



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AUTOMOTRIZ**

**“ANÁLISIS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN VEHÍCULO EN
CONDICIONES DE TRÁFICO REAL A DIFERENTES ALTITUDES”**



AUTOR: Arias Cuasapaz Daniel Esteban

DIRECTOR: Ing. Fredy Alexander Rosero Obando Ph.D.

Ibarra-Ecuador

2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401653258		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Arias Cuasapaz Daniel Esteban		
DIRECCIÓN:	Bartolomé García 9 – 88 y Av. Tobías Mena		
EMAIL:	deariasc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	(06) 2250079	TELF. MOVIL	0982735311

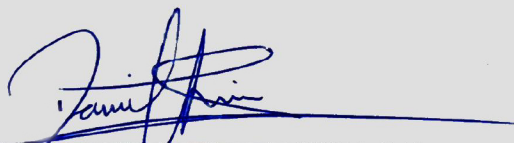
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis del consumo de combustible de un vehículo en condiciones de tráfico real a diferentes altitudes.
AUTOR (ES):	Arias Cuasapaz Daniel Esteban
FECHA: AAAAMMDD	2025 - 01 - 30
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
DIRECTOR:	Ing. Fredy Alexander Rosero Obando Ph. D.

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Arias Cuasapaz Daniel Esteban, con cédula de identidad Nro. 0401653258, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 30 días del mes de enero de 2025

EL AUTOR:



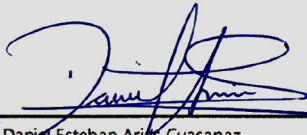
Daniel Esteban Arias Cuasapaz
Autor C.C: 0401653258

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 30 días, del mes de enero de 2025

EL AUTOR:



Daniel Esteban Arias Cuasapaz
Autor C.C: 0401653258

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

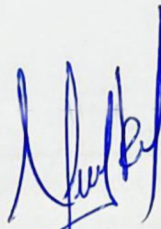
Ibarra, 29 de ..enero... de 2025

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando Ph.D.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



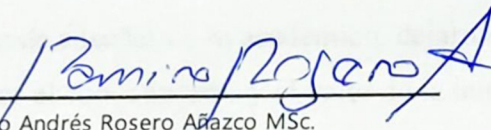
Ing. Fredy Alexander Rosero Obando Ph.D.
Tutor C.C: 1002641742

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular "Análisis del Consumo de Combustible de un Vehículo en Condiciones de Tráfico Real a Diferentes Altitudes" elaborado por Daniel Esteban Arias Cuasapaz, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



Ing. Fredy Alexander Rosero Obando Ph.D.
Tutor C.C: 1002641742



Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco MSc.
Asesor C.C: 1718193616

DEDICATORIA

A mi padre Nelson y a mi madre Shyomara, que jamás dejaron de apoyarme ni creer en mí incluso cuando yo no lo hacía.

A mi hermana Valeria, que me ha acompañado durante toda mi vida, siendo un símbolo de alegría y superación.

A Susej, quien fue el apoyo emocional más sincero durante la época más oscura de mi vida.

A mi tía Mery, en quien encontré refugio durante estos últimos años, y demás familiares que con su experiencia de vida marcaron mis propios principios.

A Jesús, Maycol, Anthony, Elian, Doménica, Jordan, Gabriela y demás amigos, que con el pasar de los años compartieron su vida con la mía, haciéndola más amena.

A todos los profesores que más allá de enseñarme lo académico, dejaron en mí la huella de la ética, la curiosidad por el conocimiento y el valor de la humildad.

A Daniel Arias, por nunca rendirse.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, que con su continuo esfuerzo y sacrificio me brindaron todo lo necesario para completar mis estudios académicos.

A mi tutor de tesis, Fredy Rosero, que al trabajar en equipo conmigo, supo guiarme durante toda la investigación.

Al ingeniero Andrés Cevallos, que cordialmente prestó sus equipos de trabajo durante las pruebas iniciales y campaña experimental.

A Juan y Kevin, quienes me ayudaron a solucionar los problemas relacionados con el registro de datos de flujo de combustible.

A Andrew, de Technoton, que pacientemente resolvió mis dudas sobre la configuración de equipos durante el proceso de integración de sensores al registrador de datos.

A la Universidad Técnica del Norte, por demostrarme vivamente que la vida está llena de oportunidades, pero también de injusticias.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación analiza el consumo de combustible de un vehículo equipado con un motor de encendido provocado (MEP) con aspiración natural en condiciones de tráfico real a diferentes altitudes. Mediante una revisión bibliográfica, se identificó que la altitud influye en el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ al variar la presión atmosférica. Sin embargo, la operación en tráfico real introduce variables no controladas, que complican las comparaciones directas entre estudios. Durante la campaña experimental, realizada en cuatro ciudades del Ecuador con altitudes desde 6 hasta 2980 msnm, se recopilaron datos cinemáticos y de operación del motor utilizando registradores ELM327 y CANEdge2, junto con flujómetros de combustible y sensores GNSS-inerciales. La frecuencia de muestreo de 1 Hz permitió capturar variaciones instantáneas en el desempeño del vehículo, mientras que los ensayos en dinamómetro mejoraron la precisión de los resultados. El uso de software de código abierto, como R y Asammdf, facilitó el procesamiento de datos y garantizó la replicabilidad de la metodología. Los flujómetros de combustible utilizados presentaron un error sistemático corregido posteriormente mediante diferencias directas, aunque el filtrado de datos eliminó puntos relevantes, aumentando la incertidumbre. Se generaron mapas de motor de contornos mediante regresión local (LOESS), logrando representar gráficamente patrones de operación en diferentes condiciones. Sin embargo, el suavizado aplicado influyó en la precisión de los mapas. Los resultados indicaron que el consumo promedio en Manta fue 11,11% mayor al de Tulcán, mientras que los factores de emisión de CO₂ en términos de distancia variaron significativamente debido a la topografía y condiciones locales. Finalmente, la operación en tráfico real mostró períodos prolongados de ralentí y baja carga, factores que incrementaron el consumo y divergieron de valores estimados en laboratorio, subrayando la importancia de analizar estas variables en entornos reales.

Palabras clave: Factores de emisión, mapas de motor, interpolación, condiciones de tráfico real, altitud, flujómetros de combustible

ABSTRACT

The present investigation evaluates the fuel consumption of a vehicle equipped with a naturally aspirated SI engine under real traffic conditions at different altitudes. Through a literature review, it was identified that altitude influences fuel consumption and CO₂ emissions as atmospheric pressure varies. However, operation in real traffic introduces uncontrolled variables, which complicate direct comparisons between studies. During the experimental campaign, conducted in four cities of Ecuador with altitude between 6 and 2980 MASL, kinematic and engine operation data were collected using ELM327 and CANEdge2 dataloggers, along with fuel flowmeters and GNSS-inertial sensors. 1 Hz sampling rate allowed instantaneous variations in vehicle performance to be captured, while dynamometer testing improved the accuracy of the results. The use of open-source software, such as R and Asammdf, facilitated data processing and ensured the replicability of the methodology. The fuel flowmeters used presented a systematic error subsequently corrected by direct differences, although data filtering eliminated relevant points, increasing uncertainty. Contour engine maps were generated by local regression (LOESS), managing to graphically represent operation patterns in different conditions. However, the applied smoothing influenced the accuracy of the maps. The results indicated that the average consumption in Manta (6 MASL) was 11,11% higher than in Tulcán (2980 MASL), while CO₂ distance – based emission factors varied significantly due to topography and local conditions. Finally, operation under real traffic conditions showed prolonged periods of idling and low load, factors that increased consumption and diverged from values estimated in the laboratory, underscoring the importance of analyzing these variables in real environments.

Keywords: Emission factors, engine maps, interpolation, real world emissions, altitude, fuel flowmeter

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	11
ÍNDICE DE TABLAS	14
ÍNDICE DE FIGURAS	15
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	19
1.1 Problema de Investigación	19
1.1.1 Antecedentes	19
1.1.2 Planteamiento del Problema.....	21
1.2 Justificación.....	23
1.3 Objetivos	23
1.3.1 Objetivo General.....	23
1.3.2 Objetivos Específicos.....	24
1.4 Alcance.....	24
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	25
2.1 Funcionamiento del Vehículo: Motor de Combustión	25
2.1.1 Fundamentos de Propulsión de un Vehículo	25
2.1.2 Clasificación de Propulsión de Vehículos.....	26
2.1.3 Componentes y Procesos Básicos de un Motor de Encendido Provocado	27
2.1.4 Diagrama de Trabajo de un Motor de Encendido Provocado	35
2.1.5 Características de Operación de un Motor de Encendido Provocado.....	37
2.2 Fundamentos de Formación de Emisiones.....	40
2.2.1 Proceso de Combustión de un Motor de Encendido Provocado	40
2.2.2 Tipos de Emisiones en un Motor: Gases de Efecto Invernadero y Contaminantes.....	41
2.2.3 Tecnologías Para Reducir Consumo de Combustible y Emisiones.....	45
2.2.4 Normativas de Control de Emisiones	46
2.3 Efecto de la Altitud en un Motor de Encendido Provocado	46
2.3.1 Factores que Afectan en el Desempeño de Vehículo	47
2.3.2 Densidad del Aire y Presión Atmosférica	49
2.3.3 Efecto de la Altitud en la Combustión.....	50
2.3.4 Estudios Previos Sobre el Efecto de la Altitud en la Combustión.....	51
2.4 Estimación de Consumo de Combustible y Emisiones en un Vehículo.....	53
2.4.1 Enfoque Para Cuantificar Consumo de Combustible y Emisiones	53

2.4.2	Enfoques de Medición en Tráfico Real: Consumo de Combustible y Emisiones.....	55
2.4.3	Enfoque de Mapas de Motor	55
2.5	Software de Procesamiento de Datos.....	57
2.5.1	Software Estadístico de Uso General.....	57
2.5.2	Software Estadístico Para Análisis Especializado	58
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS		59
3.1	Determinación de Variables de Estudio	59
3.1.1	Variables Cinemáticas y Modos de Operación.....	59
3.1.2	Variables de Operación de Motor	60
3.1.3	Parámetros de Rendimiento a Nivel de Motor y Vehículo.....	61
3.2	Selección del Vehículo	61
3.2.1	Criterio de Selección.....	61
3.2.2	Vehículo Seleccionado	62
3.3	Selección de Equipos y Sensores.....	63
3.3.1	Registrador de Datos CANEdge2.....	65
3.3.2	Registrador de Datos ELM327.....	67
3.3.3	Flujómetro de Combustible DFM ACAN 100	67
3.3.4	Módulo de Posicionamiento Satelital CANMod.gps con Sensor Inercial 3D	68
3.3.5	Cables de Conexión Especiales	70
3.3.6	Dinamómetro Vamag BPA – V2R	72
3.4	Pruebas Iniciales y Configuraciones Finales de Equipos.....	73
3.4.1	Pruebas de Comunicación OBD – II: ELM327 y Torque Pro.....	73
3.4.2	Pruebas de Comunicación CAN: CANEdge2, CANMod.gps y Flujómetros de Combustible.....	75
3.4.3	Configuración Final	85
3.5	Campaña Experimental	86
3.5.1	Características Generales de las Rutas de Estudio	86
3.5.2	Rutas de Estudio	87
3.6	Obtención de Curvas de Par en Dinamómetro	93
3.6.1	Descripción de Ensayos	93
3.7	Procesamiento de Datos	94
3.7.1	Pre – Procesamiento de Datos.....	95
3.7.2	Procesamiento de Datos	103

3.7.3	Post – Procesamiento de Datos.....	109
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		114
4.1	Cinemática del Vehículo y Modos de Operación.....	114
4.1.1	Cinemática del Vehículo	114
4.1.2	Modos de Operación del Vehículo.....	118
4.2	Frecuencias de Operación de Motor	120
4.2.1	Operación de Motor en Tulcán.....	121
4.2.2	Operación de Motor en Ibarra	123
4.2.3	Operación de Motor en Sto. Domingo.....	125
4.2.4	Operación de Motor en Manta.....	127
4.2.5	Comparación de Operación Entre Ciudades	130
4.3	Mapas de Motor Generados.....	131
4.3.1	Mapas en Términos de Energía al Freno.....	132
4.3.2	Mapas de Tasas de Consumo y Emisión de CO ₂	140
4.4	Factores de Emisión y Consumo	145
4.4.1	Factores de Emisión y Consumo por Ciudad.....	145
4.4.2	Discusión de Resultados	147
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		150
5.1	Conclusiones.....	150
5.2	Recomendaciones	152
ANEXOS		153
Anexo 1: Configuración de CANEdge2 (Dos Columnas).....		153
Anexo 2: Configuración de CANMod.gps (Dos Columnas)		157
Anexo 3: Resultados de Prueba 2 en Dinamómetro		158
Anexo 4: Valores y Porcentajes de Modos de Operación por Ciudad y Ruta.....		159
Modos de operación: Tulcán (2980 msnm).....		159
Modos de Operación: Ibarra (2225 msnm).....		160
Modos de Operación: Sto. Domingo (550 msnm).....		161
Modos de Operación: Manta (6 msnm).....		162
REFERENCIAS		163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Consideraciones del ciclo teórico en motores de encendido provocado</i>	36
Tabla 2. <i>Consideraciones del ciclo real en motores de encendido provocado</i>	37
Tabla 3. <i>Variables cinemáticas del proyecto</i>	60
Tabla 4. <i>Modos de operación de vehículo</i>	60
Tabla 5. <i>Variables de operación de motor</i>	61
Tabla 6. <i>Parámetros de rendimiento a nivel de motor y vehículo</i>	61
Tabla 7. <i>Especificaciones técnicas del vehículo utilizado</i>	63
Tabla 8. <i>Equipos utilizados y su función</i>	64
Tabla 9. <i>Características técnicas de CANEdge2</i>	66
Tabla 10. <i>Descripción de pines de CANEdge2</i>	66
Tabla 11. <i>Características técnicas del flujómetro DFM ACAN 100</i>	68
Tabla 12. <i>Características técnicas de CANMod.gps</i>	69
Tabla 13. Descripción de pines de CANMod.gps	69
Tabla 14. <i>Características técnicas de dinamómetro Vamag BPA – V2R</i>	72
Tabla 15. <i>ID estándar de datos recolectados a través de ELM327 y Torque Pro</i>	74
Tabla 16. <i>Configuración de Time valid signal y Time value signal</i>	79
Tabla 17. <i>Distancias con respecto al punto de referencia del modelo dinámico</i>	81
Tabla 18. <i>Características geoclimáticas de Tulcán</i>	87
Tabla 19. <i>Características geoclimáticas de Ibarra</i>	88
Tabla 20. <i>Características geoclimáticas de Sto. Domingo</i>	90
Tabla 21. <i>Características geoclimáticas de Manta</i>	91
Tabla 22. <i>Datos referentes a corrección de error sistemático</i>	100
Tabla 23. <i>Coefficientes de polinomio de par máximo en función del régimen</i>	105
Tabla 24. <i>Cinemática de rutas en la ciudad de Tulcán</i>	115
Tabla 25. <i>Cinemática de rutas en la ciudad de Ibarra</i>	115
Tabla 26. <i>Cinemática de rutas en la ciudad de Sto. Domingo</i>	116
Tabla 27. <i>Cinemática de rutas en la ciudad de Manta</i>	117
Tabla 28. <i>Valores promedio de eficiencia y factores de emisión y consumo</i>	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Bucle cerrado de interacción entre conductor, vehículo y medio circundante</i>	26
Figura 2. <i>Clasificación de propulsión de vehículos</i>	26
Figura 3. <i>Clasificación de elementos estructurales del motor de encendido provocado</i>	27
Figura 4. <i>Elementos fijos del motor de encendido provocado</i>	28
Figura 5. <i>Elementos móviles del motor de encendido provocado</i>	29
Figura 6. <i>Diagrama de elementos auxiliares del motor de encendido provocado</i>	30
Figura 7. <i>Diagrama de procesos básicos de un motor de encendido provocado</i>	31
Figura 8. <i>Admisión, compresión, expansión y escape en un MCI alternativo</i>	32
Figura 9. <i>Lubricación por barboteo</i>	33
Figura 10. <i>Circuito típico de lubricación en un MEP</i>	34
Figura 11. <i>Diagramas de instalación de sistemas de sobrealimentación</i>	34
Figura 12. <i>Diagrama de trabajo teórico de un motor de encendido provocado</i>	35
Figura 13. <i>Diagrama de trabajo real de un motor de encendido provocado</i>	36
Figura 14. <i>Parámetros básicos de funcionamiento de un motor</i>	38
Figura 15. <i>Parámetros indicados y efectivos de un motor</i>	39
Figura 16. <i>Ejemplo de curvas características de velocidad a plena carga</i>	40
Figura 17. <i>Tipos de emisiones vehiculares</i>	42
Figura 18. <i>Problemas causados por los gases de efecto invernadero</i>	43
Figura 19. <i>Variación de concentraciones de CO, HC y NO con respecto al dosado</i>	44
Figura 20. <i>Tecnologías para reducir el consumo de combustible y emisiones</i>	45
Figura 21. <i>Diagrama de cuerpo libre de vehículo en movimiento</i>	47
Figura 22. Mapa de rendimiento de un motor con aspiración natural o sobrealimentado	48
Figura 23. <i>Variación de presión atmosférica con respecto a la altitud sobre el nivel del mar</i>	49
Figura 24. <i>Variación de rendimiento volumétrico en MEC y MEP con la carga</i>	51
Figura 25. <i>Métodos de medición de consumo de combustible y emisiones</i>	54
Figura 26. <i>Métodos de estimación de consumo de combustible y emisiones</i>	54
Figura 27. <i>Mapa de motor con contornos y escala de color continua</i>	56
Figura 28. <i>Diagrama de flujo de actividades del proyecto de titulación</i>	59

