrido promedio
Ruta 2	6.8	29	0.23	23.34

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 43. Unidades funcionales de la ruta 404 del corredor morado – Parte 2

	Lt/km	km/Lt	Pasajero-km	E/Pasa-km (MJ/pas-km)
Ruta 2	0.29	3.4	676.86	0.43

(Fuente: Elaboración propia)

6.2.2.3 Alternativas respecto a la ruta 412 del corredor morado

Para la ruta 412 del corredor morado se tiene los inputs de paradero inicial y paradero final obteniendo el siguiente recorrido optimo.

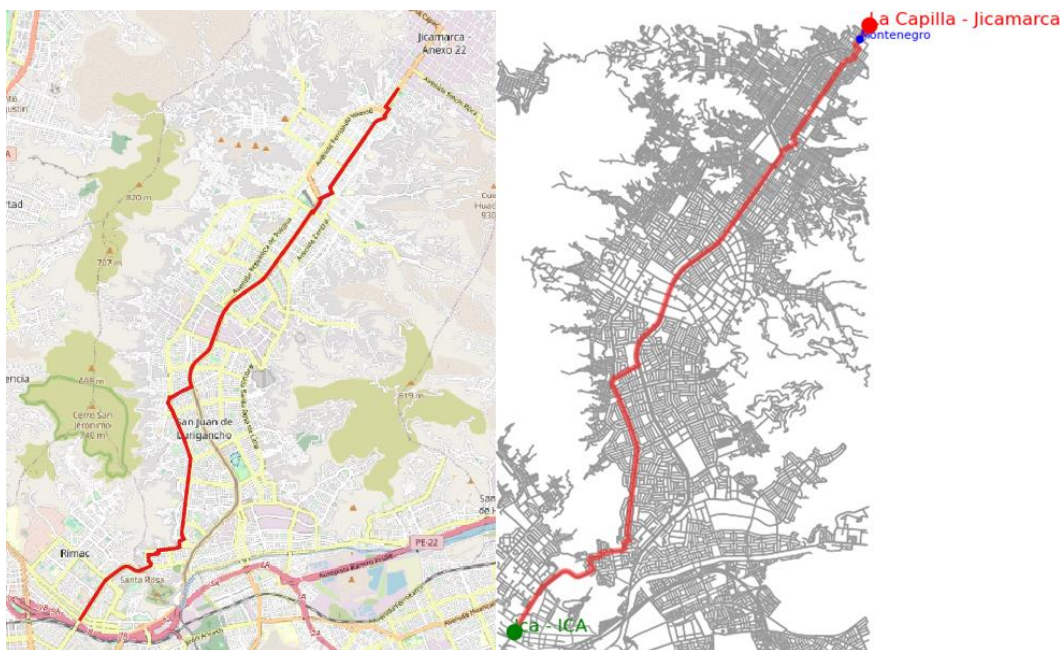


Figura N° 74. Ruta optima propuesta por el algoritmo de Dijkstra en el recorrido de la ruta 412 del corredor morado

(Fuente: Elaboración propia)

Como se detalla en la siguiente Tabla N°36, el consumo energético no es tan incidente al consumo energético actual de los buses.

Tabla N° 44. Distancia y consumo energético alternativa de la ruta 412 del corredor morado

Distancia total recorrida (km)	Consumo energético total (MJ)
15.61	193.49

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 45. Unidades funcionales de la ruta 412 del corredor morado – Parte 1

	Lts/Recorrido	Ocupación promedio	Lt/persona	Km recorrido promedio
Ruta 3	4.5	28	0.16	15.61

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 46. Unidades funcionales de la ruta 412 del corredor morado – Parte 2

	Lt/km	km/Lt	Pasajero-km	E/Pasa-km (MJ/pas-km)
Ruta 3	0.29	3.4	437.08	0.44

(Fuente: Elaboración propia)

Como se observa en las tablas descritas, el consumo energético de las alternativas es menor al consumo energético actual de los buses, teniendo una gran variación en la ruta de Jicamarca – Chorrillo de la empresa ETUL4 S.A.

6.3 Control del sistema de recorridos

6.3.1 Monitoreo de la ruta

El control del sistema garantiza que los vehículos sigan las rutas planificadas y que se alcance la optimización energética deseada. En esta fase, se utilizan datos recolectados por los sistemas GPS para monitorear el desempeño de las rutas y ajustar las decisiones.

A través del algoritmo de Dijkstra se tiene rutas las cuales tienen energías óptimas de uso por vehículo. Estas energías se comparan a través del KPI de Eficiencia energética.

El operador, utilizando datos y análisis de energía, ajusta las rutas y toma decisiones sobre desvíos y reorganización de la flota si se detectan picos en el consumo energético.

6.3.2 KPI de la eficiencia energética

Este índice compara la energía sin la gestión de recorridos entre la energía con gestión de recorridos. Este KPI debe ser positivo, lo cual nos garantiza que el recorrido es el adecuado para un menor consumo energético.

$$\text{Eficiencia Energética} = \frac{E1 - E2}{E1}$$

Donde:

E1: Energía actual

E2: Energía con gestión de recorrido

Las energías se comparan para verificar un ahorro en el consumo energético. En la siguiente Tabla N° 37, se muestra que en la ruta de Jicamarca – Chorrillos de la empresa ETULSA S.A. se tiene mayor cantidad de eficiencia energética en comparación con las rutas del corredor morado. Se puede apreciar a través del análisis que, si bien debe seguir una ruta determinada, también es importante diferentes factores como la congestión vehicular y el comportamiento del conductor.

Tabla N° 47 Eficiencia energética de las rutas estudiadas

RUTA	ENERGÍA DATOS (MJ)	ENERGÍA PROPUESTO (MJ)	EFICIENCIA ENERGÉTICA
Ruta Jicamarca - Chorrillos	508.83	455.22	11%
Ruta 404 del corredor morado	299.12	288.63	4%
Ruta 412 del corredor morado	200.51	193.49	4%

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 48. Resultados IPK propuesto de las 3 rutas estudiadas

	Pasajeros	Recorrido (Km)	IPK (Pasajero/Km)
Ruta 1	83	38.36	2.2
Ruta 2	95	23.34	4.1
Ruta 3	92	15.61	5.9

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 49. Comparación de IPK de Datos vs Propuesto

	IPK (Pasajero/Km) Datos	IPK (Pasajero/Km) Propuesto
Ruta 1	2.1	2.2
Ruta 2	3.9	4.1
Ruta 3	5.5	5.9

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 50. Resultados de E/Pasajero-km de las 3 rutas estudiadas

	ENERGIA PROPUESTO (MJ)	Pasajeros-km	E/pasajero- km (MJ/pas- km)
Ruta 1	455.22	1074.08	0.42
Ruta 2	288.63	676.86	0.43
Ruta 3	193.49	437.08	0.44

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 51 Comparación de E/pasajero-km Datos vs Propuesta

	E/pasajero- km (Datos) (MJ/pas-km)	E/pasajero-km (Propuesta) (MJ/pas-km)
Ruta 1	0.45	0.42
Ruta 2	0.43	0.43
Ruta 3	0.43	0.44

(Fuente: Elaboración propia)

En la Tabla N°52 se aprecia una mayor eficiencia en la Ruta 1 con el KPI E/pasajero-km. En porcentaje se aprecia en la siguiente Tabla N°46:

Tabla N° 52. Eficiencia respecto al KPI (E/pasajero – km)

	EFICIENCIA E/pasajero- km (Datos) (MJ/pas-km)
Ruta 1	6.5%
Ruta 2	0.4%

(Fuente: Elaboración propia)

6.4 Toma de decisiones

La toma de decisiones se basa en los datos recolectados y en el análisis de las rutas actuales para ajustar continuamente el sistema de transporte. Aquí, el

modelo de Stackelberg juega un papel clave en equilibrar las decisiones del decisor central con las respuestas de los usuarios.

El operador de transporte (líder) toma decisiones estratégicas para reducir el consumo de energía y optimizar las rutas, mientras que los usuarios (seguidores) ajustan su comportamiento de viaje en función de las rutas y horarios que se les ofrecen.

Las decisiones sobre ajustes de rutas o cambios de frecuencia se basan en un análisis continuo de los datos de GPS y el consumo de energía. Las rutas con mayor consumo de energía de circulación pueden ser modificadas para reducir las aceleraciones y frenadas, mientras que las rutas más rápidas pueden ser ajustadas para mejorar la eficiencia.

En este paso se desarrolla las solicitudes de cambio de ruta con la Municipalidad de Lima Metropolitana, ATU y la municipalidad del distrito afectado; considerando y tomando en cuenta este estudio de optimización y eficiencia que trae consigo las siguientes consecuencias:

- Mejorar el flujo de tránsito.
- Mejora en los tiempos de viaje.
- Mejora en la calidad del viaje con un comportamiento continuo y velocidad constante.
- Mejora evidente en la disminución de la contaminación ambiental, si bien no es un objetivo de estudio de esta investigación, se puede inducir que a menor consumo energético menor contaminación ambiental.

6.5 Coordinación

La coordinación entre todos los actores involucrados en el sistema de transporte garantiza que las rutas y horarios se ajusten correctamente y que los cambios se comuniquen de manera efectiva a los usuarios.

6.5.1 Coordinación entre operadores, conductores y usuarios

- Coordinación con conductores: Los conductores deben recibir información clara sobre las rutas optimizadas y los cambios por parte del centro de operaciones. Se debe proporcionar capacitación regular para asegurar que los conductores puedan ajustarse a las decisiones del operador.

- Comunicación con usuarios: Los pasajeros deben estar informados sobre cualquier cambio en las rutas, especialmente si hay desvíos debido a congestión o decisiones energéticas. Se pueden utilizar aplicaciones móviles y pantallas en las estaciones de transporte para notificar a los usuarios en tiempo real.

6.5.2 Participación ciudadana

Los usuarios del sistema también pueden proporcionar retroalimentación sobre la calidad del servicio y sugerir ajustes en las rutas. Esta retroalimentación puede ser utilizada para mejorar el modelo de optimización en futuras iteraciones.

Conclusiones

- En esta tesis se propuso el modelo de gestión de recorridos basándose en el modelo de Stackelberg para vehículos de transporte público de 3 rutas de Lima, el cual mejoro la eficiencia energética en 4% en la ruta 404 del corredor morado, 4% ruta 412 y 11% en la ruta de Jicamarca – Chorrillos; respecto al recorrido usual de estas unidades de transporte. Se ensambló y usó equipos de rastreo (GPS) de 36 USD por equipo, el cual es de menor costo a comparación de los equipos ya fabricados.
- Se desarrollo los parámetros de tiempo, distancia, velocidad y energía a través de códigos en Python y estos caracterizan los recorridos de las 3 rutas de transporte publico estudiadas. La ruta de Jicamarca – Chorrillos, 404 y 412 del corredor morado; presentan una velocidad promedio de entre 20 a 40 KPH. Se tuvo dispersiones en velocidades mayores respecto de horas del día de 7:00 am a 8:00 pm y los días de lunes a sábado en la semana. También se caracterizó la relación entre el consumo energético y las aceleraciones donde se apreció que, a picos de aceleraciones el consumo energético es mayor.
- Se estableció la relación entre la velocidad y el consumo energético a través de una regresión cúbica ponderada lineal cuya formula es: $E_{(j)} = A + B * Vkph + C * Vkph^2 + D * Vkph^3$ la cual indica una relación directa exponencial. Para la ruta de Jicamarca – Chorrillos se presenta la siguiente relación $E_{(j)} = -0.002710 + 439.2 * Vkph + 73.15 * Vkph^2 + 0.03608 * Vkph^3$ para la ruta 404 del corredor morado $E_{(j)} = -0.000002 + 440.8 * Vkph + 73.42 * Vkph^2 + 0.03608 * Vkph^3$ y para la ruta 412 del corredor morado $E_{(j)} = 0.000151 + 439.2 * Vkph + 73.15 * Vkph^2 + 0.03608 * Vkph^3$. Las ecuaciones tienen valores iguales en los coeficientes lineal, cuadrático y cúbico.
- Se propuso alternativas para mejorar la eficiencia energética de las 3 rutas de transporte público estudiadas a través del algoritmo de Dijkstra, cuyas entradas son la velocidad y nodos. Se obtiene consumo energético menores que el consumo real de los buses, teniendo una mayor eficiencia energética en el recorrido del bus de transporte publico ETUL4 S.A. respecto a los recorridos del corredor morado.