Figura 29. Estadísticas de vehículos matriculados en el Ecuador (2023)	62
Figura 30. Vehículo utilizado en la campaña experimental.....	63
Figura 31. Registrador de datos CANEdge2.....	65
Figura 32. Disposición de pines de CANEdge2	66
Figura 33. Registrador de datos ELM327	67
Figura 34. Fluviómetro de combustible DFM ACAN 100	67
Figura 35. Módulo de Posicionamiento Satelital CANMod.gps con Sensor Inercial 3D.....	68
Figura 36. Disposición de pines de CANMod.gps.....	69
Figura 37. Cable de conexión común	70
Figura 38. Cable serial RS232	71
Figura 39. Conector en “Y” o splitter para puerto OBD – II.....	71
Figura 40. Dinamómetro inercial Vamag BPA – V2R.....	72
Figura 41. Datos de operación capaces de registrarse adecuadamente	73
Figura 42. Interfaz de Torque Pro	74
Figura 43. CAN BUS Analyzer utilizado durante las pruebas iniciales	76
Figura 44. Configuración de aplicación de CAN BUS Analyzer	76
Figura 45. Datos en tiempo real de la red CAN obtenidos a través de CAN BUS Analyzer	77
Figura 46. Interfaz de CANEdge config editor para CANEdge2	78
Figura 47. Interfaz de CANEdge config editor para CANMod.gps	80
Figura 48. Modelo dinámico automotriz configurado en CANMod.gps	80
Figura 49. Interfaz de aplicación Service S6 DFM con modos de operación y direcciones S6	81
Figura 50. PGN de fluviómetro con reglamento de envío respectivo.....	82
Figura 51. Interfaz de Technoton S7 Database	83
Figura 52. Esquema de instalación “Diferencial – De presión”	83
Figura 53. Instalación de fluviómetros en el vehículo de prueba	84
Figura 54. Diagrama de conexión eléctrica de fluviómetros, cable común y cable serial RS232	85
Figura 55. Diagrama de instalación de equipos	85
Figura 56. Perfil de altitud de rutas en la ciudad de Tulcán (2980 msnm).....	87
Figura 57. Rutas de estudio en la ciudad de Tulcán (2980 msnm)	88

Figura 58. <i>Rutas de estudio en la ciudad de Ibarra (2225 msnm)</i>	89
Figura 59. <i>Perfil de altitud de rutas en la ciudad de Ibarra</i>	89
Figura 61. <i>Perfil de altitud de rutas en la ciudad de Sto. Domingo (550 msnm)</i>	90
Figura 60. <i>Rutas de estudio en la ciudad de Sto. Domingo (550 msnm)</i>	91
Figura 62. <i>Rutas de estudio en la ciudad de Manta (6 msnm)</i>	92
Figura 63. <i>Perfil de altitud de rutas en la ciudad de Manta (6 msnm)</i>	92
Figura 64. <i>Prueba en dinamómetro con vehículo usado en la campaña experimental</i>	93
Figura 65. <i>Proceso general de procesamiento de datos</i>	95
Figura 66. <i>Diagrama de flujo de pre – procesamiento de datos</i>	95
Figura 67. <i>Interfaz de DBC Editor for CAN Bus Database Files</i>	96
Figura 68. <i>Mensaje y señal CAN agregadas a DBC de protocolo SAE J1939</i>	97
Figura 69. <i>Interfaz de Asammdf con DBCs cargados</i>	97
Figura 70. <i>Interfaz gráfica de R Studio</i>	98
Figura 71. <i>Extracto de código de limpieza y sincronización de datos</i>	99
Figura 72. <i>Extracto de código de corrección de error sistemático</i>	100
Figura 73. <i>Extracto de código de creación de gráficos de sincronización</i>	101
Figura 74. <i>Variación instantánea de régimen de motor y consumo de combustible</i>	102
Figura 75. <i>Diagrama de flujo de procesamiento de datos</i>	103
Figura 76. <i>Código de obtención de curvas de par y potencia</i>	104
Figura 77. <i>Curvas máximas de potencia y par para el vehículo de prueba</i>	105
Figura 78. <i>Extracto de código de estimación de parámetros de operación de motor</i>	106
Figura 79. <i>Extracto de código de cálculo de factores de emisión y consumo</i>	108
Figura 80. <i>Diagrama de flujo de post – procesamiento de datos</i>	109
Figura 81. <i>Extracto de código de gráficos de modos de operación</i>	110
Figura 82. <i>Extracto de código de gráficos de frecuencia de operación de motor</i>	111
Figura 83. <i>Extracto de código de mapas de motor</i>	112
Figura 84. <i>Valores cinemáticos promedio para todas las ciudades</i>	118
Figura 85. <i>Distribución temporal de modos de operación con rutas y ciudades diferenciadas</i>	119
Figura 86. <i>Frecuencia de operación de motor en Tulcán (2980 msnm)</i>	121

Figura 87. Frecuencia de operación de motor en Ibarra (2225 msnm)	123
Figura 88. Frecuencia de operación de motor en Sto. Domingo (550 msnm)	125
Figura 89. Frecuencia de operación de motor en Manta (6 msnm)	128
Figura 90. Valores de operación del conjunto total de datos para cada ciudad de estudio	130
Figura 91. Mapas de eficiencia térmica al freno para todas las ciudades	132
Figura 92. Eficiencia térmica al freno promedio para todas las ciudades	133
Figura 93. Diferencia de BTE entre Tulcán (2890 msnm) y Manta (6 msnm)	134
Figura 94. Mapas de consumo específico al freno (BSFC) para todas las ciudades	135
Figura 95. Consumo específico al freno promedio para todas las ciudades	136
Figura 96. Diferencia de BSFC entre Tulcán (2980 msnm) y Manta (6 msnm)	137
Figura 97. Mapas de tasa de emisión de CO ₂ por energía generada	138
Figura 98. Tasa promedio de emisión de CO ₂ por energía generada	139
Figura 99. Diferencia de emisión de CO ₂ (g/kWh) entre Tulcán (2980 msnm) y Manta (6 msnm)	139
Figura 100. Mapas de tasa de consumo para todas las ciudades	140
Figura 101. Tasas promedio de consumo de combustible	141
Figura 102. Diferencia de consumo (g/s) entre Tulcán (2980 msnm) y Manta (6 msnm)	142
Figura 103. Mapas de tasas de emisión de CO ₂ para todas las ciudades	143
Figura 104. Tasas promedio de emisión de CO ₂	144
Figura 105. Diferencia de emisión de CO ₂ (g/s) entre Tulcán (2980 msnm) y Manta (6 msnm)	145
Figura 106. Factores de emisión y consumo para cada ciudad de estudio	147

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Investigación

1.1.1 Antecedentes

La contaminación ambiental y el aumento de la demanda energética mundial son dos de las problemáticas mundiales de la era moderna con mayor impacto para la humanidad. En 2017, la demanda energética mundial aumentó en 2,1%, con un promedio del 0,9% para los 5 años anteriores, y las emisiones globales de CO₂ debidas a combustibles fósiles alcanzaron un pico de 32,5 gigatoneladas, suponiendo un aumento del 1,4% en ese mismo año (Yi et al., 2023). Cabe mencionar que el sector del transporte se encuentra dentro de los más grandes emisores de gases de efecto invernadero llegando a representar el 25,6% del consumo mundial de energía en 2015, con una tendencia al aumento del 1,1% anual prevista hasta 2040 (Leguísamo Milla et al., 2020).

El consumo de combustible y factores de emisión de CO₂ de vehículos con motores de combustión interna varían significativamente dependiendo de las condiciones en las que este opere, por lo que existen discrepancias entre el rendimiento presentado por el fabricante (valores de homologación) y el obtenido en condiciones de tráfico real (López et al., 2020). Esto debido a que, tradicionalmente, dicho rendimiento se obtiene a partir de datos conseguidos mediante ciclos de conducción estandarizados de estado estable que no reflejan el comportamiento del motor bajo condiciones de tráfico real ni de estado transitorio (Rosero et al., 2020a). Zhou et al. (2023) sugiere que dichas condiciones de operación no pueden ignorarse al evaluar la economía de combustible, ya que ésta es altamente sensible a las aceleraciones del vehículo cuando su velocidad promedio es menor a 25 km/h.

Además, la altitud sobre el nivel del mar modifica las condiciones de la combustión, influyendo directamente en la formación de gases contaminantes (Noroña Merchan et al., 2018) y en el consumo de combustible (Wu et al., 2020). Ejemplo de esto último es lo demostrado en el estudio de Tipanluisa et al. (2017) donde, mediante ensayos estáticos, se determinó que las emisiones a nivel del mar, con un mismo combustible, son menores. Por otro lado, la variación en el consumo de combustible se ha analizado en varios estudios, como por ejemplo en el de Zervas (2011), dónde

se demostró que, usando ciclos de conducción en carretera, el consumo de combustible fue mayor en un 6,2% a una altitud de 2200 msnm, a pesar de la disminución de resistencia aerodinámica producida por una densidad de aire menor.

Para medir el consumo de combustible en condiciones de tráfico real se han utilizado estrategias basadas en la simulación y/o en la recolección de datos experimentales. Ejemplo del primer enfoque es el estudio realizado por Komnos et al. (2022), donde mediante una herramienta detallada de simulación (PyCSIS) se estimó el consumo de combustible de una flota vehicular. Por otro lado, el estudio de Doulgeris et al. (2020) combinó datos experimentales, mismos que fueron obtenidos en condiciones de tráfico real mediante un sistema de medición de emisiones portable (PEMS), una conexión al puerto OBD y un GPS; con un modelo de simulación, que utiliza una base de datos existente, para calcular el consumo de combustible real de diferentes vehículos.

En la región, específicamente en Colombia, con el fin de colaborar con la medición de consumo energético de vehículos livianos de combustión interna, Castillo (2018a) propuso una metodología basada en protocolos internacionales que involucra pruebas en ruta y utiliza el método gravimétrico para determinar el consumo de combustible real del vehículo, presentando el rendimiento del vehículo en términos de kilómetros recorridos por litro (km/l). Sin embargo, la metodología aplicada para medir el consumo de combustible en ruta interfiere con el funcionamiento normal del vehículo puesto que los equipos utilizados se instalaron directamente en la línea de combustible.

En Ecuador, se han realizado varios estudios que buscan determinar la eficiencia de combustible de vehículos con motores de encendido provocado. Yupanqui (2020a) estimó el rendimiento de una flota de taxis en la ciudad de Cuenca (ubicada a 2560 msnm) al obtener datos cinemáticos en condiciones de tráfico real mediante un dispositivo conectado al puerto OBDII del vehículo. Las rutas utilizadas fueron aleatorias, puesto que la recolección de datos se realizó durante 35 días, 24 horas al día. En el estudio se concluyó que el rendimiento podía variar dependiendo de las condiciones climáticas, de tráfico y mecánicas del vehículo (Yupanqui, 2020a).

Por otro lado, en la investigación de Toalombo y León (2022) se analizó el rendimiento de un vehículo utilizando un único combustible, pero con y sin aditivos que mejoren la combustión. En

el estudio, la variación de altitud fue de 600 m, por lo que ésta no puede considerarse como una variable que afecte la combustión y, por tanto, el rendimiento del vehículo.

También se determinó que, hablando de combustibles con el mismo octanaje como lo son la gasolina Ecopaís y Extra comercializadas en Ecuador, el que proporcionaba un mejor rendimiento fue el primero (Murillo & Usca, 2021a). Sin embargo, al igual que en otros estudios mencionados, las condiciones de tráfico real no involucraron altitudes significativamente distintas, por lo que tampoco refleja la variación existente tanto en consumo de combustible como en factores de emisiones de CO₂ debida a los cambios de densidad del aire. El único estudio que toma en cuenta tal variación de densidad es el de Grijalva et al. (2021) dónde, mediante simulación, se estima que el rendimiento de combustible variará debido a la resistencia aerodinámica adicional existente en regiones de baja altitud, más no por el efecto en el ciclo termodinámico del motor de encendido provocado. Dicho esto, los estudios de eficiencia de consumo de combustible en el Ecuador no han considerado los efectos en la combustión de los motores de encendido provocado causados por la variación de la densidad del aire debido a cambios significativos en la presión atmosférica.