Adicional a los objetivos del estudio, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Las rutas estudiadas, en algunos tramos funcionan como corredor con flujo vehicular constante de velocidades altas y paraderos distanciados como es el caso de la Vía evitamiento, Panamericana Sur y la Av. Brasil. En estos tramos se aprecia unas velocidades mayores.
- El uso del GPS Arduino es muy eficiente en la toma de datos de posición cada segundo.
- El algoritmo de optimización de rutas Dijkstra es una herramienta que puede adaptarse fácilmente a las condiciones de los recorridos, pues puede admitir ciertas restricciones en el proceso de modelado de las rutas.
- La eficiencia energética está estrechamente relacionada con los tiempos de viaje, la contaminación y por ende la calidad de vida de los pasajeros, ellos se reflejan en las unidades funcionales donde se ve una mayor variación en la ruta Jicamarca – Chorrillos de 0.45 MJ/pas-km a 0.42 MJ/pas-km. En cambio, en las rutas del corredor morado la variación es mínima.
- Al mejorar la eficiencia energética, se obtiene menor consumo de combustible lo que reduce considerablemente la contaminación ambiental.
- El transporte público formal organizado como los corredores son una mejor alternativa a otro tipo de transporte publico formal o informal en buses. Se obtiene un modelo casi ideal a lo que se desea para el transporte de pasajeros.

Recomendaciones

- Se recomienda en futuras investigaciones la aplicación del modelo de Stackelberg haciendo usos de variables de demanda de pasajeros por paradero para establecer paraderos fijos en el uso del modelo matemático.
- Se recomienda en futuras investigaciones usar la metodología para medir costo operativo vehicular y se realice un análisis operacional.
- Se recomienda hacer el estudio de demanda de pasajeros por paradero para el análisis operacional de los buses de las empresas de transporte. En el análisis se podrá visualizar diferentes tramos por recorridos y por ende la operación de cantidad de buses.
- Para el desarrollo de parámetros que definen y caracterizan el recorrido de las rutas se recomienda la automatización con algoritmos en Python, así se agiliza en limpieza y estructuración de datos.
- Para obtener una mayor precisión con el consumo energético se recomienda utilizar modelos empíricos de consumo de combustible y establecer relaciones más ajustadas con la velocidad y variabilidad.
- Se sugiere utilizar el algoritmo de OCW-Dijkstra para proponer nuevas rutas alternas, ya que su estudio es más profundo al utilizar datos empíricos como oferta y demanda de pasajeros.
- Las empresas de transporte público en conjunto con la Municipalidad de Lima y la Autoridad de transporte urbano deben emplear la gestión de recorridos para todas las rutas de Lima, utilizando el modelo de Stackelberg en conjunto con el OCW-Dijkstra para la descongestión de vías.
- El dispositivo GPS Arduino al tener bajo costo, es recomendable aplicar para las empresas con gran flota de vehículos.
- Se recomienda realizar futuras investigaciones relacionadas con la contaminación ambiental y el consumo energético con relación a la eficiencia energética en los diferentes tipos de vehículos de transporte público.

Referencias bibliográficas

- Aerodyne. (2025, 19 de enero). *Comprensión de la aerodinamica en camiones*. Aerodyne. <https://aerodyneuk.com/fuel-saving/truck-aerodynamics/>
- Agencia de Cooperación Internacional del Japón [JICA]. (2004). *Plan Maestro de Transporte Urbano para el área Metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú*. http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/11798261_01.pdf
- Agencia de cooperación Internacional del Japón [JICA]. (2013). *Encuesta de recolección de Información Básica del Transporte Urbano en el Área Metropolitana de Lima y Callao*. https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12087532_01.pdf
- Alvarado, D., Londoño, J., y Mendoza, J. (2021). *Investigación, definición y propuesta de valor respecto a un sistema eficiente de recaudo electrónico para el transporte público masivo formal en Lima Metropolitana*. [Trabajo de Investigación para obtener el grado de Magister, Escuela de Administración de Negocios]. Repositorio de tesis ESAN. <https://repositorio.esan.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9664a19e-ddd8-453e-b8a4-5df4c4cafedc/content>
- Autocrash. (2016, 2 de setiembre). *Conozca la clasificación de los vehículos pesados de pasajeros*. Autocrash CEVI Colombia <https://www.revistaautocrash.com/conozca-la-clasificacion-los-vehiculos-pesados-pasajeros/>
- Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao. (2020). *Guía para la formulación del Plan Institucional de Movilidad Individual Sostenible*. Lima. <https://www.gob.pe/institucion/atu/informes-publicaciones/1961139-guia-para-la-formulacion-del-plan-institucional-de-movilidad-individual-sostenible>
- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of traffic simulation* (1a ed., Vol. 145.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>
- Becerra, L., Hernández, I., y Guardado, M. (2014). Estimación de la incertidumbre de la determinación de la densidad del aire. *Centro Nacional de Metrología*. <https://www.researchgate.net/publication/268344082>
- Bouzada, P., Martinelli, G., y Cillero, A. (2008). *Consumo de energía y emisiones asociados al transporte por autobús y autocar* (1a ed.). EnerTrans. ALSA.
- Celi, S. (2018). Análisis del comportamiento del transporte público a nivel mundial. *Espacios* 39(18), pág. 10. <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3042>

- Colque, A., Valdivia, R., Navarrete, M., y Aracena, S. (2021). Un sistema de información geográfico para el transporte público basado en el estándar GTFS realtime. *Ingeniare - Revista chilena de ingeniería*, 29(1), 51-62. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052021000100051
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2003). *Proyecciones de América Latina y el Caribe, 2003* (1a ed., Vol. 19). CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb18c7be-f929-468b-b34a-24686b9711db/content>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammena. (2018). *Sistemas de transporte eficientes, efectivos y sostenibles*. (1ª ed.). TRANSPerú.
- Doersing, N. (2015). Pseudocode, the Pseudocode Programming Process, and Alternatives to the PPP. *Universität Tübingen*. <https://ps.informatik.uni-tuebingen.de/teaching/ss15/sct/StudentMaterial/09%20-%20Noah%20Doersing%20-%20pseudocode.pdf>
- Eklund, P. W., Kirkby, S., & Pollitt, S. (1996). A dynamic multi-source Dijkstra's algorithm for vehicle routing. *Australian New Zealand Conference on Intelligent Information Systems*, 18-20. Adelaide, Australia. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/573976/authors#authors>
- Engineering ToolBox. (2008, 19 de enero). *Rolling friction and rolling resistance*. The Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html
- Estrada, A., Gallo, M., y Nuñez, E. (2016). Contaminación ambiental, su influencia en el ser humano, en especial: el sistema reproductor femenino. *Revista universidad y sociedad*, 8(3), 80-86. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2218-36202016000300010
- Fernández, R. (2011). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular* (1a ed.). Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. https://www.researchgate.net/profile/Rodrigo-Fernandez-11/publication/365740517_Elementos_de_la_teoria_del_trafico_vehicular/links/642ec978609c170a13fb4202/Elementos-de-la-teoria-del-trafico-vehicular.pdf
- Furones, A. (2010). *Sistema y marco de referencia terrestre. Sistemas de coordenadas*. (1a ed.) ACADEMIA – Universidad Politécnica de Valencia.

https://www.academia.edu/36657688/SISTEMA_Y_MARCO_DE_REFERENCIA_TERRESTRE_SISTEMAS_DE_COORDENADAS?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedByThis-secondOrderCitations&from=cover_page

Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2009). *Traffic and highway engineering* (1a ed.). Cengage Learning.

<http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/90130/1/Nicholas%20J.%20Garber%20%28Traffic%20%26%20Highway%20Engineering%29.pdf>

García-Asenjo, L. (2017). Conversión entre coordenadas geodésicas y coordenadas locales. Universidad Politécnica de Valencia.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/84060>

Ghosh, D., & Vogt, A. (2012). Outliers: An evaluation of methodologies. *Section on Survey Research Methods – JSM 2012*, 3455-3460.
http://www.asasrms.org/Proceedings/y2012/Files/304068_72402.pdf

Gómez, H. (2006). Sistemas de Información Geográfica, uso, técnicas y múltiples aplicaciones. *Geoenseñanza*, 11(1), 3-4.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36012424001>

Guzmán, C. (2022, 1 de marzo). Peruanos pasan un 50 % más de tiempo en el transporte público pese a pandemia. *PQS*.
<https://pqs.pe/actualidad/peruanos-pasan-un-50-mas-de-tiempo-en-el-transporte-publico-pese-a-pandemia/>

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6a ed.). Mc Graw 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>

Hernández, A., y Díaz, D. (2017). Contaminación ambiental y repositorios de datos históricos de contaminantes atmosféricos en Perú. *Salud pública de México*, 59(5), 507-508. <https://doi.org/10.21149/8476>

Huang, Y. (2018). Research on the Improvement of Dijkstra Algorithm in the Shortest Path Calculation. *Advances in Engineering Research. 4th International Conference on Machinery, Materials and Computer (MACMC 2017)*, 150, 745-749. <https://doi.org/10.2991/macmc-17.2018.141>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Estadísticas de Transporte en Lima*. INEI

- Jouan-Rimbaud, D., Bouveresse, E., Massart, D., & De Noord, O. (1999). Detection of prediction outliers and inliers in multivariate calibration. *Analytica Chimica Acta*, 388(3), 283-301. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00626-6](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00626-6)
- Kreuzer, F. M., & Wilmsmeier, G. (2014). *Eficiencia energética y movilidad en América Latina y el Caribe: Una hoja de ruta para la sostenibilidad* (1a ed.). CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/36798-eficiencia-energetica-movilidad-america-latina-caribe-hoja-ruta-la>
- Li, C., & Li, Z. (2019). Energy Saving and Emission Reduction Potential Analysis of Urban Public Transport in China—A Case Analysis of Yinchuan City. *CICTP 2019: Transportation in China-Connecting the world 2019*, 4144-4155. <https://doi.org/10.1061/9780784482292.358>
- Li, Y., Yu, T., & Yu, Y. (2016). Modeling Public Scheduling Based on IC Cards Data. *CICTP 2016: Green and Multimodal Transportation and Logistics*, 876-885. <https://doi.org/10.1061/9780784479896.080>
- Lima Cómo Vamos. (2021). *¿Cómo vamos en Lima y Callao? Reporte urbano de indicadores de calidad de vida 2021* (1a ed.). Sistema Urbano. <https://www.limacomovamos.org/wp-content/uploads/2022/11/ReporteIndicadoresLCV2021.pdf>
- Lima Cómo Vamos. (2023). *Lima y Callao según sus habitantes. Reporte urbano de percepción ciudadana – Edición 13.* (1ª ed.). Sistema Urbano <https://www.limacomovamos.org/wp-content/uploads/2024/01/EncuestaLCV2023.pdf>
- Liu, J., Dong, J., & Fan, B. (2012). Study on the Transport Planning and Management Model Based on the Environmental Protection. *The Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals*, 3073-3079. <https://doi.org/10.1061/40996%28330%29453>
- Marketwin. (2018). *Estudio de tráfico y tendencias de movilidad urbana en Lima - 2018.* (1ª ed.). PAD- Escuela de Dirección de la Universidad de Piura. <https://willardmanrique.pe/wp-content/uploads/2021/02/Estudio-de-Trafico-y-Tendencias-de-Movilidad-Urbana-2018.pdf>
- Mazloumi, E., Currie, G., & Rose, G. (2010). Using GPS Data to Gain Insight into Public Transport Travel Time Variability. *Journal of Transportation Engineering*, 136(7), 623–631. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000126](https://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000126)