1.1.2 Planteamiento del Problema

Actualmente, el sector de transporte es uno de los más grandes emisores de gases de efecto invernadero y representa el 25,6% del consumo mundial de energía (Leguísamo Milla et al., 2020). Tan sólo en Ecuador, el 94% de la demanda de gasolina corresponde a este sector, con un equivalente de 1163500 kgal anuales para el 2021 (Instituto de Investigación Geológico y Energético - IIGE, 2022). Por lo que representa uno de los sectores con mayor consumo de insumos energéticos del país.

Cabe mencionar que el consumo de combustible y, por tanto, los factores de emisión de CO₂ de un vehículo con motor de encendido provocado naturalmente aspirado varían al operar bajo condiciones de tráfico real con respecto a los valores presentados por su fabricante (López et al., 2020). Además, existen otros factores externos que afectan el ciclo termodinámico del motor, como la altitud, por ejemplo; teniendo como consecuencia variaciones en su combustión, reflejándose, nuevamente, tanto en el consumo de combustible como en su emisión de gases de efecto invernadero (Norroña Merchan et al., 2018).

Considerando lo anterior, es importante mencionar que varios estudios han buscado estimar o calcular tanto la eficiencia de combustible como los factores de emisión de CO₂ tomando en cuenta las condiciones de tráfico real anteriormente mencionadas. Las metodologías usadas involucran equipos de medición específicos como los PEMS, data loggers de conexión al puerto OBD y equipos de ubicación satelital (GPS); y rutas tanto estandarizadas como aleatorias.

Varios autores han analizado la variación de consumo de combustible y emisiones de CO₂ con respecto a la altitud. Sin embargo, las conclusiones no son determinantes. Zervas (2011), a pesar de encontrar variaciones de consumo de combustible en uno de los ciclos de conducción en carretera a 2200 msnm, concluyó que no existe un impacto evidente entre altitud y consumo de combustible. Por otro lado, el estudio de Wang et al. (2022), no encontró patrones uniformes entre altitud y emisiones de CO₂ tanto en laboratorio como en pruebas en ruta. Ello debido a que otros parámetros externos pueden tener mayor efecto en las emisiones que un aumento en la altitud.

Por otra parte, en el Ecuador, se han realizado estudios en los que se analizó la eficiencia del vehículo utilizando gasolina Extra con o sin aditivos (Toalombo & León, 2022), usando distintos combustibles del mismo octanaje (Murillo & Usca, 2021a) u obteniendo datos cinemáticos en condiciones de tráfico real de una flota de taxis mediante un dispositivo de conexión OBD – II (Yupanqui, 2020a). Empero, dichos estudios se realizaron con una diferencia de altitud relativamente baja, por lo que sus resultados no pueden extrapolarse a ciudades de altitudes significativamente distintas, por lo que no existen investigaciones en el Ecuador que analicen el consumo de combustible de vehículos de encendido provocado a diferentes altitudes y consideren el funcionamiento de estos en el mundo real.

Para el período 2021 – 2025, el Plan de Creación de Oportunidades presentado por la Secretaría Nacional de Planificación propuso como objetivos el fomentar modelos de desarrollo sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al cambio climático y promover la innovación e inclusión en todos los niveles de educación mediante investigaciones de calidad y alto impacto nacional. Por lo tanto, es imperativo que el sector académico se involucre en la búsqueda de soluciones que permitan cumplir dichos objetivos.

1.2 Justificación

El objetivo 12 dentro del eje de Transición Ecológica del Plan de Creación de Oportunidades 2021 – 2025 busca fomentar modelos de desarrollo sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al cambio climático. Su tercera política es implementar mejores prácticas ambientales con responsabilidad social y económica que fomenten el consumo sostenible. Dentro de esta política, se han planteado varias metas para el año 2025, entre las que se encuentran la 12.3.1 que busca reducir de 79833 a 62914 kBEP la energía utilizada en sectores de consumo, y la 12.3.3, que es incrementar de 21,6 a 50,5 millones el ahorro en BEP optimizando la eficiencia energética en el sector de hidrocarburos.

Por otro lado, el objetivo 7 es potenciar las capacidades de la ciudadanía y promover una educación innovadora, inclusiva y de calidad en todos los niveles. Para ello, una de sus políticas, la 7.4, habla de fortalecer el sistema de Educación Superior promoviendo la investigación de alto impacto.

Tomando en cuenta estos dos objetivos, y debido a la falta de estudios que demuestren una variación de la eficiencia del vehículo a diferentes altitudes en el territorio nacional ecuatoriano, el presente proyecto de titulación buscará relacionar la variación de altitud con el rendimiento de un vehículo con motor de encendido provocado naturalmente aspirado en condiciones de tráfico real. Esto, con el fin de contribuir al entendimiento de los factores que influyen en el consumo energético nacional y promover la creación de políticas enfocadas en la mitigación del cambio climático y aumento de la sustentabilidad energética del país, contribuyendo con el objetivo 12. Además, servirá como base para nuevos proyectos de investigación que busquen implementar metodologías inherentes al estudio de consumo de combustible en condiciones de tráfico real o cualquiera de sus temas afines, siendo esta la contribución al cumplimiento del objetivo 7.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Analizar el consumo de combustible de un vehículo en condiciones de tráfico real a diferentes altitudes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Comprender el efecto de la altitud en el rendimiento de un motor de combustión interna de encendido provocado atmosférico mediante revisión bibliográfica.
- Realizar una campaña experimental de un vehículo operando en tráfico real a distintas condiciones de altitud obteniendo datos cinemáticos y de consumo de combustible.
- Desarrollar el pre y post – procesamiento de los datos de la campaña experimental mediante el uso de un software estadístico de código abierto.
- Analizar cómo la eficiencia de combustible y factores de emisión de CO₂ del vehículo y su motor varían a diferentes niveles de altitud.

1.4 Alcance

La presente investigación inicialmente realizará un estudio bibliográfico del efecto de la altitud en los motores térmicos de combustión interna, especialmente en la eficiencia de combustible y las emisiones de CO₂.

El estudio incluirá una campaña experimental donde se evaluará el desempeño de un vehículo liviano propulsado por un motor de encendido provocado con aspiración natural operando en condiciones de tráfico real. La campaña experimental, incluirá ensayos en ciudades que estén ubicadas en diferentes altitudes, desde el nivel del mar hasta 3000 msnm aproximadamente.

Durante los ensayos, se almacenarán los datos de operación del vehículo y su motor, así como características de la carretera. En el caso del vehículo, se registrarán principalmente datos cinemáticos tales como distancia recorrida, velocidad, y aceleración. Para el motor, se registrarán diversos parámetros tales como: régimen de giro, grado de carga y flujo de combustible. Estos datos de vehículo y motor se obtendrán mediante un *data logger* OBD y GPS. En el caso de la carretera, principalmente se registrará el nivel de altitud, utilizando un altímetro.

Posteriormente, los datos de la campaña experimental serán preprocesados en un software estadístico de código abierto, donde se realizará una limpieza y etiquetado de los datos. Finalmente, los datos serán procesados en el software estadístico con el propósito de analizar la variación del consumo de combustible y los factores de emisión de CO₂ a medida que incrementa el nivel de altitud.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Funcionamiento del Vehículo: Motor de Combustión

Durante el último siglo, el vehículo automotor se consolidó como el medio de transporte más popular del planeta, satisfaciendo las necesidades de movilidad y autonomía del ser humano. En este contexto, los motores de combustión interna, que reemplazaron a las máquinas a vapor (siglo XVIII), se convirtieron en símbolos de desarrollo industrial y tecnológico (Vera et al., 2016). Además, a pesar de nuevas tecnologías híbridas y eléctricas, la versatilidad de este tipo de motores hace que su aplicación y estudio siga siendo relevante (Rovira & Muñoz, 2015). En esta sección, se exploran los fundamentos de propulsión de los vehículos automotores, las tecnologías utilizadas para su funcionamiento y las características principales de los motores de encendido provocado, que son objeto de estudio en la presente investigación.

2.1.1 Fundamentos de Propulsión de un Vehículo

Un vehículo es una máquina diseñada para transportar personas o carga de un sitio a otro de manera autopropulsada y controlada ya sea por tierra, agua o aire (Genta & Morello, 2020). En el caso de un automóvil terrestre, su funcionamiento depende de sistemas de propulsión y control cinemático que le permiten movilizarse sobre superficies preparadas sin estar anclado físicamente a ellas. Tiene tres partes fundamentales: sistema de propulsión, carrocería y habitáculo.

Los sistemas de control de vehículo y su estructura pertenecen principalmente a la carrocería y habitáculo de este, teniendo características similares entre todo tipo de automóviles (Genta & Morello, 2020). Por otro lado, actualmente el tren de potencia puede tener un motor de combustión, un motor eléctrico o una combinación de ambos (híbrido).

Un vehículo interactúa con el conductor y el medio que lo rodea formando un bucle cerrado (Figura 1). El conductor recibe estímulos del medio circundante y del propio vehículo, actuando sobre ellos. A su vez, el vehículo cambia sus condiciones de operación dependiendo del control del conductor y responde accionando sus sistemas de control y propulsión (Vera et al., 2016). Esto quiere decir que los hábitos de conducción intervienen en el desempeño de un vehículo, siendo factores de estudio (Leguísamo Milla et al., 2020; Malik & Nandal, 2023).

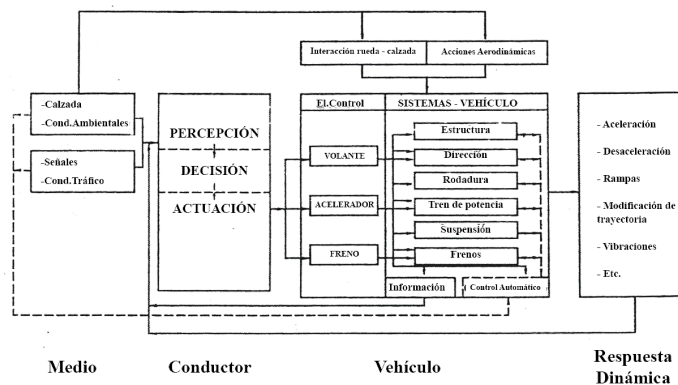


Figura 1. Bucle cerrado de interacción entre conductor, vehículo y medio circundante

(Vera et al., 2016)

2.1.2 Clasificación de Propulsión de Vehículos

Los vehículos pueden clasificarse bajo varios criterios, considerando o no su tren de potencia. Al tomar en cuenta su sistema de propulsión, estos se clasifican según el combustible usado para su funcionamiento o según el tipo de motor utilizado para transformar y utilizar energía mecánica (Escudero et al., 2011; Natarajan et al., 2023). En la

Figura 2, se muestra una clasificación de propulsión de vehículos abarcando dos grandes grupos: propulsión convencional y alternativa.

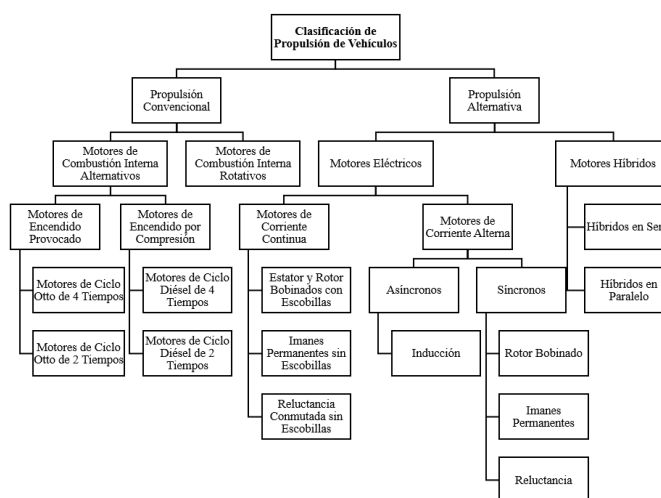


Figura 2. Clasificación de propulsión de vehículos

(Autoría propia)

2.1.3 Componentes y Procesos Básicos de un Motor de Encendido Provocado

La energía térmica existente en el combustible que llevan los vehículos se transforma en energía mecánica o útil gracias a los motores de encendido provocado (MEP) o motores de encendido por compresión (MEC). Si bien la tecnología de construcción, materiales e implementación de electrónica ha avanzado a través de los años, los elementos constructivos de estas máquinas térmicas se mantienen iguales (Escudero et al., 2011).

Por otro lado, los procesos básicos de un MEP permiten comprender el funcionamiento de estas máquinas y, sean principales o auxiliares, contribuyen a la mencionada transformación de energía térmica en mecánica. A continuación, se describen brevemente tanto los componentes esenciales de un motor de encendido provocado al igual que los procesos básicos de este.

2.1.3.1 Partes de un Motor de Encendido Provocado

Las partes de un motor de encendido provocado se clasifican en dos tipos: elementos estructurales y auxiliares. Los elementos estructurales se encargan de soportar todos los componentes del motor al igual que las cargas estáticas y dinámicas resultantes de la operación de este (Payri & Desantes, 2011). A su vez, estos elementos estructurales se clasifican en fijos y móviles, mismos que se detallan en la Figura 3.

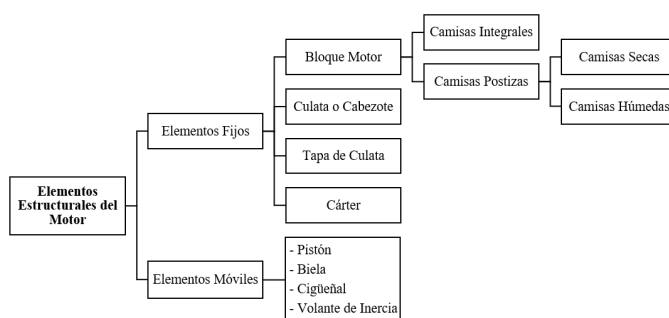


Figura 3. Clasificación de elementos estructurales del motor de encendido provocado

(Autoría propia)

Los elementos fijos se encargan principalmente de alojar, soportar y guiar las partes móviles del motor. La pieza más importante es el bloque, que se ancla a la carrocería mediante *silentblocks* (que absorben las vibraciones del motor), es el ancla de mecanismos auxiliares y tiene orificios que conducen los fluidos de los circuitos de refrigeración y engrase (Escudero et al., 2011).

Además, el bloque tiene uno o varios orificios: los cilindros. Estos guían a los pistones en su movimiento alternativo y son la cámara que contiene la mezcla aire – combustible antes y durante su expansión. Los orificios de los cilindros determinan el tipo de bloque, pudiendo ser dos tipos: de camisas integrales o de camisas postizas.

Las camisas integrales se mecanizan directamente en el bloque motor, por lo que no es posible cambiarlas. Por otro lado, las camisas postizas pueden ser a su vez de dos tipos: secas o húmedas. Las camisas secas se instalan a presión en el bloque y no tienen contacto directo con el circuito refrigerante, mientras que las camisas húmedas son lo contrario a las secas (Payri & Desantes, 2011).

La parte superior del bloque es mecanizada y sobre ella se asienta la culata (en la que se ubica el mecanismo de distribución) con una junta que garantiza el cierre estanco entre estas dos partes fijas. La unión de estas debe ser capaz de soportar los esfuerzos producidos durante la combustión en el motor. Por otro lado, en la parte inferior del bloque se mecaniza la bancada (que aloja el cigüeñal) que puede ser de sombreretes independientes o de semicárter. Mediante una junta, se une a ella la parte inferior del motor: el cárter, encargado de contener el fluido lubricante del motor y refrigerarlo ligeramente. Una ilustración general de los elementos fijos de un MEP se muestra en la Figura 4 como referencia.

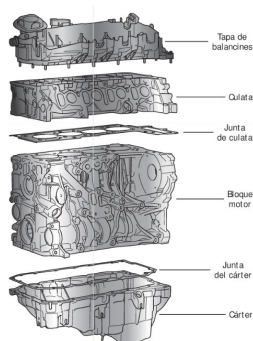


Figura 4. *Elementos fijos del motor de encendido provocado*

(Escudero et al., 2011)

Por otro lado, los elementos móviles del motor (Figura 5) constituyen el tren alternativo de este y son los principales encargados de convertir la energía química en mecánica. Las piezas que componen este tren alternativo son el pistón y sus segmentos, el bulón, la biela, los casquillos o cojinetes y el volante de inercia o volante motor. (Escudero et al., 2011).

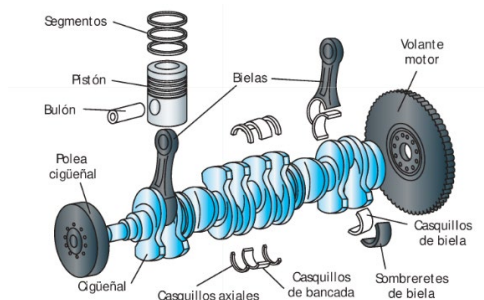


Figura 5. Elementos móviles del motor de encendido provocado

(Escudero et al., 2011)

Los pistones se encargan de sellar el cilindro (mediante sus segmentos) y transmitir la presión de combustión generada hacia el cigüeñal mediante la biela, misma que se conecta a este a través del bulón (Heywood, 2018). El diseño y los materiales usados deben combinarse de forma que el pistón sea capaz de resistir los elevados esfuerzos mecánicos y altas temperaturas producidos durante la combustión. Además, debe ser ligero, disipar el calor eficientemente, tener un coeficiente de dilatación bajo y ser capaz de deslizarse fácilmente (Escudero et al., 2011).

Los segmentos por su parte se encargan de disipar el calor hacia el cilindro, asegurar la estanqueidad del cilindro y lubricarlo. Existen de tres tipos: de fuego, que soporta la combustión directamente; de estanqueidad, que refuerza al primero y rasca el aceite sobrante de las paredes del cilindro; y el de engrase o rascador, que recoge la mayor parte del aceite para que este no se quemara durante la combustión (Payri & Desantes, 2011).

El bulón une al pistón con el pie de biela. Es una pieza hueca, generalmente flotante, que soporta esfuerzos cortantes y de flexión al transmitir la presión de combustión desde el pistón hacia la biela. Por su parte, la biela transmite tal fuerza hacia el cigüeñal y es el principal componente encargado de transformar el movimiento lineal alternativo del pistón en rotativo. Esta se une al cigüeñal mediante los sombreretes de biela con cojinetes de fricción interpuestos entre ellos (Escudero et al., 2011).

El cigüeñal, que tiene porciones excéntricas en donde se conectan las bielas del motor y se sujeta al bloque motor, transmite el movimiento rotativo hacia el volante de inercia para que su energía mecánica sea aprovechada. Su diseño depende fundamentalmente del número de cilindros y del ciclo termodinámico del motor. Además, tiene contrapesos que equilibran hasta el 60% de las

masas rotativas (Payri & Desantes, 2011) y, debido las grandes fricciones que soporta, se lubrica a presión en sus apoyos de bancada y muñequillas de biela a través de orificios (Escudero et al., 2011).

Por último, el volante de inercia o volante motor es el encargado de almacenar la energía cinética producida durante las carreras de trabajo del motor y cederla en las carreras de arrastre, por lo que su masa debe ser considerable. Sobre él se atornilla el conjunto de embrague y tiene una corona (colocada por interferencia de piezas) que permite el funcionamiento del motor de arranque (Escudero et al., 2011).

Por otro lado, los elementos auxiliares, mostrados en la Figura 6, se encargan de que el motor funcione adecuadamente, cumpliendo su ciclo de trabajo en condiciones óptimas y sincronizadas. Las piezas auxiliares del motor de encendido provocado se clasifican dependiendo del circuito o mecanismo auxiliar al que pertenecen. Estos son tres: mecanismo de distribución, circuito de engrase y circuito de refrigeración.

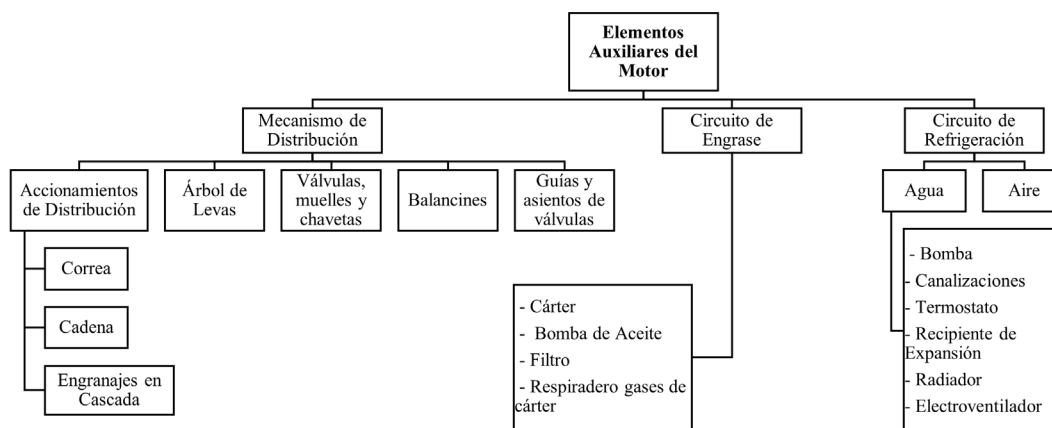


Figura 6. Diagrama de elementos auxiliares del motor de encendido provocado

(Autoría propia)

El mecanismo de distribución se encarga de la renovación de la carga dentro del cilindro al abrir y cerrar las válvulas de admisión y escape de forma sincronizada con el ciclo de operación del motor. Los principales componentes de este mecanismo son el árbol de levas, el sistema de accionamiento de distribución (ya sea correa, cadena o engranajes) y las válvulas de admisión y escape (Escudero et al., 2011).

Por su parte, el circuito de engrase se encarga de reducir la fricción dentro del motor al interponer una película lubricante entre las piezas, reduciendo las pérdidas de energía y la temperatura del motor. Sus piezas principales son el depósito de aceite (cárter), bomba de aceite y filtro (Escudero et al., 2011).

Por último, el circuito de refrigeración permite al motor operar en su rango de temperatura óptimo, encontrado entre los 90 y 100 °C (Escudero et al., 2011). Aunque existen motores de encendido provocado con refrigeración por aire, lo habitual es incorporar un sistema presurizado de refrigeración por líquido. Las piezas principales de este último son el radiador, el termostato, la bomba, el ventilador y el envase de expansión.

2.1.3.2 Procesos Básicos de un Motor de Encendido Provocado

En un motor de encendido provocado se producen tres clases de procesos básicos: el ciclo termodinámico, el de renovación de la carga y los procesos auxiliares. Cada uno de ellos tiene sub – procesos (Figura 7) que se describen brevemente a continuación. Es importante mencionar que estos son típicos de máquinas alternativas de flujo discontinuo y se caracterizan por ser no adiabáticos, es decir, existen pérdidas de calor.

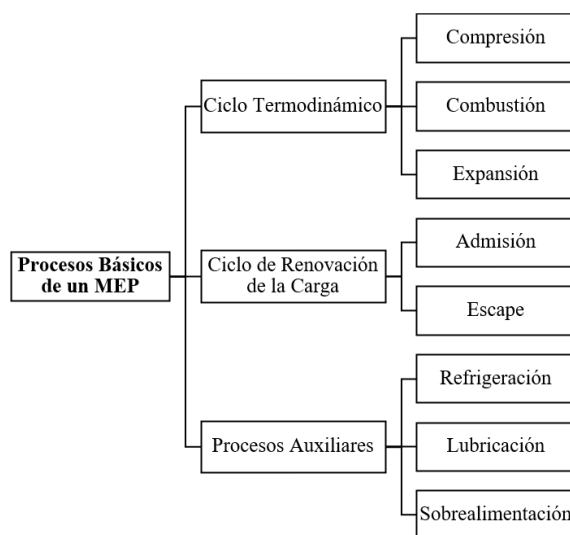


Figura 7. Diagrama de procesos básicos de un motor de encendido provocado

(Autoría propia)

El funcionamiento recíprocante de este tipo de motores obliga a tener un ciclo de trabajo que se compone de una fase abierta (ciclo de renovación de carga) y una fase cerrada (ciclo termodinámico). En el caso de los MEP, el ciclo termodinámico es generalmente el ciclo Otto de 4 tiempos, aunque versiones más simples de 2 tiempos también son utilizadas (Álvarez et al., 2005).

En la fase cerrada se realiza la compresión, combustión de la mezcla (mediante un sistema de encendido) y expansión de los gases quemados, mientras que en la fase abierta se produce la admisión de mezcla aire – combustible y escape de los gases quemados desde la cámara de combustión del motor. Este ciclo, ilustrado en la Figura 8, se produce cada dos giros del cigüeñal y cuenta con una carrera de trabajo (durante la expansión) y tres de arrastre (admisión, compresión y escape).

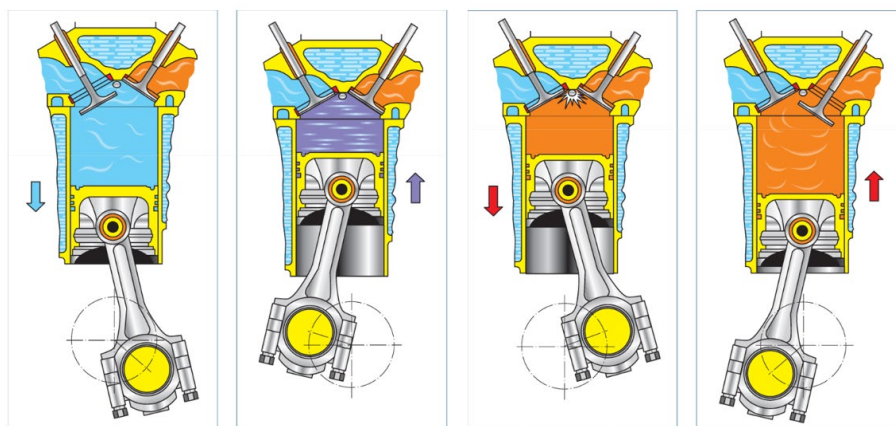


Figura 8. *Admisión, compresión, expansión y escape en un MCI alternativo*

(Escudero et al., 2011)

Por otro lado, la refrigeración del motor, que es un proceso auxiliar, previene el sobrecalentamiento del motor bajo todas sus condiciones operativas de carga y régimen de giro sin importar las condiciones climáticas en las que este funcione (Payri & Desantes, 2011), manteniéndolo en un rango de temperatura entre 90 y 100 °C. Al evitar el sobrecalentamiento del motor se previene la destrucción de la película lubricante, se mantienen las propiedades mecánicas de los elementos del motor y se evitan pérdidas excesivas por fricción y el autoencendido de la mezcla. La refrigeración puede ser de dos tipos: por aire o por líquido, siendo esta última la más empleada en vehículos. Cuando se usa refrigeración por líquido, se usan mezclas de agua destilada con líquidos de bajo

punto de congelación. Este líquido es el principal medio de transporte de calor entre el motor y el ambiente, ya que el calor disipado se libera mayormente por convección forzada a través de radiadores y ventiladores, y en una proporción muy pequeña por medio de radiación y convección natural (Payri & Desantes, 2011).

La lubricación, por su parte, busca disminuir al máximo la fricción entre componentes al interponer entre ellos una capa de aceite. En un motor de combustión interna alternativo se presentan tres formas de lubricación: lubricación directa a través del combustible, lubricación por barboteo o salpicadura y lubricación forzada por presión (Escudero et al., 2011). La lubricación directa consiste en añadir el lubricante directamente en el combustible y es típica de MEP de 2 tiempos. Por otro lado, en la lubricación por barboteo (Figura 9) el aceite es proyectado desde el cárter por cucharillas ubicadas en las bielas del motor creando una lubricación semifluida por impregnación en los componentes aledaños. Esta se limita a revoluciones bajas por el riesgo de cavitación del aceite, por lo que está en desuso.

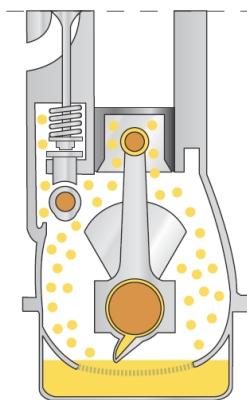


Figura 9. *Lubricación por barboteo*

(Escudero et al., 2011)

Por último, la lubricación forzada por presión, ilustrada en la Figura 10, se logra al impulsar el lubricante por medio de una bomba (movida por el cigüeñal) hacia todas las partes del motor. Este tipo de lubricación es el que se utiliza en motores modernos y puede ser de dos tipos: de cárter húmedo o de cárter seco. El primero es el tipo más extendido en el mercado vehicular, mientras que el segundo se usa generalmente en motocicletas, todoterrenos y vehículos de automovilismo. A diferencia de la lubricación con cárter húmedo, la lubricación con cárter seco se caracteriza por

tener un depósito aparte para el lubricante y un intercambiador de calor que refrigera y condensa el aceite gasificado (Escudero et al., 2011).