- Mifsud, A., Ciocca, M., & Wieber, P.-B. (Mayo de 2021). Comfortable and Safe Decelerations for a Self-Driving. *ICRA 2021 - IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 1-7. <https://inria.hal.science/hal-03193874v1>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2023). *Anuario Estadístico 2023*. (1a ed.). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6778544/344726-anuario-estadistico-2023.pdf?v=1726086721>
- Montero, L., & Ros-Roca, X. (2020). Using GPS tracking data to validate route choice in OD trips within dense urban networks. *Transportation Research Procedia*, 47, 593–600. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.136>
- MOVEMOS. (2022, 20 de diciembre). *Estresómetro*. Asociacion MOVEMOS: <https://movemos.pe/uploads/MOVEMOS-ESTRESOMETRO-20.12.2022.pdf>
- Nasri, A., Zhang, L., Fan, J., Stewart, K., Younes, H., Fu, C., & Jessberger, S. (2019). Advanced Vehicle Miles Traveled Estimation Methods for Non-Federal Aid System Roadways Using GPS Vehicle Trajectory Data and Statistical Power Analysis. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2673(11), 296–308. <https://doi.org/10.1177/0361198119850790>
- Noreña, D. (2024, 28 de agosto). *Crisis del Transporte Público en Perú: ¿Podrán las Reformas Frenar la Caótica Congestión y la Inseguridad?*. GESTIÓN. <https://gestion.pe/blog/el-arte-de-emprender-y-fallar/2024/08/crisis-del-transporte-publico-en-peru-podran-las-reformas-frenar-la-caotica-congestion-y-la-inseguridad.html?ref=gesr>
- Oszczypala, M., Ziolkowski, J., Malachowski, J., & Legas, A. (2023). Nash Equilibrium and Stackelberg Approach for Traffic Flow Optimization in Road Transportation Networks - A Case Study of Warsaw. *Applied Sciences*, 13(5), 3085. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/5/3085>
- Peña, C. (2020). *Descubriendo Arduino*. (1a ed.). SIX EDICIONES. <https://books.google.com.ec/books?id=bL7PDwAAQBAJ&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Posada, J., y González-Calderón, C. (2013). Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera – modelos predictivos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(23), 35-46. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v12n23/v12n23a04.pdf>

- Posada, C. (2018, 26 de febrero). *Aumento continuo del parque automotor, un problema que urge solucionar*. Cámara de Comercio de Lima: https://apps.cameralima.org.pe/repositorioaps/0/0/par/r816_3/comercio%20exterio.pdf
- Rahman, M., Mou, J. R., Tara, K., & Sarkar, I. (2016). Real Time Google Map and Arduino Based Vehicle Tracking System. *2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE)*, 8-10. Bangladesh. <https://doi.org/10.1109/ICECTE.2016.7879577>
- Ramos, A. (2024, 4 de febrero). Una persona pierde 68 horas al año en el tráfico de Lima: un costo de S/2 mil millones en productividad. *Infobae*. <https://www.infobae.com/peru/2024/02/04/una-persona-pierde-68-horas-al-ano-en-el-trafico-de-lima-un-costo-de-s2-mil-millones-en-productividad/>
- Red de Estudios para el Desarrollo. (2023). *Impacto del transporte público formal sobre el bienestar de los usuarios*. Informe Especial REDES. <https://www.redesarrollo.pe/wp-content/uploads/2023/11/Informe-Especial-transporte-publico.pdf>
- Rey, J. (2006). *El Sistema de Posicionamiento Global - GPS*, ENY728S. University of Florida, IFAS Extension. <https://journals.flvc.org/edis/article/view/115973/114165>
- Santovenia, J., Tarragó, C., & CañedoAndalia, R. (2009). Sistemas de información geográfica para la gestión de la información. *ACIMED*, 20(5), 72-75. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1024-94352009001100007&script=sci_arttext&lng=pt
- Solís, J. P., Salazar, L. C., Violeta, R. C., & Solís Salazar, A. (2022). Congestión Vehicular y Contaminación Ambiental en Lima Metropolitana. *Revista Lasallista de Investigación*, 19(1), 152-164. <https://doi.org/10.22507/rli.v19n1a9>
- Talero, P., Organista, O., & Barbosa, L. H. (2013). *Velocidades: media, promedio e instantánea en el movimiento uniforme acelerado, algunos comentarios pedagógicos*. Universidad Central Colombia. https://www.researchgate.net/publication/259760944_Velocidades_media_promedio_e_instantanea_en_el_movimiento_uniforme_acelerado_algunos_comentarios_pedagogicos
- Tapia, B. S. (2021). *Generación de Rutas Óptimas en Sistemas de Transporte Público Masivo Usando Ciencia de Datos con Big Data y Machine Learning*. [Tesis de

- pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería], Repositorio de tesis de la Universidad Nacional de Ingeniería.
<http://hdl.handle.net/20.500.14076/22099>
- The Environmental Association for Universities. (2010). *Convert energy data into different units for ease of comparisons and calculations*. Travelife: https://www.researchgate.net/publication/223473194_Energy_use_associated_with_different_travel_choices
- Thomas, H., & Sáenz-Acosta, H. (2024, 14 de junio). *¿Qué tan central es el transporte informal en nuestra movilidad? Evidencia a partir de las periferias populares de Bogotá y Lima*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
<https://hal.science/hal-04626458>
- Thomson, I., & Bull, A. (2001). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. (1a ed.). Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL.
<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/c7b69c09-8fdb-4633-8950-05abc459c15c/content>
- Vizuite Tipan, X. A. (2015). *Propuesta metodológica para evaluar la eficiencia en la Gestión Operativa de los Servicios de Transporte Público Masivo de Pasajeros*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio de tesis de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador
- Winkler, W. (1998). Problems with inliers. *Bureau of the Census*.
<https://www.census.gov/content/dam/Census/library/working-papers/1998/adrm/rr9805.pdf>
- Wolshon, B. (2001). Planning for the evacuation of New Orleans. *ITE Journal*, 72(2), 44-49. <https://trid.trb.org/view/717612>
- Zhang, J.-d., Feng, Y.-j., Shi, F.-f., Wang, G., Ma, B., Li, R.-s., & Jia, X.-y. (2016). Vehicle routing in urban areas based on the Oil Consumption Weight -Dijkstra algorithm. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(7), 495-502.
<https://doi.org/10.1049/iet-its.2015.0168>
- Zhang, Y. (2018). Measuring operating efficiency and service effectiveness of public transit in China: A trans-log stochastic frontier analysis. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 12(1), 105-110.
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JHTRCQ.0000617>
- Zhang, Y., Li, W., Qin, Y., & Zhang, Y. (2014). Synthetic Matrix Representation Method Research on Urban Road Networks. *CICTP 2014: Safe, Smart, and*

Sustainable Multimodal Transportation Systems, 3344-3353.
<https://doi.org/10.1061/9780784413623.320>

Zhong, C. (2013). The study of regional traffic route planning based on management perspective. *ICTE* 2013, 3148-3152.
<https://doi.org/10.1061/9780784413159.456>

Anexos

Anexo A: Paraderos de las rutas

Tabla N° 53. Paraderos de la ruta Jicamarca - Chorrillos

IDA Y VUELTA	
1 Portón	53 Puente Santa Rosa
2 La Capilla	54 Las Palmeras
3 Mar Del Coral	55 Quechuas
4 Montenegro	56 Javier Prado
5 Montenegro	57 Hipódromo
6 Mar Sur	58 Derby
7 Avenida Próceres De La Independencia, 37	59 Pentagonito
8 Motupe	60 Primavera
9 Santa María	61 Subaru
10 8 De Mariscal	62 Instituto Monterrico
11 Mariátegui	63 Prosegur
12 Cruce	64 Benavides
13 La Cinco	65 Ricardo Palma
14 La Cuatro	66 Mercado Flores Atocongo
15 Avenida Próceres De La Independencia	67 Tinoco
16 Seoane	68 Atocongo
17 Bayóvar	69 Próceres
18 Republicana	70 Avenida Pedro Miotta, 1011
19 La Quince	71 Avenida Pedro Miotta, 790
20 Santa Rosa	72 Avenida Pedro Miotta, 484
21 San Martín	73 Metro
22 La Ocho	74 Puente Alipio
23 Canto Rey	75 Prolongación Ramon Vargas Machuca 2
24 Sedapal	76 Cementerio Pnp Santa Rosa
25 Avenida Fernando Wiesse, 2948	77 Avenida Capitán Alipio Ponce Vasquez, 487
26 San Carlos	78 Alipio Ponce
27 Auxiliar Avenida Próceres De La Independencia, 2644	79 Avenida Guardia Civil Sur, 794
28 Basadre	80 Guardia Civil / El Sol
29 San Hilarión	81 Los Meteoros
30 Los Postes	82 Guardia Peruana
31 Proceres De La Independencia, 1954	83 Calango
32 La Doce	84 Óv. La Curva
33 La Hacienda	85 Buenos Aires
34 Proceres De La Independencia, 1415	86 Santa Anita
35 Celima	87 10 De Noviembre
36 Ascarruz	88 Huaylas
37 Calle San Aurelio, 964	89 Machu Picchu

38	Chinchaysuyo X Coricancha	90	A. Los Pinos
39	Chinchaysuyo X Cajamarquilla	91	Plaza Veá
40	Chinchaysuyo X Chasquis	92	Soledad
41	Chinchaysuyo X Chimu	93	San Lorenzo
42	Chinchaysuyo X Amautas	94	Sauces
43	Puente Nuevo	95	Los Cedros
44	Charapita	96	Avenida Alameda Sur, 1213
45	Ramiro Prialé	97	Alameda Sur
46	Atarjea	98	Anguila
47	Nocheto	99	Avenida Ballestas, 343
48	Lobatón	100	Ballestas
49	Perales	101	Aruba
50	Puente Azul	102	Alameda Los Horizontes 905
51	Celedonio	103	Alameda Los Horizontes, 672
52	Puente Santa Anita	104	Alameda Los Horizontes 448

(Fuente: Adaptado de Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao, 2020)

Tabla N° 54. Paraderos de la ruta 404 del corredor morado

N°	IDA	N°	VUELTA
1	La Capilla	1	Venus
2	Montenegro	2	Javier Prado
3	Motupe	3	Hospital PN
4	8 de Mariscal	4	Colegio
5	Mariátegui	5	Óvalo
6	La Cinco	6	La Dieciocho
7	La Cuatro	7	Bolívar
8	Bayóvar	8	La Doce
9	La Quince	9	La Nueve
10	Santa Rosa	10	H. del Niño
11	San Martín	11	Pza. Bolognesi
12	La Ocho	12	Chota
13	Sedapal	13	Garcilaso
14	San Carlos	14	José Gálvez
15	Basadre	15	Montevideo
16	Los Postes	16	N. de Piérola
17	La Hacienda	17	Cuzco
18	Celima	18	Ucayali
19	Pirámide de Sol	19	Junín
20	Túpac Amaru	20	Acho
21	Lima	21	Mdo. de Flores
22	Concejo	22	Concejo
23	Mdo. de Flores	23	Túpac Amaru
24	Acho	24	Pirámide del Sol
25	Ancash	25	Ascarruz
26	Ucayali	26	Celima
27	Cuzco	27	La Hacienda
28	N. de Piérola	28	Los Postes
29	Grau	29	Basadre
30	Cotabambas	30	San Carlos
31	Garcilaso	31	Sedapal
32	Pza. Bolognesi	32	La Ocho
33	Don Bosco	33	San Martín
34	H. del Niño	34	Santa Rosa
35	La Nueve	35	La Quince
36	La Doce (mercado)	36	Bayóvar
37	Bolívar	37	La Cuatro
38	La Dieciocho	38	La Cinco
39	Óvalo	39	Mariátegui
40	Colegio	40	8 de Mariscal
41	Hospital PNP	41	Motupe

Nº	IDA	Nº	VUELTA
42	Javier Prado	42	Montenegro
43	Venus	43	La Capilla
44	La Virgen		

(Fuente: Adaptado de Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao, 2020)

Tabla N° 55. Paraderos de la ruta 412 del corredor morado

N°	IDA	N°	VUELTA
1	La Capilla	1	Ica
2	Montenegro	2	Pizarro
3	Motupe	3	Alcázar
4	8 de Mcal. Cáceres	4	La 15 de Caja de agua
5	Mariátegui	5	Moquegua
6	La cinco	6	Próceres
7	La cuatro	7	Túpac Amaru
8	Bayóvar	8	Piramide del Sol
9	La quince	9	Celima
10	Santa Rosa	10	La Hacienda
11	San Martin	11	La doce
12	La ocho	12	Los Postes
13	Canto Rey	13	Basadre
14	San Carlos	14	San Carlos
15	Basadre	15	Canto Rey
16	Los postes	16	La Ocho
17	La doce	17	San Martin
18	La Hacienda	18	Santa Rosa
19	Celima	19	Basadre
20	Pirámide del sol	20	San Carlos
21	Túpac Amaru	21	Canto Rey
22	Las Flores	22	La Ocho
23	Comisaria	23	San Martin
24	La losa	24	Santa Rosa
25	Túnel	25	Motupe
26	Alcazar	26	Montenegro
27	Pizarro	27	La Capilla
28	Ica		