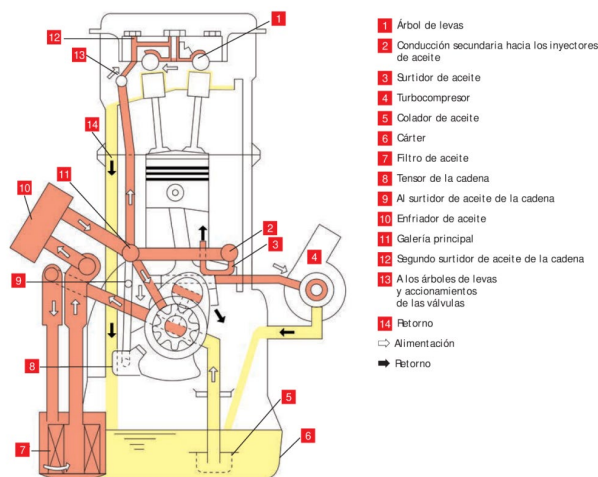


Figura 10. Circuito típico de lubricación en un MEP

(Escudero et al., 2011)

Por su parte, la sobrealimentación de motores se logra al incrementar sustancialmente el flujo de aire que ingresa a los cilindros por medio de un supercargador accionado a través del cigüeñal o un turbocompresor accionado por los gases de escape (Figura 11).

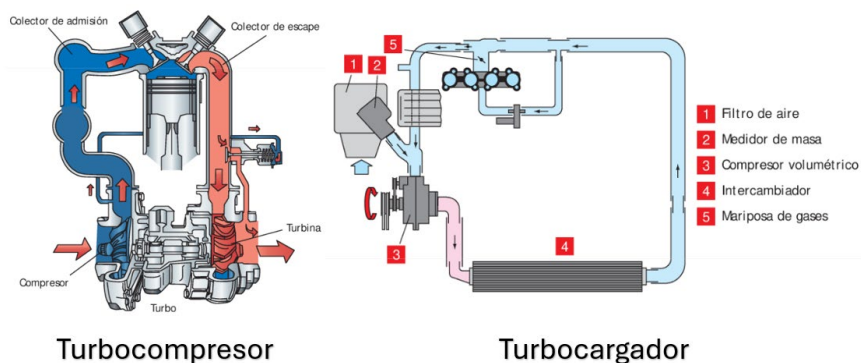


Figura 11. Diagramas de instalación de sistemas de sobrealimentación

(Escudero et al., 2011)

El aumento de flujo de aire en la admisión implica un incremento de másico de este al elevar su densidad, por lo que una mayor cantidad de combustible puede ser quemada de forma estequiométrica, generando más potencia efectiva. Sin embargo, el aumentar la presión de admisión también eleva la temperatura del aire, haciéndolo menos denso y propenso a generar

autoigniciones de mezcla, por lo que la sobrealimentación suele acompañarse de un intercambiador de calor (*intercooler*) ubicado entre el compresor de aire y el cuerpo de aceleración del motor (Heywood, 2018).

2.1.4 Diagrama de Trabajo de un Motor de Encendido Provocado

Un diagrama de trabajo representa los procesos por los que pasa un fluido de trabajo durante un ciclo termodinámico. Este puede ser teórico o real dependiendo de si el fluido y las condiciones en las que se lleva a cabo el ciclo son idealizadas o no. En el caso de los MEP, se representa el ciclo Otto mediante un diagrama presión – volumen que muestra las fases de admisión, compresión, combustión, expansión y escape. Las particularidades de los diagramas teóricos y reales de este ciclo se describen a continuación.

2.1.4.1 Diagrama de Trabajo Teórico de un Motor de Encendido Provocado

Los diagramas de trabajo teórico en un MEP parten de la idealización del fluido de trabajo, en este caso el aire, y proveen resultados analíticos con fines principalmente ilustrativos (Heywood, 2018). El ciclo termodinámico ilustrado es el ciclo Otto de 4 tiempos. En él, la combustión se realiza a volumen constante, como lo muestra la Figura 12, y las pérdidas por bombeo y transferencia de calor, al igual que el avance de encendido necesario no son considerados.

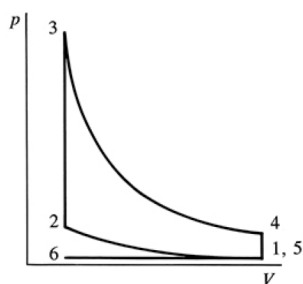


Figura 12. Diagrama de trabajo teórico de un motor de encendido provocado

(Heywood, 2018)

En el diagrama teórico de trabajo existen ciertas consideraciones en cada uno de los procesos indicados, mismas que se detallan en la Tabla 1. Tales consideraciones simplifican cada proceso con el fin de proveer un análisis conveniente y relativamente rápido del trabajo generado por el motor. Sin embargo, no representan el consumo ni la producción energética real de este tipo de motores volumétricos.

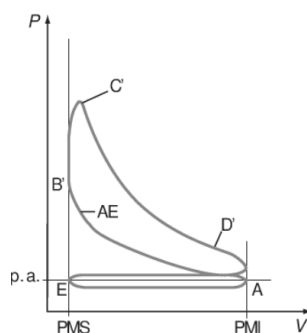
Tabla 1. Consideraciones del ciclo teórico en motores de encendido provocado

Proceso	Consideraciones
Compresión (1 – 2)	<ul style="list-style-type: none"> • Adiabática • Reversible
Combustión (2 – 3)	<ul style="list-style-type: none"> • Adiabática • A volumen constante (isócara)
Expansión (3 – 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Adiabática • Reversible
Escape (4 – 5 – 6) y admisión (6 – 1)	<ul style="list-style-type: none"> • Adiabáticas • Apertura y cierre de válvulas en punto muerto superior y punto muerto inferior • No existe cambio en el volumen del cilindro durante la apertura de válvulas • Presión de admisión y escape son constantes (isóbaras) y a presión atmosférica • Efectos de velocidad de circulación de gas son ignorados

(Heywood, 2018)

2.1.4.2 Diagrama de Trabajo Real de un Motor de Encendido Provocado

El diagrama de trabajo real de un motor de encendido provocado (Figura 13) muestra un rendimiento menor al teórico debido a que el fluido de trabajo y las condiciones de operación en realidad no son idóneas. Tales diferencias se deben al calor perdido a través de las paredes de los cilindros, la combustión no instantánea de la mezcla comprimida, la pérdida de presión en los gases de escape durante la apertura de válvulas, fugas en los anillos de compresión y a una combustión incompleta de la carga. Ello hace que la eficiencia de conversión sea únicamente el 85% de la eficiencia calculada en el ciclo teórico (Heywood, 2018).

**Figura 13.** Diagrama de trabajo real de un motor de encendido provocado

(Escudero et al., 2011)

En el caso del diagrama real de trabajo, las consideraciones tomadas para cada proceso hacen que el trabajo neto generado sea menor. En este diagrama las pérdidas por bombeo, avance de encendido y transferencia de calor se toman en cuenta tal y como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. *Consideraciones del ciclo real en motores de encendido provocado*

Proceso	Consideraciones
Admisión (E – A)	<ul style="list-style-type: none"> • No isóbara, ya que el llenado del cilindro no es total
Compresión (A – B')	<ul style="list-style-type: none"> • Presión inicial menor a la atmosférica • Presión final menor a la teórica, compensada con el avance de encendido (AE) • No adiabática
Combustión (B' – C')	<ul style="list-style-type: none"> • No instantánea • Presión final alcanzada menor debido al aumento de volumen (no isócara)
Expansión (C' – D')	<ul style="list-style-type: none"> • No adiabática • Trabajo útil menor al teórico al partir de una presión inferior
Apertura del escape (D')	<ul style="list-style-type: none"> • La apertura de válvulas de escape se anticipa al punto muerto inferior • La caída de presión no es instantánea
Expulsión de gases quemados (A – E)	<ul style="list-style-type: none"> • No isóbara, puesto que las válvulas no actúan instantáneamente

(Escudero et al., 2011)

2.1.5 Características de Operación de un Motor de Encendido Provocado

El desempeño, eficiencia y cantidad de emisiones de un MEP son definidos principalmente por sus características de operación, por lo que conocer sus parámetros de funcionamiento, indicados y efectivos permite determinar gran parte de su comportamiento al utilizarse en la automoción. A continuación, se describen estos parámetros al igual que las curvas típicas de los motores de encendido provocado.

2.1.5.1 Parámetros de Funcionamiento

Los parámetros de funcionamiento definen el estado de operación de un motor dentro de un rango específico de condiciones (Payri & Desantes, 2011). Estos parámetros parten de variables experimentales y se clasifican en básicos y avanzados. Los primeros se muestran en el diagrama de la Figura 14, mientras que los avanzados dependen del estudio de motor que se esté realizando

y contemplan temperaturas de refrigerante, gases de admisión y escape y de lubricante, presión de inyección e incluso la presión dentro del cilindro (Payri & Desantes, 2011).

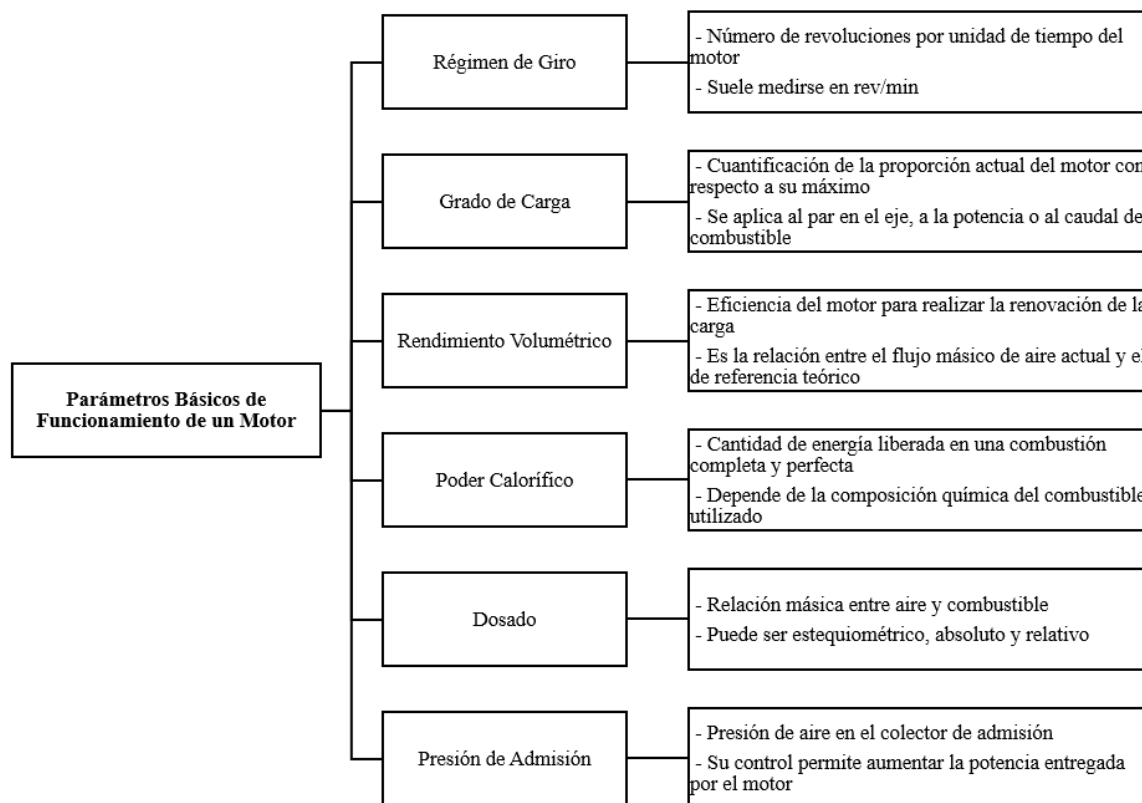


Figura 14. *Parámetros básicos de funcionamiento de un motor*

(Autoría propia)

2.1.5.2 Parámetros Indicados y Efectivos

Los parámetros indicados y efectivos caracterizan el desempeño del motor y parten de mediciones en laboratorio y cálculos específicos para cada motor que dependen del ciclo termodinámico utilizado (Heywood, 2018). Los parámetros indicados se calculan utilizando los ciclos de trabajo reales de los motores y se refieren a lo esperado antes de realizar dicho ciclo. En contraste, los parámetros efectivos se miden en cigüeñal, por lo que son menores que los indicados y parten de una medición física directa. Los parámetros pertenecientes a cada categoría al igual que su descripción básica se muestra en el diagrama de la Figura 15.

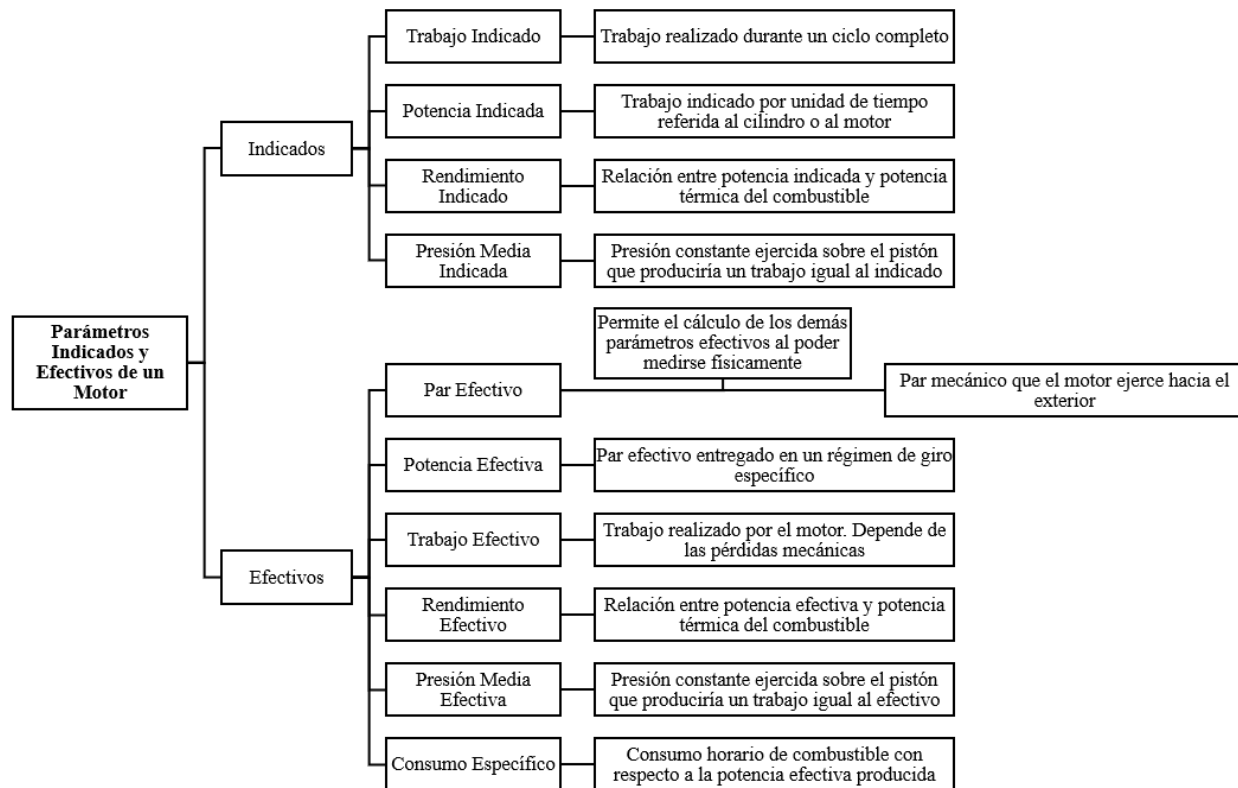


Figura 15. *Parámetros indicados y efectivos de un motor*

(Autoría propia)

2.1.5.3 Curvas Características de un MEP

Las curvas características de los motores se usan para mostrar el desempeño, los parámetros de funcionamiento o emisiones de estos de manera gráfica. Las variables mostradas en los gráficos dependen de los objetivos y aplicación de estos, por lo que cualquier parámetro de interés puede ser representado. Sin embargo, los más habituales son potencia, par, consumo específico, rendimiento y emisiones específicas (Payri & Desantes, 2011).

Las curvas características más utilizadas son las de velocidad a carga constante (generalmente, carga máxima) como la mostrada en la Figura 16. Estas representan el funcionamiento del motor en sus prestaciones máximas. Es decir, presentan curvas de par y potencia máxima para cada régimen de giro dado. A veces, se suele acompañar de una tercera curva que muestra el consumo específico (Rovira & Muñoz, 2015). Estas permiten determinar los puntos en los que el motor alcanza su par máximo absoluto (o rango de par máximo) y potencia máxima absoluta.

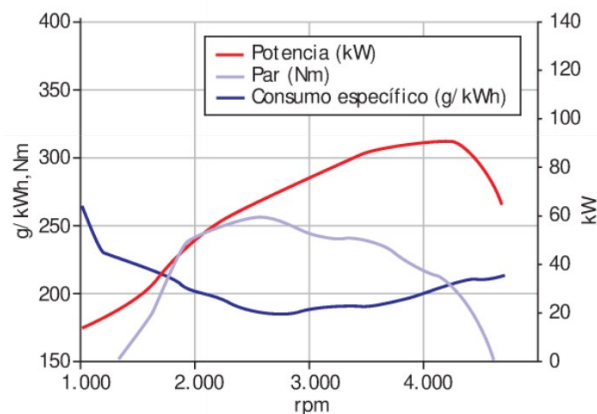


Figura 16. Ejemplo de curvas características de velocidad a plena carga

(Escudero et al., 2011)

2.2 Fundamentos de Formación de Emisiones

El utilizar motores de encendido provocado para la automoción implica expulsar emisiones hacia la atmósfera, sean contaminantes o no. Si bien las emisiones en un motor de combustión interna provienen también de las evaporaciones de combustible y del cárter, se estima que el 55% del total de ellas corresponde a los gases formados durante la combustión (Álvarez et al., 2005). Por ello, actualmente se implementan tecnologías y normativas que buscan reducir la cantidad de emisiones de un motor utilizando distintos enfoques.

2.2.1 Proceso de Combustión de un Motor de Encendido Provocado

La combustión en un MEP requiere de una premezcla de aire y combustible. Esta se prepara antes de la carrera de admisión, introduciendo combustible líquido altamente volátil, como gasolinas, gas licuado de petróleo y alcoholes, en el colector de aire. También suelen usarse combustibles gaseosos como metano o gas natural que se homogeneizan fácilmente gracias a su elevada capacidad de difusión (Rovira & Muñoz, 2015). Estos combustibles, junto con su poder antidetonante y la relación de compresión del motor, determinan el grado de cascabeleo, eficiencia térmica y nivel de emisiones del motor (Yue & Som, 2021).

Por otro lado, existen dos características operativas clave en la combustión de un motor: el grado de carga y su dosado respectivo. El grado de carga determina la cantidad de calor que se aporta al

ciclo termodinámico usado y se representa como un porcentaje de la potencia máxima teórica del motor (Álvarez et al., 2005). Además, su regulación depende del tipo de motor utilizado. En un MEP, la regulación de la carga se regula de forma cuantitativa, controlando la cantidad de mezcla aire – combustible que entra al motor durante la fase de admisión. Esto se debe a que la combustión en estos motores es de tipo homogénea.

El dosado es la relación entre la masa de combustible y la masa de aire en la mezcla (Ecuación 1). Existen tres tipos: dosado estequiométrico, dosado relativo y dosado actual. Sin embargo, el dosado actual únicamente hace referencia a la relación combustible – aire en un instante dado.

$$F = \frac{m_{combustible}}{m_{aire}} \quad \text{Ecuación. 1}$$

Por su parte, el dosado estequiométrico representa la relación ideal necesaria entre combustible y aire para realizar una combustión completa (Ecuación 2). Dicha relación está definida por la composición química del hidrocarburo utilizado (Álvarez et al., 2005).



En el caso motores de encendido provocado, generalmente se utiliza gasolina, con fórmula química C_8H_{18} . Por lo tanto, su combustión estequiométrica está regida por la Ecuación 3.



Por otro lado, el dosado relativo es la relación entre el dosado actual del motor con respecto al dosado estequiométrico del mismo. Si es menor a 1 ($Fr < 1$), se dice que se trabaja en mezcla pobre (falta de combustible); si es mayor a 1 ($Fr > 1$), se trabaja en mezcla rica (exceso de combustible); y si es igual a 1 ($Fr = 1$) la mezcla será la estequiométrica. Así, en un MEP, el dosado relativo deberá mantenerse cerca de 1 para garantizar una combustión homogénea (Rovira & Muñoz, 2015).

2.2.2 Tipos de Emisiones en un Motor: Gases de Efecto Invernadero y Contaminantes

Al momento de clasificar emisiones vehiculares, estas pueden dividirse, según su naturaleza, en tres grandes tipos: emisiones de gases de escape, emisiones abrasivas y emisiones evaporativas

(Figura 17). Las emisiones evaporativas de un vehículo con un motor de combustión interna pueden tener tres fuentes: posibles fugas en el tanque de combustible, sus líneas de comunicación y uniones; permeabilización del combustible a través de las paredes del sistema que lo contiene y liberación de gases a través de las válvulas del cánister de carbón. Estas emisiones contribuyen al aumento de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) presentes en la atmósfera (Li et al., 2022). Por otro lado, las emisiones abrasivas provienen principalmente de cuatro fuentes: abrasión de frenos, desgaste de neumáticos, desgaste de la calzada y re – suspensión de partículas causada por el levantamiento de polvo hacia la atmósfera a razón del tráfico vehicular (Harrison et al., 2021).

Por último, las emisiones de gases de escape son producidas principalmente por la combustión de los motores, mismos que utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento, por lo que incluyen principalmente al monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC) y el dióxido de carbono (CO₂) (Rosero, 2021).

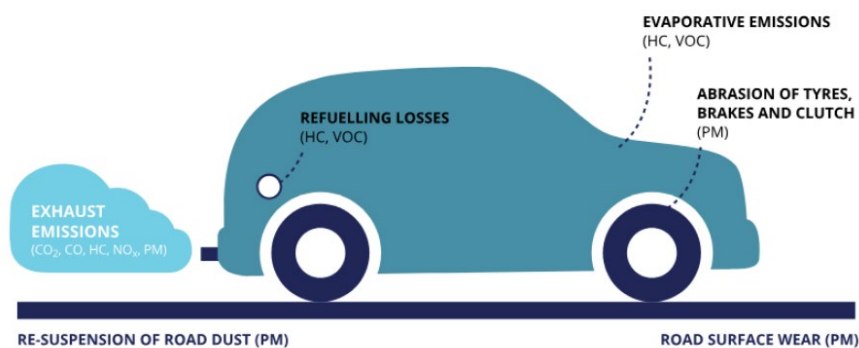


Figura 17. *Tipos de emisiones vehiculares*

(European Environment Agency, 2016)

Las emisiones de gases de escape, por su parte, se clasifican en dos tipos: gases de efecto invernadero (no contaminantes) y emisiones contaminantes. Su formación se debe a que el aire utilizado para formar la mezcla de combustión contiene no sólo oxígeno, sino también nitrógeno y otros gases atmosféricos que en condiciones de altas temperaturas y presiones forman compuestos diferentes. Ambos tipos de emisiones producen distintos efectos en el ambiente y en la salud de las personas, por lo que su mitigación toma distintos enfoques dependiendo del tipo de gas y su formación.

2.2.2.1 Gases de Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI o GHG, por sus siglas en inglés) son los principales causantes del cambio climático y son tres: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Payri & Desantes, 2011). Si bien el efecto invernadero es un proceso natural que permite la existencia de vida en el planeta, este se ha visto acelerado por las emisiones antropogénicas de estos gases, especialmente de CO_2 , causando problemas más allá del cambio climático como los mostrados en la Figura 18 (Shah et al., 2024).

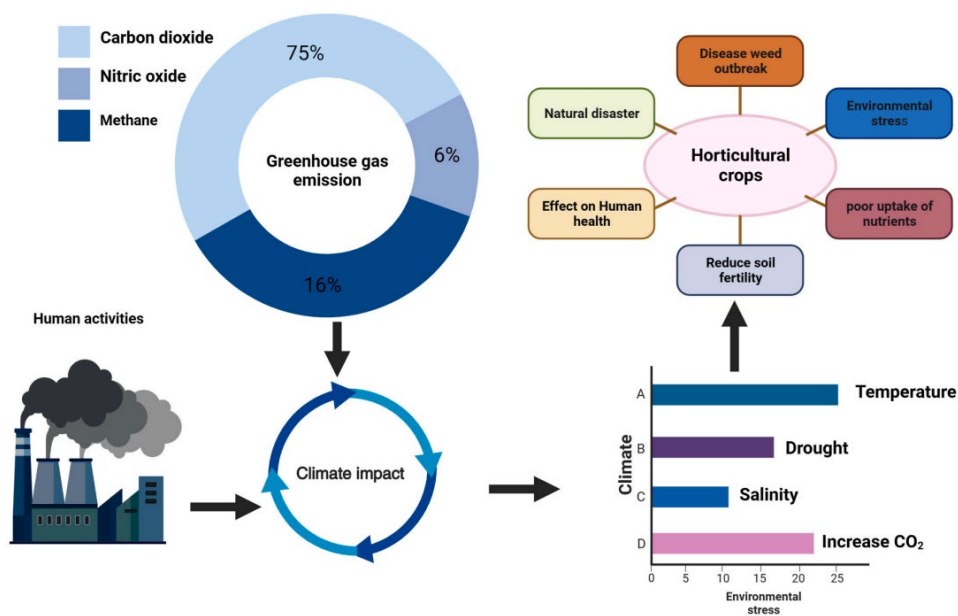


Figura 18. Problemas causados por los gases de efecto invernadero

(Shah et al., 2024)

El CO_2 es incoloro e inodoro y no es tóxico para los seres humanos. El volumen de emisiones de este gas depende directamente del tipo de combustible utilizado y es inevitable al utilizar combustibles fósiles (Rovira & Muñoz, 2015). Esto por lo mostrado en la ecuación de combustión estequiométrica (Ecuación 3). Además, aunque el metano y el óxido nitroso tengan un impacto 23 y 296 veces mayor al CO_2 en el efecto invernadero respectivamente (Payri & Desantes, 2011), su emisión es significativamente menor, por lo que se considera que el dióxido de carbono es el principal agente contribuyente de los motores al cambio climático.

2.2.2.2 Emisiones Contaminantes

Las emisiones contaminantes, a diferencia de los gases de efecto invernadero, afectan la salud de las personas incrementando las enfermedades y la mortalidad. Dentro de este tipo de emisiones se encuentran los hidrocarburos sin quemar (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x) y material particulado (PM) (Payri & Desantes, 2011). Todos estos gases se forman durante la combustión debido a distintas circunstancias. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno se forman debido a las altas presiones y temperaturas dentro del cilindro, el monóxido de carbono es consecuencia de una mezcla demasiado rica en la que no existe suficiente oxígeno para formar CO_2 y los hidrocarburos sin quemar se acumulan en pequeños volúmenes de la cámara de combustión o son parte de aceite residual en el cilindro y salen al ambiente durante la carrera de escape (Heywood, 2018).

Una de las variables que más influyen en la formación de este tipo de emisiones es el dosado durante el proceso de combustión, tal y como lo muestra la Figura 19. Generalmente, las emisiones de CO y HC aumentan conforme la mezcla se hace más rica, mientras que las concentraciones de NO_x alcanzan su pico máximo un poco antes del dosado estequiométrico.

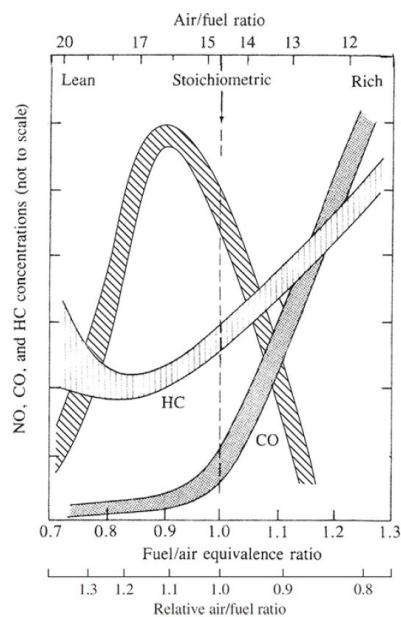


Figura 19. Variación de concentraciones de CO, HC y NO con respecto al dosado

(Heywood, 2018)

2.2.3 Tecnologías Para Reducir Consumo de Combustible y Emisiones

Para mitigar la cantidad de emisiones expulsadas a la atmósfera por los motores de combustión interna se tienen en cuenta dos aspectos: estas dependen de las condiciones de combustión y de la cantidad de combustible quemado. Por ello, las soluciones adoptadas para reducir las se enfocan en los combustibles utilizados, en el motor y su combustión y en los gases de escape como tal (Álvarez et al., 2005).

Cada una de las soluciones adoptadas tiene su propio campo de investigación y son como tal muy extensas. Por ello, estas se resumen en la Figura 20 como referencia para investigaciones posteriores.