(Fuente: Adaptado de Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao, 2020)

Anexo B: Recolección de datos de posición

Tabla N° 56. Datos del bus de placa ANJ-760, ruta Jicamarca - Chorrillos

FECHA	IDA	VUELTA
15/05/2021	1	0
19/05/2021	1	0
20/05/2021	3	3
21/05/2021	2	2
22/05/2021	3	3
23/05/2021	0	1
25/05/2021	3	3
26/05/2021	3	2
27/05/2021	4	4
28/05/2021	1	1
29/05/2021	2	1
1/06/2021	0	1
7/06/2021	2	1
8/06/2021	3	2
9/06/2021	3	3
10/06/2021	1	1
14/06/2021	3	2
15/06/2021	3	3
16/06/2021	0	1
17/06/2021	2	1
18/06/2021	3	3

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 57. Datos del bus de placa F5X-713, ruta Jicamarca - Chorrillos

FECHA	IDA	VUELTA
18/05/2021	1	0
20/05/2021	4	4
26/05/2021	1	0
27/05/2021	3	4
4/06/2021	2	2
5/06/2021	4	4
8/06/2021	2	1
10/06/2021	1	1
11/06/2021	3	2
12/06/2021	1	1
15/06/2021	4	4
16/06/2021	3	3
17/06/2021	3	2
19/06/2021	1	2

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 58. Datos del bus de placa AUZ-900, ruta 412 del corredor morado

FECHA	IDA	VUELTA
20/05/2021	6	6
21/05/2021	3	3
22/05/2021	4	4
24/05/2021	1	1
26/05/2021	1	0

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 59. Datos del bus de placa AUY-879, ruta 404 del corredor morado

FECHA	IDA	VUELTA
26/05/2021	2	1
27/05/2021	4	4
28/05/2021	4	3
30/05/2021	6	6
31/05/2021	4	5
2/06/2021	2	2
3/06/2021	4	4
5/06/2021	4	4
8/06/2021	5	5
9/06/2021	4	4
10/06/2021	3	3

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 60. Datos del bus de placa AUY-879, ruta 412 del corredor morado

FECHA	IDA	VUELTA
26/05/2021		1
31/05/2021	2	4
2/06/2021		1
3/06/2021		1
8/06/2021		1
9/06/2021		1
10/06/2021		1

(Fuente: Elaboración propia)

Anexo C: Ocupación vehicular

RUTA JICAMARCA - CHORRILLOS

Información proporcionada por Elías Abel Estrella Gutiérrez, Encargado de ruta de la empresa ETUL4 S.A.

Tabla N° 61. Cantidad de usuarios en la ruta Jicamarca - Chorrillos

Cantidad de usuarios por día	Buses en operación	Distribución de vueltas	Día de mayor productividad	Peso Bruto
40,000	80	3V	Lunes	17 ton
45,000	85	4V	Viernes	17 ton

(Fuente: Elaboración propia)

RUTA 404 DEL CORREDOR MORADO

Tabla N° 62. Ocupación vehicular por ruta 404

N°	PARADERO	PASAJEROS QUE SUBEN	PASAJEROS QUE BAJAN	ABORDO TOTAL
1	La Capilla	2	0	2
2	Montenegro	3	0	5
3	Motupe	5	0	10
4	8 de Mariscal	4	0	14
5	Mariátegui	2	0	16
6	La Cinco	5	0	21
7	La Cuatro	2	0	23
8	Bayóvar	3	5	21
9	La Quince	1	0	22
10	Santa Rosa	6	1	27
11	San Martín	2	0	29
12	La Ocho	4	2	31
13	Sedapal	4	4	31
14	San Carlos	4	0	35
15	Basadre	2	0	37
16	Los Postes	2	2	37
17	La Hacienda	3	0	40
18	Celima	3	3	40
19	Pirámide de Sol	0	3	37
20	Túpac Amaru	1	0	38
21	Lima	2	1	39
22	Concejo	2	1	40
23	Mdo. de Flores	5	4	41
24	Acho	5	2	44
25	Ancash	4	2	46
26	Ucayali	5	4	47
27	Cuzco	4	4	47
28	N. de Piérola	4	3	48
29	Grau	2	3	47
30	Cotabambas	1	1	47
31	Garcilaso	1	5	43
32	Pza. Bolognesi	1	5	39
33	Don Bosco	0	0	39
34	H. del Niño	1	5	35
35	La Nueve	0	3	32
36	La Doce (mercado)	0	3	29
37	Bolívar	0	4	25
38	La Dieciocho	0	0	25
39	Óvalo	0	4	21

40	Colegio	0	2	19
41	Hospital PNP	0	6	13
42	Javier Prado	0	6	7
43	Venus	0	3	4
44	La Virgen	0	4	0
Máx				48
Mín				0
Promedio				29
Capacidad				50

(Fuente: Elaboración propia)

RUTA 412 DEL CORREDOR MORADO

Tabla N° 63. Ocupación vehicular por ruta 412

N°	PARADERO	PASAJEROS QUE SUBEN	PASAJEROS QUE BAJAN	ABORDO TOTAL
1	La Capilla	2	0	2
2	Montenegro	3	0	5
3	Motupe	5	0	10
4	8 de Mcal. Cáceres	4	0	14
5	Mariátegui	2	0	16
6	La cinco	5	0	21
7	La cuatro	5	0	26
8	Bayóvar	5	5	26
9	La quince	7	2	31
10	Santa Rosa	7	3	35
11	San Martin	2	0	37
12	La ocho	3	2	38
13	Canto Rey	4	0	42
14	San Carlos	6	0	48
15	Basadre	2	2	48
16	Los postes	2	0	50
17	La doce	4	7	47
18	La Hacienda	4	6	45
19	Celima	4	6	43
20	Pirámide del sol	4	6	41
21	Túpac Amaru	4	7	38
22	Las Flores	3	8	33
23	Comisaria	0	4	29
24	La losa	5	6	28
25	Túnel	0	8	20
26	Alcazar	0	8	12
27	Pizarro	0	6	6
28	Ica	0	6	0

Máx	50
Mín	0
Promedio	28
Capacidad	50

(Fuente: Elaboración propia)

Anexo D: Códigos en Python de normalización de velocidades y regresión lineal ponderada

Este código se realiza para la ruta de Jicamarca – Chorrillos, se hace igual para las demás rutas.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import datetime
import math
from geopy.distance import geodesic
from pyproj import CRS, Transformer
from fancyimpute import IterativeImputer
import seaborn as sns
import scipy.stats as stats
import statsmodels.api as sm
from scipy.optimize import curve_fit
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy.feature as cfeature
import matplotlib.colors as mcolors
import matplotlib as mpl

# Cargar los dos archivos CSV RUTA JICAMARCA - CHORRILLOS
df1 = pd.read_csv('D:/TESIS/DATOS/GESTION DE VEHICULOS/DATOS
CORREDORES/RUTA 1/ANJ-760 RUTA 1.csv', encoding="utf-8")
df2 = pd.read_csv('D:/TESIS/DATOS/GESTION DE VEHICULOS/DATOS
CORREDORES/RUTA 1/F5X-713 RUTA 1.csv', encoding="utf-8")
# Agregar una columna para identificar el tipo de placa
df1['tipo_placa'] = 'ANJ-760' # Cambia el nombre según sea
necesario
df2['tipo_placa'] = 'F5X-713' # Cambia el nombre según sea
necesario
# Unir los DataFrames
data = pd.concat([df1, df2], ignore_index=True)

data["FECHA"] = pd.to_datetime(data["FECHA Y HORA G-5"], format="%Y-
%m-%d %H:%M:%S")
data['HOUR'] = data['FECHA'].dt.strftime('%H:%M:%S')
data = data.drop(["field_1", "index", 'geometry',
'F_H_str'], axis=1)
# Ordenar por tipo de vehículo y fecha
data = data.sort_values(by=['tipo_placa', 'FECHA'])
#data.head()

# Define el sistema de referencia de coordenadas para latitud y
longitud (WGS84)
wgs84 = CRS('EPSG:4326') # WGS84
```

```
# Define el sistema de referencia de coordenadas para UTM (por
ejemplo, UTM zona 33N)
utm = CRS('EPSG:32718') # UTM zona 18S para el hemisferio sur

# Crea un transformador para convertir de WGS84 a UTM
transformer = Transformer.from_crs(wgs84, utm, always_xy=True)

# Realiza la conversión
data['ESTE'], data['NORTE'] =
transformer.transform(data['LON'].to_numpy(),
data['LAT'].to_numpy())

# Redondea las coordenadas
data[['ESTE', 'NORTE']] = data[['ESTE', 'NORTE']].round(3)

# Calcular las diferencias cuadradas de ESTE y NORTE
data["DIF_ESTE"] = data["ESTE"].diff() ** 2
data["DIF_NORTE"] = data["NORTE"].diff() ** 2

# Suma de diferencias cuadradas para obtener S
data["S"] = data["DIF_ESTE"] + data["DIF_NORTE"]

# Calcular la distancia euclidiana directamente
data["d"] = data["S"].apply(lambda x: math.sqrt(x) if
pd.notnull(x) else 0)

# Calcular la diferencia de tiempo en segundos
data["t"] = data["FECHA"].diff().dt.total_seconds()

# Calcular la velocidad en km/h
data["Vkph"] = data.apply(lambda fila: (fila["d"] / fila["t"] *
3.6) if fila["t"] > 0 else 0, axis=1)

# Mostrar los primeros resultados
data.head()

data_filtered = data.loc[data['t'] == 1]
data = data_filtered
data.head()

# Crear el boxplot para la columna de velocidad
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.boxplot(data["Vkph"].dropna(), vert=False, patch_artist=True)
plt.title("Boxplot de Velocidades (Vkph)")
plt.xlabel("Velocidad (km/h)")
plt.grid(True, axis='x', linestyle='--', alpha=0.6)
plt.show()

# Calcular el z-score de 'Vkph'
z_scores = stats.zscore(data['Vkph'])
```

```
# Filtrar los datos donde el valor absoluto del z-score sea menor
o igual a 3
data_filtered = data.loc[abs(z_scores) <= 3]

# Actualizar el DataFrame con los datos filtrados
data = data_filtered
# Crear el boxplot para la columna de velocidad
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.boxplot(data["Vkph"].dropna(), vert=False, patch_artist=True)
plt.title("Boxplot de Velocidades (Vkph)")
plt.xlabel("Velocidad (km/h)")
plt.grid(True, axis='x', linestyle='--', alpha=0.6)
plt.show()

from scipy import stats
import matplotlib.pyplot as plt

# Calcular el IQR
Q1 = data['Vkph'].quantile(0.25)
Q3 = data['Vkph'].quantile(0.75)
IQR = Q3 - Q1

# Filtrar los datos para eliminar solo los valores atípicos
superiores
data_filtered = data[data['Vkph'] <= (Q3 + 1.5 * IQR)]

# Actualizar el DataFrame con los datos filtrados
data = data_filtered

# Crear el boxplot para la columna de velocidad
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.boxplot(data["Vkph"].dropna(), vert=False, patch_artist=True)
plt.title("Boxplot de Velocidades (Vkph)")
plt.xlabel("Velocidad (km/h)")
plt.grid(True, axis='x', linestyle='--', alpha=0.6)
plt.show()

def fill_missing_dates(group):
    # Ordenar el grupo por FECHA
    group = group.sort_values('FECHA').reset_index(drop=True)

    # Crear un rango de todas las fechas en el grupo
    all_dates = pd.date_range(start=group['FECHA'].min(),
                             end=group['FECHA'].max(), freq='s')

    # Crear un DataFrame para todas las fechas
    all_dates_df = pd.DataFrame({'FECHA': all_dates})

    # Hacer un merge con el DataFrame original
    full_group = all_dates_df.merge(group, on='FECHA', how='left')

    # Imputar valores faltantes de velocidad y distancia usando el
    promedio de los 4 registros más cercanos
```

```
for col in ['Vkph', 'd']:  
    # Calcular el promedio de los 4 registros más cercanos  
    full_group[col] =  
full_group[col].fillna(full_group[col].rolling(window=4,  
min_periods=1).mean())  
  
    # Rellenar las filas que tengan datos faltantes para  
    'filename' y 'hour' con la información más cercana  
    full_group['filename'] = full_group['filename'].ffill()  
    full_group['HORA'] = full_group['HOUR'].ffill()  
    full_group['tipo_placa'] = full_group['tipo_placa'].ffill()  
    full_group['HOUR'] = full_group['HOUR'].ffill()  
    full_group['t'] = full_group['t'].ffill()  
  