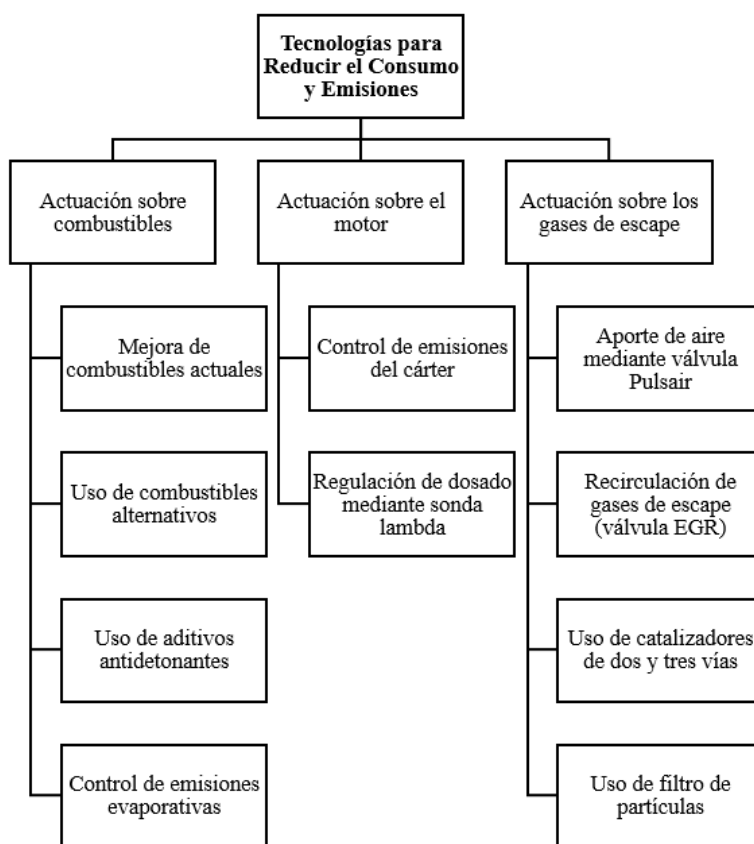


Figura 20. *Tecnologías para reducir el consumo de combustible y emisiones*

(Autoría propia)

2.2.4 Normativas de Control de Emisiones

Las emisiones de motores de encendido provocado están actualmente reguladas por normativas de control impuestas por los gobiernos. Ello implica que gran parte del presupuesto e investigación se dedique a crear motores más eficientes y menos contaminantes, más no a alcanzar potencias y prestaciones más altas de las necesitadas (Payri & Desantes, 2011). Dependiendo de la región las normativas pueden ser más o menos restrictivas. A continuación, se presentan algunas de ellas.

2.2.4.1 Normativas Europeas

En Europa, específicamente en los países pertenecientes a la Unión Europea, los límites de emisiones dependen de los estándares de la UNECE. En el caso de homologación de vehículos, los límites están definidos por el Reglamento No. 83/2015 y el Reglamento (UE) No. 646/2016 (Euro 6) en los cuales se establecen umbrales de factores de emisión para emisiones contaminantes como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) (European Parliament and Council of the European Union, 2016; UNECE, 2015). Además, los reglamentos No. 101 y No. 168 regulan la medición de dióxido de carbono para vehículos de categorías M₁ y N₁ y la determinación de emisiones en tráfico real para vehículos de categorías M₁, M₂ y N₁ (UNECE, 2013, 2024).

2.2.4.2 Normativas Nacionales

En el Ecuador, los límites máximos de emisiones contaminantes se imponen con el reglamento RTE INEN 017/2008. En él, se establece que los vehículos automotores de ciclo Otto deberán cumplir los estándares de emisiones de la norma NTE INEN 2204 (INEN, 2008). Esta establece límites de concentración de emisiones de gases de escape para monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) medidos durante una prueba estática (INEN, 2017). Sin embargo, no existe una normativa que regule las emisiones de CO₂ ni el nivel de emisiones en tráfico real o siguiendo un ciclo de conducción.

2.3 Efecto de la Altitud en un Motor de Encendido Provocado

El desempeño de un vehículo está condicionado por factores extrínsecos e intrínsecos. Los factores extrínsecos actúan a nivel de vehículo, mientras que los intrínsecos, a nivel de motor. Uno de los factores que afectan directa o indirectamente en ambos niveles es la altitud sobre el nivel del mar

y, por consiguiente, la presión y densidad del aire. A continuación, se desglosan los factores que afectan al desempeño del vehículo con especial enfoque en la relación entre altitud y combustión.

2.3.1 Factores que Afectan en el Desempeño de Vehículo

El desempeño de un vehículo depende de los factores que actúen a nivel del automóvil (externos) y a nivel de motor (internos). Los factores externos determinan la magnitud de las fuerzas de oposición al movimiento del vehículo, haciendo que la potencia de tracción necesitada aumente o disminuya (Gillespie, 1992). Por otro lado, los factores internos afectan directamente a la combustión, condicionando el desempeño del motor instalado en el vehículo (Heywood, 2018). En las siguientes secciones se habla brevemente de dichos factores.

2.3.1.1 Factores que Actúan a Nivel de Vehículo

Los factores principales que influyen en la potencia de tracción necesaria para mover un vehículo pueden resumirse en las fuerzas longitudinales externas que actúan sobre él. Éstas se representan en la Figura 21 y son cuatro: fuerza aerodinámica de arrastre, fuerza de resistencia a la rodadura, fuerza de resistencia a la pendiente y fuerza por aceleración de masas.

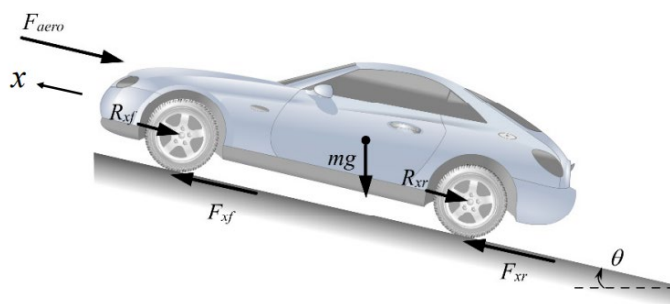


Figura 21. Diagrama de cuerpo libre de vehículo en movimiento

(Rajamani, 2012)

Todas estas fuerzas pueden calcularse mediante modelos matemáticos simples. De ellas, la fuerza aerodinámica es la única que varía con respecto a la velocidad del vehículo, mientras que las demás suelen considerarse constantes y dependen de los neumáticos del vehículo, las condiciones del terreno y el momento de inercia de las masas del tren de potencia (considerándose un factor de eficiencia para el sistema de transmisión). Sin embargo, en cuanto a la fuerza de resistencia a la rodadura, esta puede verse afectada por la cantidad de agua presente en la superficie del terreno,

especialmente a velocidades mayores a los 50 km/h (Vera et al., 2016). Esto, ya que el coeficiente de resistencia a la rodadura se reduce y, por tanto, la fuerza de resistencia también. No obstante, la fuerza de tracción ejercida por los neumáticos en la superficie del suelo también disminuye debido al hidropneumático (*acuaplaning*), por lo que no existe una teoría contundente sobre esto.

2.3.1.2 Factores que Actúan a Nivel de Motor

A nivel de motor, existen muchas variables que pueden afectar su rendimiento. Sin embargo, dejando de lado aspectos constructivos y pérdidas debido a fricción de componentes, los principales factores que afectan la eficiencia y desempeño en un motor de encendido provocado son el avance de encendido, la composición de la mezcla aire – combustible, la carga del motor, el régimen de giro y la relación de compresión real en el ciclo de trabajo (Heywood, 2018).

La carga y régimen de giro son los factores más importantes de todos los anteriormente mencionados. Esto ya que determinan la eficiencia volumétrica, eficiencia de conversión de energía química contenida en el combustible, eficiencia mecánica, el dosado y las pérdidas por calor y fricción del motor (Heywood, 2018). Esto, tal y como lo muestra la Figura 22, resulta en rendimientos distintos con respecto a la carga (medida como presión en el colector de admisión) y con respecto al régimen de giro del motor. Además, la carga es uno de los aspectos más importantes para tener en cuenta al momento de analizar un motor, diferenciando si este es natural

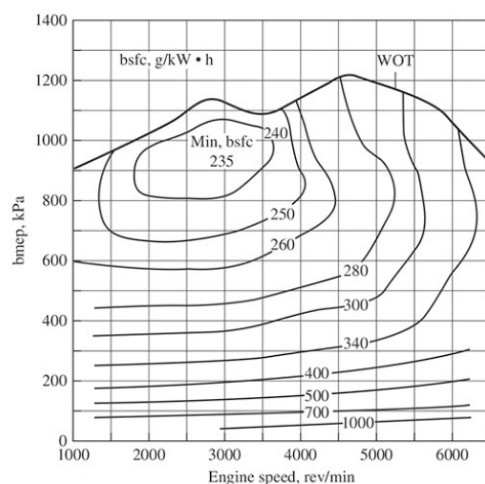


Figura 22. Mapa de rendimiento de un motor con aspiración natural o sobrealimentado.

(Heywood, 2018)

Por su parte, el avance de encendido determina la cantidad de energía liberada por los gases comprimidos durante un ciclo de trabajo. Si la ignición se adelanta o retrasa demasiado, la presión máxima en el cilindro disminuye, ejerciéndose menos trabajo. Por otro lado, la composición de la mezcla determina la cantidad de combustible quemado y, por tanto, la cantidad de potencia térmica disponible para ser convertida en potencia efectiva.

Por último, aunque la relación de compresión geométrica de un motor es fija, la relación de compresión real varía dependiendo del tiempo de apertura de válvulas y la dinámica de los gases durante la renovación de la carga. Esta relación de compresión real, limitada por el octanaje de los combustibles, determina la tasa de expansión de los gases y las pérdidas por bombeo durante el ciclo de trabajo. Por tanto, influye en la eficiencia del ciclo de trabajo y en la magnitud de par efectivo suministrada por el motor (Heywood, 2018).

2.3.2 Densidad del Aire y Presión Atmosférica

La composición del aire, densidad y su concentración de oxígeno varían con respecto a la altitud sobre el nivel del mar (Lapuerta et al., 2006). Esto, debido a que las condiciones de presión y temperatura atmosférica varían exponencial y linealmente (Fundación Española para la Ciencia y Tecnología, 2007), respectivamente, como lo muestra la Figura 23.

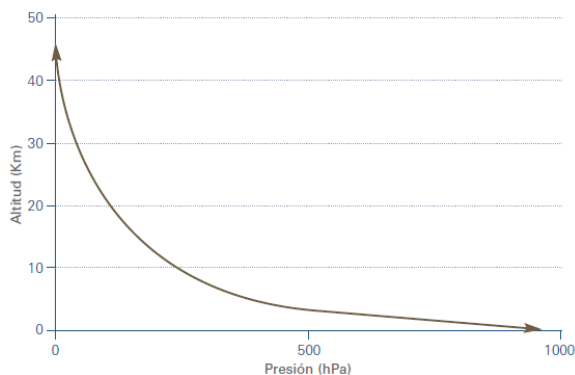


Figura 23. Variación de presión atmosférica con respecto a la altitud sobre el nivel del mar

(Fundación Española para la Ciencia y Tecnología, 2007)

Al hablar de presión atmosférica se hace referencia a la presión ejercida por el aire sobre una superficie. En condiciones normales (a nivel del mar, con temperatura ambiente de 20 °C) dicha presión es de 101,325 kPa, haciendo que la densidad del aire sea de aproximadamente 1,22 kg/m³ (Jijón et al., 2018). La variación de presión atmosférica está principalmente ligada a la altitud. Sin

embargo, la temperatura y humedad del ambiente también pueden influir en ella, haciendo que la densidad del aire también sea susceptible a cambios debidos a estos dos factores (Fundación Española para la Ciencia y Tecnología, 2007).

Aun así, como se menciona en (Jijón et al., 2018), se espera que al aumentar la altitud (y disminuir la presión atmosférica), la densidad del aire disminuya al ser directamente proporcional a la presión. Esto se debe a que el aire seco en la atmósfera obedece la ley de los gases ideales. En la práctica, también suele usarse una ecuación simplificada (Ecuación 4) en la que se relaciona la densidad de aire en kg/m^3 , con la presión atmosférica en Pa y la temperatura ambiental en $^{\circ}\text{C}$ (Echeverri, 2022).

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{1,293}{1 + 0,00367 \cdot T} \left(\frac{P}{101,325} \right) \quad \text{Ecuación. 4}$$

2.3.3 Efecto de la Altitud en la Combustión

En motores de encendido provocado, la variación de potencia entregada se hace mediante la regulación cuantitativa de la carga a través de una mariposa que estrangula el conducto de admisión de aire (Payri & Desantes, 2011). Esto quiere decir que el rendimiento volumétrico controla la potencia en este tipo de motores.

El rendimiento volumétrico es directamente proporcional al flujo másico de aire actual en el cilindro y este último es directamente proporcional a la presión media efectiva del ciclo de trabajo. Por lo tanto, la potencia que un MEP puede entregar aumenta o disminuye dependiendo principalmente de dos factores: la eficiencia propia del llenado del cilindro durante la renovación de la carga y de la cantidad de aire admitido o carga (Payri & Desantes, 2011). Esta última, especialmente en MEP naturalmente aspirados, depende del régimen de giro, la apertura de la mariposa y de las condiciones ambientales en las que opere, con especial énfasis en aquellas que determinen la presión atmosférica. En motores sobrealimentados, la influencia de la presión atmosférica no es tan relevante.

Asimismo, la densidad de aire, y por tanto la densidad de la mezcla aire – combustible admitida en el motor, depende de la presión atmosférica. Esta última, como se vio en el apartado anterior, depende mayoritariamente de la altitud sobre el nivel del mar. Por ello, se espera que un motor

naturalmente aspirado tenga mejores prestaciones en altitudes menores gracias a la mayor cantidad de combustible quemado con dosado estequiométrico. Sin embargo, el hecho de operar a mayor carga y régimen a mayores altitudes puede contrarrestar el efecto de la densidad de aire puesto que el rendimiento volumétrico máximo se obtiene a plena carga (Payri & Desantes, 2011) (Figura 24).

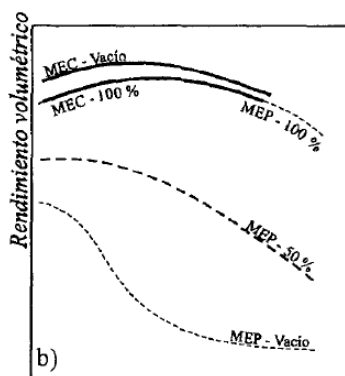


Figura 24. Variación de rendimiento volumétrico en MEC y MEP con la carga

(Payri & Desantes, 2011)

2.3.4 Estudios Previos Sobre el Efecto de la Altitud en la Combustión

El efecto de la altitud sobre la combustión en motores de encendido provocado se ha documentado a nivel global y regional. Sin embargo, a pesar de demostrar la influencia de la altitud en la combustión a través de la presión atmosférica, sus conclusiones difieren de un estudio a otro, indicando que el tema de estudio es complejo y requiere un análisis a profundidad. A continuación, se habla brevemente de algunos de estos estudios previos.

2.3.4.1 Estudios Previos a Nivel Global

El efecto de la altitud en motores naturalmente aspirados y sobrealimentados se ha estudiado de forma teórica, mediante pruebas estacionarias y en rutas de tráfico real. Ejemplo del primer caso es lo presentado por Lapuerta et al. (2006), donde mediante cálculos termodinámicos y psicrométricos se determinó que, al aumentar la altitud, la potencia indicada de un MEP de aspiración natural disminuye notablemente en todo el rango de régimen de giro, por lo que es necesario sobrealimentar el motor para evitar pérdidas.