    # Eliminar filas donde no se puede rellenar 'filename', 'hour'  
    y no hay datos de 'velocidad' o 'distancia'  
    full_group =  
full_group.dropna(subset=['HORA', 'filename', 'tipo_placa', 'HOUR',  
'Vkph', 'd', 't'], how='any')  
  
    return full_group  
  
# Aplicar la función a cada grupo de 'filename'  
filled_data = data.groupby('filename',  
group_keys=False).apply(fill_missing_dates).reset_index(drop=True)  
  
# Verificación de resultados  
print(filled_data.info())  
  
# Definir constantes  
cd=0.475 #corredor y bus grande  
u = 0.0085 # coeficiente de fricción  
p = 1.12 # densidad del aire en kg/m3  
A = 6.328482 # área bus grande m2  
g = 9.81 # aceleración debida a la gravedad m/s2  
masa = 18960 # Masa constante en kg # Peso del bus más el peso de  
28 personas (70 kg), número de asientos (PROMEDIO = 46 personas  
pero se redondea a la capacidad del bus)  
  
# Convertir 'vkph' de km/h a m/s  
data['v_mps'] = data['Vkph'] * (5 / 18)  
  
# Calcular energía aerodinámica  
data['Ea'] = 0.5 * cd * A * p * (data['v_mps']**3)  
  
# Calcular energía de fricción  
data['Ef'] = u * g * data['v_mps'] * masa  
  
# Calcular energía de circulación  
data['Eb'] = 0.5 * (masa) * (data['v_mps']**3) / (data['d']) / 10  
# Simplificado  
data.loc[data['d'] == 0, 'Eb'] = 0 # Asignar 0 a Eb donde d es 0
```

```
# Calcular energía total
data['Etotal'] = data['Ea'] + data['Ef'] + data['Eb']

data['Ea'] = data['Ea'].round(3)
data['Ef'] = data['Ef'].round(3)
data['Eb'] = data['Eb'].round(3)
data['Etotal'] = data['Etotal'].round(3)
# Mostrar el DataFrame con los resultados
print(data)

from scipy.stats import kstest, boxcox

# Extraer la hora de la columna 'FECHA'
data['HORA'] = data['FECHA'].dt.hour

# Crear un DataFrame para almacenar los resultados de las pruebas
de normalidad
resultados_normalidad = pd.DataFrame(columns=['filename', 'HORA',
'KS_Statistic', 'KS_p_value'])

# Función para realizar las pruebas de normalidad por hora y por
filename
def pruebas_normalidad_por_hora_y_filename(data):
    for filename in data['filename'].unique():
        for hora in range(24):
            subset = data[(data['filename'] == filename) &
(data['HORA'] == hora)]['Vkph'].dropna()
            if len(subset) > 0:
                ks_stat, ks_p = kstest(subset, 'norm',
args=(subset.mean(), subset.std()))

resultados_normalidad.loc[len(resultados_normalidad)] = [filename,
hora, ks_stat, ks_p]
    return resultados_normalidad

# Realizar las pruebas de normalidad por hora y por filename
resultados_normalidad =
pruebas_normalidad_por_hora_y_filename(data)
print(resultados_normalidad)
```

Anexo E: Códigos en Python de análisis de datos

Este código se realiza para la ruta de Jicamarca – Chorrillos, se hace igual para las demás rutas.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import datetime
import math
from geopy.distance import geodesic
from pyproj import CRS, Transformer
from fancyimpute import IterativeImputer
import seaborn as sns
import scipy.stats as stats
import statsmodels.api as sm
from scipy.optimize import curve_fit
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy.feature as cfeature
import matplotlib.colors as mcolors
import matplotlib as mpl

# Cargar los dos archivos CSV RUTA JICAMARCA - CHORRILLOS
df1 = pd.read_csv('D:/TESIS/DATOS/GESTION DE VEHICULOS/DATOS
CORREDORES/RUTA 1/ANJ-760 RUTA 1.csv', encoding="utf-8")
df2 = pd.read_csv('D:/TESIS/DATOS/GESTION DE VEHICULOS/DATOS
CORREDORES/RUTA 1/F5X-713 RUTA 1.csv', encoding="utf-8")
# Agregar una columna para identificar el tipo de placa
df1['tipo_placa'] = 'ANJ-760' # Cambia el nombre según sea
necesario
df2['tipo_placa'] = 'F5X-713' # Cambia el nombre según sea
necesario
# Unir los DataFrames
data = pd.concat([df1, df2], ignore_index=True)

# Transformar a formato hora
data["FECHA"] = pd.to_datetime(data["FECHA Y HORA G-5"], format="%Y-
%m-%d %H:%M:%S")
data['HOUR'] = data['FECHA'].dt.strftime('%H:%M:%S')
data = data.drop(["field_1", "index", 'geometry',
'F_H_str'], axis=1)
# Ordenar por tipo de vehículo y fecha
data = data.sort_values(by=['tipo_placa', 'FECHA'])
#data.head()

# Define el sistema de referencia de coordenadas para latitud y
longitud (WGS84)
wgs84 = CRS('EPSG:4326') # WGS84

# Define el sistema de referencia de coordenadas para UTM (por
ejemplo, UTM zona 33N)
```

```
utm = CRS('EPSG:32718') # UTM zona 18S para el hemisferio sur

# Crea un transformador para convertir de WGS84 a UTM
transformer = Transformer.from_crs(wgs84, utm, always_xy=True)

# Realiza la conversión
data['ESTE'], data['NORTE'] =
transformer.transform(data['LON'].to_numpy(),
data['LAT'].to_numpy())

# Redondea las coordenadas
data[['ESTE', 'NORTE']] = data[['ESTE', 'NORTE']].round(3)

# Calcular las diferencias cuadradas de ESTE y NORTE
data["DIF_ESTE"] = data["ESTE"].diff() ** 2
data["DIF_NORTE"] = data["NORTE"].diff() ** 2

# Suma de diferencias cuadradas para obtener S
data["S"] = data["DIF_ESTE"] + data["DIF_NORTE"]

# Calcular la distancia euclidiana directamente sin usar apply
data["d"] = data["S"].apply(lambda x: math.sqrt(x) if
pd.notnull(x) else 0)

# Calcular la diferencia de tiempo en segundos
data["t"] = data["FECHA"].diff().dt.total_seconds()

# Calcular la velocidad en km/h
data["Vkph"] = data.apply(lambda fila: (fila["d"] / fila["t"] *
3.6) if fila["t"] > 0 else 0, axis=1)

# Mostrar los primeros resultados
data.head()

data_filtered = data.loc[data['t'] == 1]
data = data_filtered
data.head()

# Crear el boxplot para la columna de velocidad
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.boxplot(data["Vkph"].dropna(), vert=False, patch_artist=True)
plt.title("Boxplot de Velocidades (Vkph)")
plt.xlabel("Velocidad (km/h)")
plt.grid(True, axis='x', linestyle='--', alpha=0.6)
plt.show()

# Calcular el z-score de 'Vkph'
z_scores = stats.zscore(data['Vkph'])

# Filtrar los datos donde el valor absoluto del z-score sea menor
o igual a 3
```

```
data_filtered = data.loc[abs(z_scores) <= 3]

# Actualizar el DataFrame con los datos filtrados
data = data_filtered
# Crear el boxplot para la columna de velocidad
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.boxplot(data["Vkph"].dropna(), vert=False, patch_artist=True)
plt.title("Boxplot de Velocidades (Vkph)")
plt.xlabel("Velocidad (km/h)")
plt.grid(True, axis='x', linestyle='--', alpha=0.6)
plt.show()

def fill_missing_dates(group):
    # Ordenar el grupo por FECHA
    group = group.sort_values('FECHA').reset_index(drop=True)

    # Crear un rango de todas las fechas en el grupo
    all_dates = pd.date_range(start=group['FECHA'].min(),
end=group['FECHA'].max(), freq='s')

    # Crear un DataFrame para todas las fechas
    all_dates_df = pd.DataFrame({'FECHA': all_dates})

    # Hacer un merge con el DataFrame original
    full_group = all_dates_df.merge(group, on='FECHA', how='left')

    # Imputar valores faltantes de velocidad y distancia usando el
promedio de los 4 registros más cercanos
    for col in ['Vkph', 'd']:
        # Calcular el promedio de los 4 registros más cercanos
        full_group[col] =
full_group[col].fillna(full_group[col].rolling(window=4,
min_periods=1).mean())

    # Rellenar las filas que tengan datos faltantes para
'filename' y 'hour' con la información más cercana
    full_group['filename'] = full_group['filename'].ffill()
    full_group['HORA'] = full_group['HORA'].ffill()
    full_group['tipo_placa'] = full_group['tipo_placa'].ffill()
    full_group['HOUR'] = full_group['HOUR'].ffill()
    full_group['LON'] = full_group['LON'].ffill()
    full_group['LAT'] = full_group['LAT'].ffill()
    full_group['t'] = full_group['t'].ffill()

    # Eliminar filas donde no se puede rellenar 'filename', 'hour'
y no hay datos de 'velocidad' o 'distancia'
    full_group =
full_group.dropna(subset=['HORA', 'filename', 'tipo_placa', 'HOUR',
'Vkph', 'd', 'LON', 'LAT', 't'], how='any')

    return full_group

# Aplicar la función a cada grupo de 'filename'
```

```
filled_data = data.groupby('filename',
group_keys=False).apply(fill_missing_dates).reset_index(drop=True)

# Verificación de resultados
print(filled_data.info())

data = data.sort_values(by='HOUR')
plt.figure(figsize=(12, 6))
sns.boxplot(x='HORA', y='Vkph', data=data, color='skyblue')
plt.title("Gráfico de Cajas: Velocidad (KPH) por Hora")
plt.xlabel("Hora")
plt.ylabel("Velocidad (KPH)")
plt.grid(True, axis='y', linestyle='--', alpha=0.6)
plt.xticks(rotation=45)
plt.tight_layout()
plt.show()

# Mapeo de los días de la semana
dias_semana_map = {
    0: 'Lunes',
    1: 'Martes',
    2: 'Miércoles',
    3: 'Jueves',
    4: 'Viernes',
    5: 'Sábado',
    6: 'Domingo'
}
data['Dia_Semana'] =
data['FECHA'].dt.dayofweek.map(dias_semana_map)

# Calcular el promedio de velocidad por día de la semana
promedio_velocidad =
data.groupby('Dia_Semana')['Vkph'].mean().reset_index()

# Renombrar la columna 'Vkph' a 'Vkph_Promedio' antes del merge
promedio_velocidad.rename(columns={'Vkph': 'Vkph_Promedio'},
inplace=True)

# Realizar el merge antes de convertir a categórico
data = data.merge(promedio_velocidad, on='Dia_Semana', how='left')

# Ahora podemos convertir 'Dia_Semana' a categórico
orden_dias = ['Lunes', 'Martes', 'Miércoles', 'Jueves', 'Viernes',
'Sábado', 'Domingo']
data['Dia_Semana'] = pd.Categorical(data['Dia_Semana'],
categories=orden_dias, ordered=True)
promedio_velocidad['Dia_Semana'] =
pd.Categorical(promedio_velocidad['Dia_Semana'],
categories=orden_dias, ordered=True)

# Asegurar que 'Vkph_Promedio' es numérico
```

```
data['Vkph_Promedio'] = pd.to_numeric(data['Vkph_Promedio'],
errors='coerce')

# Manejar posibles NaN
data = data.dropna(subset=['Vkph_Promedio'])

# Normalizar los valores promedio para el mapa de colores
vmin = data['Vkph_Promedio'].min()
vmax = data['Vkph_Promedio'].max()
norm = mpl.colors.Normalize(vmin=vmin, vmax=vmax)

# Crear la paleta de colores
cmap = mpl.colormaps['RdYlGn'] # Rojo para bajas velocidades,
verde para altas

# Obtener los colores para cada caja basado en el promedio
# Usamos el DataFrame 'promedio_velocidad' para obtener los
promedios por día
box_colors = []
for dia in orden_dias:
    if dia in promedio_velocidad['Dia_Semana'].values:
        avg_speed =
promedio_velocidad.loc[promedio_velocidad['Dia_Semana'] == dia,
'Vkph_Promedio'].values[0]
        box_colors.append(cmap(norm(avg_speed)))
    else:
        box_colors.append((0.5, 0.5, 0.5, 1.0)) # Gris para días
sin datos

# Crear el gráfico de cajas
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))

boxplot = sns.boxplot(
    x='Dia_Semana',
    y='Vkph',
    data=data,
    order=orden_dias,
    ax=ax,
    showfliers=False # Opcional
)

# Personalizar el gráfico
plt.title('Gráfico de Cajas de Velocidades por Día de la Semana')
plt.xlabel('Día de la Semana')
plt.ylabel('Velocidad (km/h)')
plt.xticks(rotation=45)

plt.tight_layout()
plt.show()

import matplotlib.pyplot as plt
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy.io.img_tiles as cimgt
```

```
# Ordenar los datos por fecha
data = data.sort_values(by='FECHA')

# Normalizar las velocidades para usar en un mapa de colores
norm = plt.Normalize(data['Vkph'].min(), data['Vkph'].max())
colors = plt.cm.RdYlGn_r(norm(data['Vkph'])) # Usar el colormap
invertido

# Crear un proveedor de teselas de OpenStreetMap
osm_tiles = cimgt.OSM()

# Crear una figura y ejes con una proyección geográfica
plt.figure(figsize=(10, 10))
ax = plt.axes(projection=osm_tiles.crs)

# Definir el área de interés basada en los datos
min_lon = data['LON'].min() - 0.01
max_lon = data['LON'].max() + 0.01
min_lat = data['LAT'].min() - 0.01
max_lat = data['LAT'].max() + 0.01
ax.set_extent([min_lon, max_lon, min_lat, max_lat],
crs=ccrs.PlateCarree())

# Añadir las teselas de OpenStreetMap al mapa
ax.add_image(osm_tiles, 15) # El segundo parámetro es el nivel de
zoom

# Graficar la ruta con los colores de los puntos basados en la
velocidad
scatter = ax.scatter(
    data['LON'],
    data['LAT'],
    c=data['Vkph'],
    cmap='RdYlGn_r', # Colormap invertido
    s=50,
    edgecolor='none',
    alpha=0.6,
    transform=ccrs.PlateCarree(),
    label='Ruta'
)

# Añadir una barra de colores (leyenda) para la velocidad
cbar = plt.colorbar(scatter, ax=ax, orientation='vertical',
label='Velocidad (km/h)')

# Añadir título
plt.title('Ruta de los Vehículos con Colores basados en
Velocidad', fontsize=16)

# Mostrar el gráfico
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
# Definir constantes
cd=0.475 #corredor y bus grande
u = 0.0085 # coeficiente de fricción
p = 1.12 # densidad del aire en kg/m3
A = 6.328482 # área bus grande m2
g = 9.81 # aceleración debida a la gravedad m/s2
masa = 18960 # Masa constante en kg # Peso del bus más el peso de
28 personas (70 kg), número de asientos (PROMEDIO = 46 personas
pero se redondea a la capacidad del bus)

# Convertir 'vkph' de km/h a m/s
data['v_mps'] = data['Vkph'] * (5 / 18)

# Calcular energía aerodinámica
data['Ea'] = 0.5 * cd * A * p * (data['v_mps']**3)

# Calcular energía de fricción
data['Ef'] = u * g * data['v_mps'] * masa

# Calcular energía de circulación
data['Eb'] = 0.5 * (masa) * (data['v_mps']**3) / (data['d']) / 10
# Simplificado
data.loc[data['d'] == 0, 'Eb'] = 0 # Asignar 0 a Eb donde d es 0

# Calcular energía total
data['Etotal'] = data['Ea'] + data['Ef'] + data['Eb']

data['Ea'] = data['Ea'].round(3)
data['Ef'] = data['Ef'].round(3)
data['Eb'] = data['Eb'].round(3)
data['Etotal'] = data['Etotal'].round(3)
# Mostrar el DataFrame con los resultados
print(data)

# Calcular las estadísticas
stats = data.groupby('filename')['Etotal'].agg(['mean', 'median',
'sum']).reset_index()
stats.columns = ['Filename', 'Promedio', 'Mediana', 'Suma']
# Guardar en Excel
stats.to_excel('estadisticas_Etotal_por_filename_RUTAl_F.xlsx',
index=False)
# Mostrar el resultado
stats

# Supongamos que tu DataFrame se llama 'data' y ya contiene tus
datos
data4 = data.loc[data['filename'] == "d20210515_1i.geojson"]
# 1. Ordenar los datos por tiempo para asegurar que estén en orden
cronológico
data4 = data4.sort_values(by='FECHA').reset_index(drop=True)

# 2. Calcular la distancia acumulada total
```

```
data4['distancia_acumulada'] = data4['d'].cumsum()

# 3. Convertir 'Vkph' de km/h a m/s si 'Vms' no existe
if 'Vms' not in data.columns:
    data4['Vms'] = data4['Vkph'] * 1000 / 3600 # km/h a m/s

# 6. Calcular la aceleración ( $a = \Delta v / \Delta t$ )
data4['aceleracion'] = data4['Vms'].diff() / data4['t']

# Crear el gráfico con dos ejes Y

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 6))

# Graficar 'ETotal' vs 'distancia_acumulada' en el eje Y izquierdo
color1 = 'tab:blue'
ax1.set_xlabel('Distancia (m)')
ax1.set_ylabel('Energía Cinética Total (J)', color=color1)
ax1.plot(data4['distancia_acumulada'], data4['Etotal'],
        color=color1, label='Etotal')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color1)

# Ajustar el límite mínimo del eje izquierdo
ax1.set_ylim(None, 30000000) # El valor máximo se ajustará
    automáticamente

# Crear un segundo eje Y para la aceleración
ax2 = ax1.twinx()

# Graficar 'aceleración' vs 'distancia_acumulada' en el eje Y
    derecho
color2 = 'tab:red'
ax2.set_ylabel('Aceleración (m/s²)', color=color2)
ax2.plot(data4['distancia_acumulada'], data4['aceleracion'],
        color=color2, label='Aceleración')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color2)

# Ajustar el límite mínimo del eje derecho a -40
ax2.set_ylim(-80, None) # El valor máximo se ajustará
    automáticamente

# Ajustar el límite del eje X para mostrar solo los primeros 10000
    metros
ax1.set_xlim(0, 10000)

# Añadir leyendas
lines_1, labels_1 = ax1.get_legend_handles_labels()
lines_2, labels_2 = ax2.get_legend_handles_labels()
ax1.legend(lines_1 + lines_2, labels_1 + labels_2, loc='upper
    left')

# Añadir título y ajustar el layout
plt.title('Energía Cinética y Aceleración')
plt.tight_layout()

# Mostrar el gráfico
```

```
plt.show()
```

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Supongamos que tu DataFrame se llama 'data' y ya contiene tus
datos

data5 = data.loc[data['filename'] == "d20210515_li.geojson"]

# 1. Ordenar los datos por tiempo para asegurar que estén en orden
cronológico
data5 = data5.sort_values(by='FECHA').reset_index(drop=True)

# 2. Calcular la distancia acumulada total
data5['distancia_acumulada'] = data5['d'].cumsum()

# 3. Convertir 'Vkph' de km/h a m/s si 'Vms' no existe
if 'Vms' not in data.columns:
    data5['Vms'] = data5['Vkph'] * 1000 / 3600 # km/h a m/s

# 4. Calcular la aceleración ( $a = \Delta v / \Delta t$ )
data5['aceleracion'] = data5['Vms'].diff() / data5['t']

# 5. Eliminar filas con valores NaN en 'Ea', 'Ef', 'Eb' o
'distancia_acumulada'
data5.dropna(subset=['Ea', 'Ef', 'Eb', 'distancia_acumulada'],
inplace=True)

# 6. Crear el gráfico con Eb en el eje Y izquierdo y Ea, Ef en el
eje Y derecho

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 6))

# Graficar 'Eb' vs 'distancia_acumulada' en el eje Y izquierdo
color1 = 'tab:red'
ax1.set_xlabel('Distancia Acumulada (m)')
ax1.set_ylabel('Eb (J)', color=color1)
ax1.plot(data5['distancia_acumulada'], data5['Eb'], color=color1,
label='Eb')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color1)
# Ajustar el límite mínimo del eje derecho a -40
ax1.set_ylim(None, 30000000) # El valor máximo se ajustará
automáticamente

# Crear un segundo eje Y para 'Ea' y 'Ef'
ax2 = ax1.twinx()

# Graficar 'Ea' y 'Ef' vs 'distancia_acumulada' en el eje Y
derecho
color2 = 'tab:blue'
ax2.set_ylabel('Ea y Ef (J)', color=color2)
```

```
ax2.plot(data5['distancia_acumulada'], data5['Ea'], color=color2,
label='Ea')
ax2.plot(data5['distancia_acumulada'], data5['Ef'],
color='tab:green', label='Ef')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color2)
# Ajustar el límite mínimo del eje derecho a -40
ax2.set_ylim(-100000, None) # El valor máximo se ajustará
automáticamente

# Ajustar el límite del eje X para mostrar solo los primeros 10000
metros
ax1.set_xlim(0, 2500)

# Añadir leyendas
lines_1, labels_1 = ax1.get_legend_handles_labels()
lines_2, labels_2 = ax2.get_legend_handles_labels()
ax2.legend(lines_1 + lines_2, labels_1 + labels_2, loc='upper
left')

# Añadir título y ajustar el layout
plt.title('Eb, Ea y Ef vs Distancia Acumulada')
plt.tight_layout()

# Mostrar el gráfico
plt.show()
```

Anexo F: Códigos en Python del modelo de velocidad de recorrido

Este código se realiza para la ruta de Jicamarca – Chorrillos, se hace igual para las demás rutas.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import datetime
import math

# Parámetros de energía
cd2 = 0.475
u_fric = 0.0085
p = 1.12
A3 = 6.328482
g = 9.81
mass = 18960 # misma masa que el algoritmo de datos
speed = 12.5

total_distance = 38360
Nn = 94+94 # numero de paraderos menos 1 y posibles paradas por
semaforos

# Calculo de energia con velocidad constante en tramos de 1 seg
DT=total_distance
DTad = Nn*89.558 #2 veces la distancia de aceleracion y
desaceleracion (26.042m es la distancia por aceleracion constante
de 3m/s2 y 63.516m desacel a 1.23 m/s2)
Dr = DT - DTad # Distancia de recorrido a Velocidad cuasi
constante
t = Dr/speed # Tiempo de recorrido a Velocidad cuasi
constante igual a pulsaciones

print(DT)
print(DTad)
print(Dr)
print(t)

#Energia de aceleracion
#Energia a velocidad 3m/s y distancia de 1.5m
Eaa1 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (3 ** 3)
Efa1 = u_fric * g * 3 * mass
Eba1 = 0.5 * (mass) * (3 ** 3) / (1.5) / 10
Ea1 = Eaa1 + Efa1 + Eba1

#Energia a velocidad 6m/s y distancia de 4.5m
Eaa2 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (6 ** 3)
Efa2 = u_fric * g * 6 * mass
```

```
Eba2 = 0.5 * (mass) * (6 ** 3) / (4.5) / 10
Ea2 = Eaa2 + Efa2 + Eba2
```

#Energia a velocidad 9m/s y distancia de 7.5m

```
Eaa3 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (9 ** 3)
Efa3 = u_fric * g * 9 * mass
Eba3 = 0.5 * (mass) * (9 ** 3) / (7.5) / 10
Ea3 = Eaa3 + Efa3 + Eba3
```

#Energia a velocidad 12.5m/s y distancia de 12.542m

```
Eaa4 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (12.5 ** 3)
Efa4 = u_fric * g * 12.5 * mass
Eba4 = 0.5 * (mass) * (12.5 ** 3) / (12.542) / 10
Ea4 = Eaa4 + Efa4 + Eba4
```

#Energia de desaceleracion

#Energia a velocidad 11.27m/s y distancia de 11.885m

```
Ead9 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (11.27 ** 3)
Efd9 = u_fric * g * 11.27 * mass
Ebd9 = 0.5 * (mass) * (11.27 ** 3) / (11.885) / 10
Ed9 = Ead9 + Efd9 + Ebd9
```

#Energia a velocidad 10.04m/s y distancia de 10.655m

```
Ead8 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (10.04 ** 3)
Efd8 = u_fric * g * 10.04 * mass
Ebd8 = 0.5 * (mass) * (10.04 ** 3) / (10.655) / 10
Ed8 = Ead8 + Efd8 + Ebd8
```

#Energia a velocidad 8.81m/s y distancia de 9.425m

```
Ead7 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (8.81 ** 3)
Efd7 = u_fric * g * 8.81 * mass
Ebd7 = 0.5 * (mass) * (8.81 ** 3) / (9.425) / 10
Ed7 = Ead7 + Efd7 + Ebd7
```

#Energia a velocidad 7.58m/s y distancia de 8.195m

```
Ead6 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (7.58 ** 3)
Efd6 = u_fric * g * 7.58 * mass
Ebd6 = 0.5 * (mass) * (7.58 ** 3) / (8.195) / 10
Ed6 = Ead6 + Efd6 + Ebd6
```

#Energia a velocidad 6.35m/s y distancia de 6.965m

```
Ead5 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (6.35 ** 3)
Efd5 = u_fric * g * 6.35 * mass
Ebd5 = 0.5 * (mass) * (6.35 ** 3) / (6.965) / 10
Ed5 = Ead5 + Efd5 + Ebd5
```

#Energia a velocidad 5.12m/s y distancia de 5.735m

```
Ead4 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (5.12 ** 3)
Efd4 = u_fric * g * 5.12 * mass
Ebd4 = 0.5 * (mass) * (5.12 ** 3) / (5.735) / 10
Ed4 = Ead4 + Efd4 + Ebd4
```

#Energia a velocidad 3.89m/s y distancia de 4.505m

```

Ead3 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (3.89 ** 3)
Efd3 = u_fric * g * 3.89 * mass
Ebd3 = 0.5 * (mass) * (3.89 ** 3) / (4.505) / 10
Ed3 = Ead3 + Efd3 + Ebd3

#Energia a velocidad 2.66m/s y distancia de 3.275m
Ead2 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (2.66 ** 3)
Efd2 = u_fric * g * 2.66 * mass
Ebd2 = 0.5 * (mass) * (2.66 ** 3) / (3.275) / 10
Ed2 = Ead2 + Efd2 + Ebd2

#Energia a velocidad 1.43m/s y distancia de 2.045m
Ead1 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (1.43 ** 3)
Efd1 = u_fric * g * 1.43 * mass
Ebd1 = 0.5 * (mass) * (1.43 ** 3) / (2.045) / 10
Ed1 = Ead1 + Efd1 + Ebd1

#Energia a velocidad 0m/s y distancia de 0.831m
Ead0 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (0 ** 3)
Efd0 = u_fric * g * 0 * mass
Ebd0 = 0.5 * (mass) * (0 ** 3) / (0.831) / 10
Ed0 = Ead0 + Efd0 + Ebd0

# Energia total de aceleracion y desaceleracion por tramo
Etayd = Ea1 + Ea2 + Ea3 + Ea4 + Ed9 + Ed8 + Ed7 + Ed6 + Ed5 + Ed4
+ Ed3 + Ed2 + Ed1 + Ed0

#Energia en el recorrido
#Energia a velocidad 12m/s y distancia de 12.25m
Ear1 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (12 ** 3)
Efr1 = u_fric * g * 12 * mass
Ebr1 = 0.5 * (mass) * (12 ** 3) / (12.25) / 10
Er1 = Ear1 + Efr1 + Ebr1

#Energia a velocidad 12.5m/s y distancia de 12.25m
Ear2 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (12.5 ** 3)
Efr2 = u_fric * g * 12.5 * mass
Ebr2 = 0.5 * (mass) * (12.5 ** 3) / (12.25) / 10
Er2 = Ear2 + Efr2 + Ebr2

#Energia a velocidad 13m/s y distancia de 12.75m
Ear3 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (13 ** 3)
Efr3 = u_fric * g * 13 * mass
Ebr3 = 0.5 * (mass) * (13 ** 3) / (12.75) / 10
Er3 = Ear3 + Efr3 + Ebr3

#Energia a velocidad 12.5m/s y distancia de 12.75m
Ear4 = 0.5 * cd2 * A3 * p * (12.5 ** 3)
Efr4 = u_fric * g * 12.5 * mass
Ebr4 = 0.5 * (mass) * (12.5 ** 3) / (12.75) / 10
Er4 = Ear4 + Efr4 + Ebr4

```

```
#Energia total
t1=math.floor(t)
if t1 % 4 == 0:
    Etrr = t1//4 * (Er1 + Er2 + Er3 + Er4)
elif t1 % 4 == 1:
    Etrr = t1//4 * (Er1 + Er2 + Er3 + Er4) + Er1
elif t1 % 4 == 2:
    Etrr = t1//4 * (Er1 + Er2 + Er3 + Er4) + Er1 + Er2
elif t1 % 4 == 3:
    Etrr = t1//4 * (Er1 + Er2 + Er3 + Er4) + Er1 + Er2 + Er3

Energia_total= Etayd*Nn + Etrr
print(Etrr)
print(Etayd*Nn)
print(Energia_total)
```

Anexo G: Códigos en Python del algoritmo de Dijkstra

Este código se realiza para la ruta de Jicamarca – Chorrillos, se hace igual para las demás rutas.

```
import osmnx as ox
import networkx as nx
import matplotlib.pyplot as plt

# Definir los puntos de origen, paradas intermedias y destino
orig_point = (-11.933160, -76.969238) # Porton - Jicamarca
stop_points = [
    (-11.934156, -76.969692), # La Capilla
    (-11.935451, -76.970573), # Mar Del Coral
    (-11.936516, -76.971316), # Montenegro
    (-11.937802, -76.972211), # Montenegro
    (-11.938545, -76.973649), # Mar Sur
    (-11.938420, -76.975618), # Próceres De La Independencia
    (-11.938688, -76.976539), # Motupe
    (-11.939218, -76.978428), # Santa María
    (-11.940786, -76.980377), # 8 De Mariscal
    (-11.943149, -76.982016), # Mariátegui
    (-11.945236, -76.983469), # Cruce
    (-11.947342, -76.984918), # La Cinco
    (-11.950554, -76.987149), # La Cuatro

    (-12.033781, -76.990300), # Ramiro Prialé
    (-12.042513, -76.986635), # Atarjea
    (-12.044548, -76.984550), # Nocheto
    (-12.045823, -76.983093), # Salvador
    (-12.046638, -76.982237), # Perales
    (-12.051070, -76.977205), # Puente Azul
    (-12.054680, -76.975213), # El Pino
    (-12.057008, -76.974190), # Puente Santa Anita
    (-12.063946, -76.971559), # Puente Santa Rosa
    (-12.073855, -76.974436), # Las Palmeras
    (-12.076124, -76.975344), # Quechuas
    (-12.082738, -76.980267), # Javier Prado
    (-12.093238, -76.980821), # Hipódromo
    (-12.098875, -76.979998), # Derby
    (-12.102928, -76.979438), # Pentagonito
    (-12.108641, -76.978660), # Primavera
    (-12.119506, -76.977352), # Subaru
    (-12.122728, -76.977254), # Instituto Monterrico
    (-12.127301, -76.977130), # Prosegur
    (-12.131329, -76.978484), # Benavides
    (-12.134829, -76.979808), # Ricardo Palma
    (-12.141009, -76.981289), # Mercado Flores Atocongo
    (-12.145489, -76.982102), # Tinoco
    (-12.149770, -76.983339), # Atocongo
    (-12.154595, -76.984027), # Próceres
    (-12.158859, -76.982829), # Sedapal
```

```
(-12.161781, -76.981995), # Amauta
(-12.163574, -76.981774), # Jose Olaya
(-12.165426, -76.981433), # Transvesa
(-12.167708, -76.980906), # Residencial Inclán
(-12.169546, -76.980397), # Alipio Ponce

(-12.184693, -77.006958), # Óv. La Curva
(-12.187520, -77.007938), # Santa Anita
(-12.190119, -77.006622), # Alameda Sur
(-12.191992, -77.007668), # Alameda Sur 229
(-12.193765, -77.008935), # A. Los Pinos
(-12.196418, -77.010820), # Plaza Veá
(-12.198734, -77.012512), # San Lorenzo
(-12.201028, -77.014126), # Sauces
(-12.202345, -77.015123), # Los Cedros
(-12.204067, -77.016402), # Colegio Fernando Belaunde
(-12.205413, -77.019108), # Ballestas CAMBIO
(-12.206725, -77.016866), # Anguila
(-12.207834, -77.015206), # La española
(-12.210290, -77.014082), # Prolongacion Alameda CAMBIO
(-12.207391, -77.011693), # Aruba
(-12.206657, -77.011043), # La encantada
(-12.203772, -77.007515), # San Lorenzo
]
dest_point = (-12.202185, -77.005270) # San Marcos - Chorrillos

# Definir el área de interés a partir de los puntos de origen,
# paradas y destino
# Crear un bounding box alrededor de los puntos
north = max([pt[0] for pt in stop_points + [orig_point,
dest_point]])
south = min([pt[0] for pt in stop_points + [orig_point,
dest_point]])
east = max([pt[1] for pt in stop_points + [orig_point,
dest_point]])
west = min([pt[1] for pt in stop_points + [orig_point,
dest_point]])

# Descargar el grafo de la red de carreteras en el área definida
G = ox.graph_from_bbox(north, south, east, west,
network_type='drive')

# Guardar el grafo en formato GraphML para uso futuro
graphml_filepath = 'carreteras_lima_Ruta1IDA.graphml'
ox.save_graphml(G, filepath=graphml_filepath)
print(f"Grafo guardado en formato GraphML en: {graphml_filepath}")

# Guardar el grafo en formato shapefile
shapefile_folder = 'carreteras_shapefile_Ruta1IDA'
ox.save_graph_shapefile(G, filepath=shapefile_folder)
print(f"Grafo guardado en formato Shapefile en la carpeta:
{shapefile_folder}")

# Visualizar el grafo (opcional)
```

```
fig, ax = ox.plot_graph(G, bgcolor='white', node_size=0,
edge_color='blue', edge_linewidth=1)
plt.show()

# IDA

# Cargar el grafo guardado en formato GraphML
graphml_filepath = 'carreteras_lima_Ruta1IDA.graphml'
G = ox.load_graphml(graphml_filepath)
print(f"Grafo cargado desde: {graphml_filepath}")

# Definir los puntos de origen, paradas intermedias, destino y sus
nombres
orig_point = (-11.932011, -76.968722) # Porton - Jicamarca
stop_points = [
    (-11.939218, -76.978428), # Santa Maria
    (-12.029139, -76.997194), # P1

    (-12.20579, -77.017577), # Ballestas
]
stop_names = [
    "Santa maria", # (-11.939218, -76.978428)
    "p1", #

    "Ballestas" # (-12.20579, -77.017577)
]
dest_point = (-12.202185, -77.005270) # San Marcos - Chorrillos
dest_name = "San Marcos - Chorrillos"
orig_name = "Porton - Jicamarca"

# Encontrar los nodos más cercanos a los puntos de origen, paradas
y destino
orig_node = ox.nearest_nodes(G, X=orig_point[1], Y=orig_point[0])
stop_nodes = [ox.nearest_nodes(G, X=pt[1], Y=pt[0]) for pt in
stop_points]
dest_node = ox.nearest_nodes(G, X=dest_point[1], Y=dest_point[0])

# Calcular la ruta óptima entre el origen, las paradas y el
destino
route_nodes = [orig_node] + stop_nodes + [dest_node]
routes = []
total_distance = 0 # Variable para almacenar la distancia total

for i in range(len(route_nodes) - 1):
    route_segment = nx.shortest_path(G, route_nodes[i],
route_nodes[i + 1], weight='length')
    routes.append(route_segment)

    # Calcular la distancia total sumando la longitud de cada
segmento de la ruta
    for u, v in zip(route_segment[:-1], route_segment[1:]):
        edge_data = G.get_edge_data(u, v)[0] # Obtener los datos
de la arista
```

```
length = edge_data['length'] # Longitud del segmento
grade = edge_data.get('grade', 0) # Inclinación (si está
disponible)
total_distance += length # Sumar la longitud de la arista

# Combinar todas las rutas en una sola lista
full_route = []
for i, route_segment in enumerate(routes):
    if i == 0:
        full_route.extend(route_segment)
    else:
        full_route.extend(route_segment[1:])

# Visualizar la ruta y marcar los paraderos con nombres
fig, ax = ox.plot_graph_route(G, full_route, route_linewidth=4,
node_size=0, bgcolor='white', show=False, close=False)

# Marcar el punto de origen con nombre
ax.scatter(G.nodes[orig_node]['x'], G.nodes[orig_node]['y'],
c='red', s=100, zorder=5)
ax.text(G.nodes[orig_node]['x'], G.nodes[orig_node]['y'],
orig_name, fontsize=12, color='red')

# Marcar los puntos de las paradas intermedias con nombres
for stop_node, stop_name in zip(stop_nodes, stop_names):
    ax.scatter(G.nodes[stop_node]['x'], G.nodes[stop_node]['y'],
c='blue', s=20, zorder=5)
    ax.text(G.nodes[stop_node]['x'], G.nodes[stop_node]['y'],
stop_name, fontsize=8, color='blue')

# Marcar el punto de destino con nombre
ax.scatter(G.nodes[dest_node]['x'], G.nodes[dest_node]['y'],
c='green', s=100, zorder=2)
ax.text(G.nodes[dest_node]['x'], G.nodes[dest_node]['y'],
dest_name, fontsize=12, color='green')

# Mostrar la distancia total recorrida y la energía total
consumida
print(f"Distancia total recorrida: {total_distance / 1000:.2f}
km") # Convertir a kilómetros

import shapely.geometry

for u, v, data in G.edges(data=True):
    if 'geometry' not in data:
        # Obtener las coordenadas de los nodos
        x1, y1 = G.nodes[u]['x'], G.nodes[u]['y']
        x2, y2 = G.nodes[v]['x'], G.nodes[v]['y']
        # Crear una línea entre los nodos
        data['geometry'] = shapely.geometry.LineString([(x1, y1),
(x2, y2)])

import geopandas as gpd

# Crear un GeoDataFrame vacío para almacenar la ruta
```

```
gdf_route = gpd.GeoDataFrame(columns=['geometry'],
                                crs="EPSG:4326")

# Agregar los segmentos de la ruta al GeoDataFrame
segmentos = []
for i in range(len(full_route) - 1):
    u, v = full_route[i], full_route[i + 1]
    edge_data = G.get_edge_data(u, v)[0]
    if 'geometry' in edge_data:
        geometry = edge_data['geometry']
    else:
        # Si no hay geometría, crear una línea entre los nodos
        x1, y1 = G.nodes[u]['x'], G.nodes[u]['y']
        x2, y2 = G.nodes[v]['x'], G.nodes[v]['y']
        geometry = shapely.geometry.LineString([(x1, y1), (x2,
y2)])
    segmentos.append({'geometry': geometry})

# Convertir la lista de segmentos a un GeoDataFrame
gdf_route = gpd.GeoDataFrame(segmentos, columns=['geometry'],
                                crs="EPSG:4326")

# Guardar la ruta en formato Shapefile
shapefile_path = 'ruta1.shp'
gdf_route.to_file(shapefile_path, driver='ESRI Shapefile')
print(f'Ruta guardada en formato Shapefile en: {shapefile_path}')
```

Anexo H: Tablas de consumo energético

Tabla N° 64. Consumo energético por recorrido de la ruta Jicamarca – Chorrillos

Filename	Energía (MJ)
d20210618_5v.geojson	424.74
d20210609_1v.geojson	431.77
d20210525_6v.geojson	432.38
d20210614_4v.geojson	433.41
d20210605_4v.geojson	433.56
d20210520_5v.geojson	433.57
d20210615_5v.geojson	437.33
d20210523_1v.geojson	439.78
d20210612_2v.geojson	440.00
d20210616_6v.geojson	440.83
d20210522_3v.geojson	447.32
d20210609_5v.geojson	447.73
d20210611_2v.geojson	452.33
d20210520_1v.geojson	454.53
d20210526_4v.geojson	461.98
d20210616_2v.geojson	464.87
d20210609_3v.geojson	466.77
d20210611_4v.geojson	468.02
d20210605_6v.geojson	468.92
d20210604_2v.geojson	473.99
d20210608_5v.geojson	474.54
d20210618_6i.geojson	474.92
d20210521_4i.geojson	476.05
d20210616_4v.geojson	476.94
d20210607_3i.geojson	478.84
d20210529_1i.geojson	479.82
d20210528_1v.geojson	480.01
d20210604_3i.geojson	480.72
d20210520_6v.geojson	480.77
d20210609_2i.geojson	481.02
d20210520_3v.geojson	482.53
d20210610_1v.geojson	482.76
d20210618_3v.geojson	482.83
d20210521_1v.geojson	482.93
d20210611_3i.geojson	485.15
d20210615_6v.geojson	486.70
d20210609_6i.geojson	487.71
d20210617_4v.geojson	490.29
d20210525_4v.geojson	490.46
d20210520_7i.geojson	491.37

d20210616_5i.geojson	492.20
d20210526_2v.geojson	492.95
d20210616_1i.geojson	496.13
d20210605_5i.geojson	496.89
d20210518_1i.geojson	498.48
d20210521_3v.geojson	499.61
d20210608_2v.geojson	500.83
d20210520_2v.geojson	502.52
d20210615_4v.geojson	503.40
d20210607_2v.geojson	505.93
d20210525_2v.geojson	506.35
d20210618_2i.geojson	506.60
d20210616_3i.geojson	507.32
d20210614_3i.geojson	507.33
d20210618_4i.geojson	507.50
d20210617_2v.geojson	508.15
d20210614_2v.geojson	508.83
d20210615_1v.geojson	509.53
d20210605_2v.geojson	510.05
d20210608_2i.geojson	510.29
d20210522_5v.geojson	511.63
d20210610_2v.geojson	512.77
d20210608_4i.geojson	512.86
d20210522_4i.geojson	514.35
d20210525_3i.geojson	515.90
d20210522_1v.geojson	519.30
d20210608_3i.geojson	519.40
d20210611_1i.geojson	519.69
d20210605_7i.geojson	519.71
d20210604_1i.geojson	520.15
d20210521_2i.geojson	520.90
d20210614_5i.geojson	520.96
d20210609_4i.geojson	522.17
d20210605_3i.geojson	522.95
d20210615_3v.geojson	526.42
d20210529_2v.geojson	526.83
d20210528_2i.geojson	528.39
d20210525_5i.geojson	528.42
d20210522_2i.geojson	528.76
d20210526_3i.geojson	529.21
d20210619_2i.geojson	530.58
d20210608_3v.geojson	532.01
d20210520_3i.geojson	532.48
d20210615_4i.geojson	532.87

d20210520_4i.geojson	533.50
d20210608_6i.geojson	534.36
d20210520_4v.geojson	534.78
d20210615_7i.geojson	534.96
d20210520_8v.geojson	536.30
d20210615_2i.geojson	538.20
d20210618_1v.geojson	542.52
d20210529_3i.geojson	542.95
d20210526_5i.geojson	543.16
d20210605_8v.geojson	548.15
d20210615_3i.geojson	550.28
d20210515_1i.geojson	555.05
d20210616_1v.geojson	555.12
d20210607_1i.geojson	556.79
d20210604_4v.geojson	564.30
d20210614_1i.geojson	565.03
d20210520_1i.geojson	571.43
d20210608_1i.geojson	571.73
d20210615_5i.geojson	571.90
d20210605_1i.geojson	572.02
d20210520_5i.geojson	573.16
d20210615_2v.geojson	574.46
d20210520_2i.geojson	578.70
d20210610_2i.geojson	582.07
d20210519_1i.geojson	598.48
d20210601_1v.geojson	600.16
d20210522_6i.geojson	601.05
d20210619_3v.geojson	602.05
d20210615_1i.geojson	611.86

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 65. Consumo energético por recorrido de la ruta 404 del corredor morado

Filename	Energía (MJ)
d20210530_404_M_12v.geojson	267.10
d20210605_404_M_4v.geojson	270.07
d20210608_404_M_4v.geojson	272.48
d20210610_404_M_1i.geojson	272.82
d20210609_404_M_6v.geojson	272.90
d20210609_404_M_5i.geojson	279.34
d20210528_404_M_3i.geojson	279.34
d20210605_404_M_2v.geojson	283.89
d20210605_404_M_6v.geojson	284.08
d20210603_404_M_6v.geojson	284.42
d20210528_404_M_4v.geojson	284.56
d20210527_404_M_6v.geojson	285.76
d20210608_404_M_7i.geojson	286.84
d20210608_404_M_6v.geojson	286.93
d20210528_404_M_5i.geojson	287.70
d20210610_404_M_3i.geojson	288.34
d20210603_404_M_2v.geojson	288.35
d20210605_404_M_3i.geojson	290.03
d20210528_404_M_7ir.geojson	290.09
d20210603_404_M_4v.geojson	291.03
d20210609_404_M_2v.geojson	291.71
d20210608_404_M_11vr.geojson	292.21
d20210527_404_M_4v.geojson	292.32
d20210527_404_M_2v.geojson	292.45
d20210527_404_M_3i.geojson	294.20
d20210602_404_M_2v.geojson	294.92
d20210527_404_M_1i.geojson	295.78
d20210609_404_M_1i.geojson	296.81
d20210603_404_M_7ir.geojson	297.22
d20210603_404_M_3i.geojson	298.15
d20210531_404_M_1i.geojson	298.95
d20210528_404_M_2v.geojson	299.11
d20210605_404_M_7ir.geojson	299.12
d20210527_404_M_7i.geojson	300.51
d20210609_404_M_3i.geojson	300.90
d20210608_404_M_3i.geojson	301.21
d20210610_404_M_2v.geojson	301.21
d20210608_404_M_1i.geojson	301.62
d20210609_404_M_4v.geojson	302.76
d20210609_404_M_7i.geojson	305.40
d20210605_404_M_5i.geojson	305.77
d20210608_404_M_5i.geojson	307.65

d20210608_404_M_2v.geojson	308.08
d20210528_404_M_1i.geojson	308.83
d20210530_404_M_1i.geojson	310.23
d20210527_404_M_5i.geojson	310.41
d20210602_404_M_3ir.geojson	311.06
d20210610_404_M_7v.geojson	311.62
d20210530_404_M_2v.geojson	311.88
d20210531_404_M_15v.geojson	312.36
d20210530_404_M_8v.geojson	314.42
d20210530_404_M_4v.geojson	315.29
d20210530_404_M_10v.geojson	315.31
d20210610_404_M_6ir.geojson	316.72
d20210530_404_M_11i.geojson	317.15
d20210530_404_M_6v.geojson	321.90
d20210531_404_M_11i.geojson	324.20
d20210605_404_M_1i.geojson	324.76
d20210530_404_M_7i.geojson	327.72
d20210602_404_M_1i.geojson	330.07
d20210530_404_M_9i.geojson	332.28
d20210530_404_M_3i.geojson	336.31
d20210603_404_M_5i.geojson	338.33
d20210530_404_M_5i.geojson	346.47

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 66. Consumo energético por recorrido de la ruta 412 del corredor morado

Filename	Energía (MJ)
d20210521_412_4v.geojson	176.86
d20210531_412_6v.geojson	177.33
d20210526_412_1v.geojson	180.29
d20210608_412_9v.geojson	180.36
d20210602_412_5v.geojson	182.47
d20210522_412_4v.geojson	186.68
d20210603_412_9v.geojson	188.55
d20210531_412_10v.geojson	189.88
d20210522_412_7i.geojson	191.47
d20210522_412_6v.geojson	193.37
d20210521_412_1i.geojson	193.98
d20210521_412_3i.geojson	194.21
d20210521_412_5i.geojson	194.54
d20210521_412_2v.geojson	198.05
d20210524_412_1i.geojson	198.06
d20210531_412_3v.geojson	198.77
d20210531_412_13v.geojson	200.47
d20210520_412_5i.geojson	200.54
d20210520_412_3i.geojson	201.05
d20210610_412_1v.geojson	202.45
d20210531_412_4i.geojson	202.49
d20210520_412_6v.geojson	207.43
d20210522_412_3i.geojson	209.07
d20210520_412_9i.geojson	209.14
d20210522_412_5i.geojson	209.68
d20210520_412_7i.geojson	209.69
d20210520_412_10v.geojson	211.01
d20210522_412_2v.geojson	211.26
d20210522_412_1i.geojson	211.56
d20210520_412_8v.geojson	213.70
d20210520_412_4v.geojson	214.62
d20210531_412_7i.geojson	214.97
d20210520_412_11i.geojson	215.43
d20210520_412_1i.geojson	217.80

(Fuente: Elaboración propia)