Por otro lado, mediante ciclos de conducción estandarizados, se concluyó que el aumento de consumo de combustible al operar un vehículo a mayores altitudes no siempre es evidente (Zervas,

2011). Esto ya que, dependiendo del ciclo de conducción utilizado, las emisiones de CO₂ y consumo de combustible podían ser mayores o menores a una misma altitud, sugiriendo que existen otros factores que interfieren en el análisis y que no han sido tomados en cuenta. Sin embargo, otro estudio que analizó las emisiones de varios vehículos utilizando un PEMS siguiendo el ciclo de conducción WLTC en una cámara barométrica, determinó que la cantidad de CO₂ siempre es menor a mayores altitudes, comparándolas con las obtenidas a nivel del mar (Wang et al., 2020).

Por último, otro estudio concluyó que, tanto en mediciones en laboratorio como en condiciones de tráfico real, la disminución en el consumo de combustible y emisiones de CO₂ no fue la esperada al aumentar la altitud (Wang et al., 2022). Esto ya que existen factores que influyen en mayor medida el consumo y emisiones que la presión atmosférica. Tal conclusión difiere con lo mostrado por Jiang et al. (2024), donde la relación entre emisiones de CO₂ y altitud mostró una tendencia clara, especialmente en vehículos a gasolina. Sin embargo, el aumentar la altitud de operación en condiciones de tráfico real también implica cambiar los modos de operación y conductas de manejo debido a la topografía típica de zonas con elevada altitud. Esto podría indicar que, si bien la altitud no es el factor principal en la variación de consumo de combustible y CO₂, esta sí podría influir indirectamente en ambos, tal y como se muestra en el estudio realizado por Xu et al. (2023).

2.3.4.2 Estudios Previos a Nivel Regional

Al igual que con los estudios a nivel global, a nivel regional se ha analizado la influencia de la altitud y la presión atmosférica en el rendimiento de motores de encendido provocado mediante simulaciones, en condiciones controladas de laboratorio usando un dinamómetro de banco y en rutas en condiciones de tráfico real utilizando equipos de medición similares a un PEMS.

Mediante una simulación utilizando el método MIL (Model In the Loop), se concluyó que en la costa ecuatoriana el consumo de combustible es mayor que en la sierra. Sin embargo, tal aumento en el consumo se le atribuye al aumento de resistencia aerodinámica debido a la elevada presión atmosférica presente a bajas altitudes (Grijalva et al., 2021).

Por otro lado, estudios realizados en el Ecuador usando analizadores de gases de escape y dinamómetros inerciales determinaron que la concentración volumétrica de CO₂ disminuye al aumentar la altitud, sugiriendo un menor consumo de combustible (Tipanluisa et al., 2017; Arroyo

Terán et al., 2021). No obstante, las pruebas realizadas no siguieron un ciclo de conducción estandarizado, por lo que los resultados presentan el mismo problema que el presentado en los resultados de homologación de vehículos y pruebas bajo condiciones de tráfico real.

Por último, los estudios que analizan la relación entre altitud y rendimiento de un vehículo en condiciones de tráfico real son escasos. Sin embargo, un estudio ecuatoriano recorrió las tres regiones naturales del Ecuador, operando en un rango de altitud 0 a 3500 msnm y condiciones de manejo y funcionamiento variadas y sin estandarizar. Este concluyó que la altitud no tiene un efecto significativo en el consumo de combustible al variar su rango. Sin embargo, el grado de aceleración registrado sí influyó en gran medida no sólo en el consumo, sino también en las emisiones (Barrionuevo y Viera, 2021).

2.4 Estimación de Consumo de Combustible y Emisiones en un Vehículo

El análisis de consumo de combustible y emisiones de un vehículo puede tener distintos propósitos. Por ello, los métodos para cuantificar su variación con respecto a distintos parámetros de operación de motor también son variados, distinguiéndose dos enfoques principales: medir y estimar. Además, la cuantificación puede hacerse bajo condiciones de operación controladas (laboratorio) o en condiciones de tráfico real. En las secciones siguientes, se detalla brevemente estos enfoques.

2.4.1 Enfoque Para Cuantificar Consumo de Combustible y Emisiones

La estimación es uno de los enfoques más versátiles al momento de cuantificar la variación de consumo de combustible y emisiones de un vehículo bajo ciertas condiciones. Sin embargo, el análisis de estos dos parámetros también puede lograrse mediante medición directa. A continuación, se presentan los métodos más utilizados para cada uno de estos enfoques.

2.4.1.1 Medición de Consumo de Combustible y Emisiones

La medición directa de consumo de combustible y emisiones busca obtener datos empíricos de estas variables. Generalmente, las pruebas son estandarizadas y las condiciones de operación buscan representar el comportamiento típico del vehículo. Un resumen de los métodos utilizados se muestra en la Figura 25.

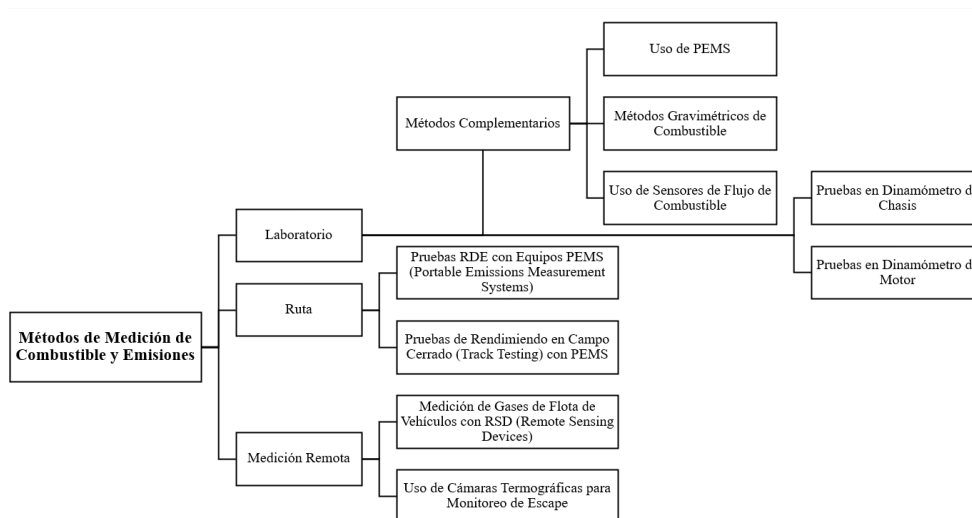


Figura 25. *Métodos de medición de consumo de combustible y emisiones*

(Autoría propia)

2.4.1.2 Estimación de Consumo de Combustible y Emisiones

Los métodos de estimación son variados y dependen de la disponibilidad de datos, capacidad computacional, escala y objetivo del análisis. Un resumen de los principales métodos de estimación de emisiones y consumo de combustible se presenta en la Figura 26 como referencia para esta y futuras investigaciones.

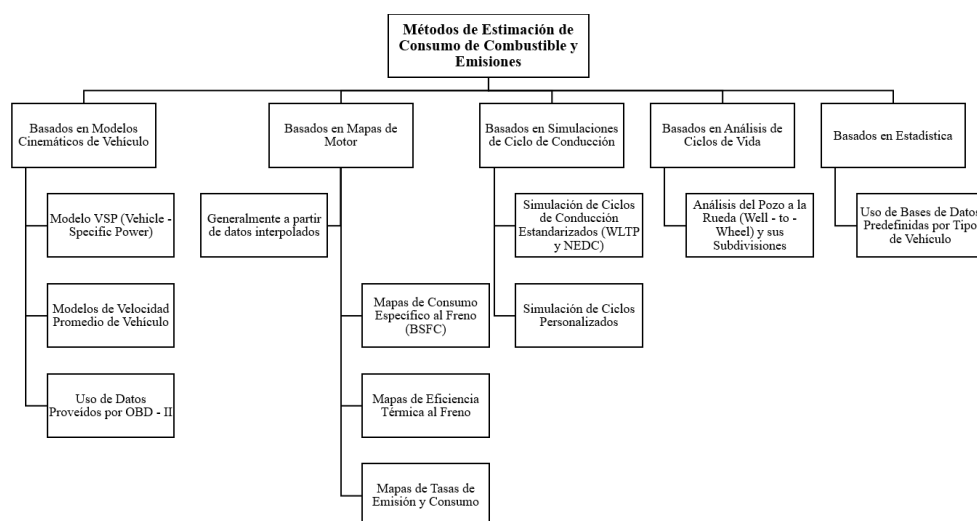


Figura 26. *Métodos de estimación de consumo de combustible y emisiones*

(Autoría propia)

2.4.2 Enfoques de Medición en Tráfico Real: Consumo de Combustible y Emisiones

Para medir o estimar el consumo de combustible y emisiones en condiciones de tráfico real se han utilizado varios métodos de los anteriormente mencionados. En Colombia, se hicieron pruebas de laboratorio usando el ciclo de conducción FTP – 75 combinado con un método gravimétrico y datos proveídos por OBD – II para analizar la variación en el consumo al aplicar conducción eficiente. Los datos también se validaron con pruebas en ruta estandarizadas (Castillo, 2018b). El método es preciso, pero su implementación es limitada debido a la necesidad de modificar el sistema de suministro de combustible y de realizar un estudio cinemático previo para estandarizar rutas en condiciones de tráfico real.

Por otro lado, en Ecuador, se analizó el desempeño de un vehículo en condiciones de tráfico real trabajando con dos combustibles distintos. Los datos de operación de motor se obtuvieron mediante OBD – II y un registrador de datos (ELM327). Además, se amplió el análisis de consumo de combustible al usar la técnica de VSP y medir la diferencia de combustible después de cada prueba (Murillo & Usca, 2021b). Esta metodología es viable, pero carece de una medición física segundo a segundo, por lo que todos sus valores son estimados. Asimismo, no se cuantificaron las emisiones.

Otros estudios basaron la cuantificación de consumo de combustible y emisiones de CO₂ usando únicamente datos proveídos por OBD – II y dispositivos GNSS (Narvárez & Narvárez, 2023; Rosero Obando et al., 2024; Yupanqui, 2020b). Tal metodología es la más accesible, puesto que los dispositivos utilizados son de bajo costo y su interoperabilidad entre vehículos de distinta marca es alta. Aun así, los valores presentados carecen de mediciones físicas, presentando un ligero sesgo en los resultados al depender de las estimaciones realizadas por la computadora del vehículo.

2.4.3 Enfoque de Mapas de Motor

El utilizar mapas de motor es un enfoque visual ampliamente utilizado en la bibliografía, especialmente al momento de analizar tasas de consumo de combustible y emisiones. A continuación, se habla de los fundamentos de este tipo de gráficos y se analizan brevemente estudios previos en los que se usó este enfoque.

2.4.3.1 Fundamentos de Mapas de Motor

Los parámetros de salida de un motor suelen representarse mediante diagramas en función de sus parámetros de entrada. Estos se llaman curvas características de motor y dentro de su clasificación incluyen a las curvas características multiparamétricas o mapas de motor (Payri & Desantes, 2011). Estos, generalmente, representan parámetros de salida a partir de dos variables de operación: régimen de giro y carga. Esta última, expresada en términos de presión media efectiva en el cilindro o par efectivo. Sin embargo, otras variables como avance de encendido, tasa de inyección de combustible, temperatura de gases de escape y relación de compresión también se utilizan como parámetros de entrada (Payri & Desantes, 2011).

Este tipo de gráficos suele usarse para comparar motores de una misma familia o conocer las prestaciones de uno de ellos en puntos específicos de carga, régimen o potencia (Rovira & Muñoz, 2015). El tema del mapa de motor, definido por la tercera variable o variable de salida, suele representarse por medio de colores y bins agrupados (Rosero et al., 2020b) o mediante contornos de valores interpolados y escalas de colores continuas (Mata et al., 2016) como se muestra en la Figura 27.

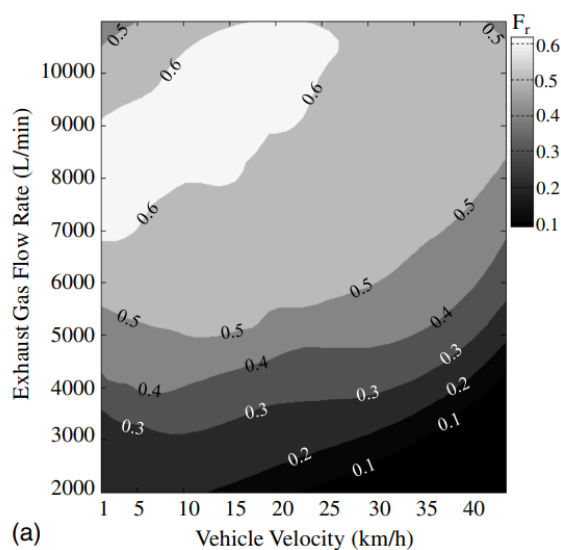


Figura 27. Mapa de motor con contornos y escala de color continua

(Mata et al., 2016)

2.4.3.2 Mapas de Motor de Consumo de Combustible y Eficiencia Térmica

El método de mapas de motor se ha utilizado para cuantificar el consumo de combustible al analizar la variación de eficiencia térmica al freno, tasas de consumo de combustible y emisión de CO₂ y consumo específico al freno en todo el rango de operación del vehículo de prueba. Ejemplo de ello es lo presentado en el estudio de Rosero et al. (2020b) donde se analizó el comportamiento de buses urbanos en condiciones de tráfico real mediante mapas de motor discretizados. Una metodología similar fue usada por Cuzco y Espinosa (2023) para analizar las características transitorias de operación de un vehículo equipado con un MEP en la ciudad de Ibarra, Ecuador. Por otro lado, mapas de motor de contornos fueron utilizados por Rosero Obando et al. (2024), con los cuales se estimó el consumo de combustible y emisiones en tráfico real utilizando datos proveídos por OBD – II. Sin embargo, ninguno de estos estudios usó mapas de motor de contornos para todo el espectro régimen – par del vehículo analizado. Esto porque únicamente se utilizaron datos experimentales sin realizar interpolaciones, siendo esta una técnica común al generar curvas estadísticas multiparamétricas.

2.5 Software de Procesamiento de Datos

Los paquetes de software de procesamiento de datos son muy variados y dependen del uso al que están orientados. Tomando este enfoque, se pueden clasificar en software estadístico de uso general y software estadístico para análisis especializado. A continuación, se brindan algunos ejemplos.

2.5.1 Software Estadístico de Uso General

Este tipo de paquetes son los más populares puesto que permiten realizar una amplia gama de análisis estadísticos de manera relativamente sencilla, de forma confiable y gratuita. Cuatro de los paquetes más utilizados se presentan a continuación.

- **Excel:** Pertenece al paquete de Office de Microsoft, es de uso gratuito bajo ciertas condiciones y permite realizar cálculos con fórmulas, crear bases de datos, gráficos estadísticos de manera sencilla e incluso programar automatizaciones gracias a Visual Basic for Applications (Microsoft, 2025).
- **R:** es un lenguaje de programación de licencia abierta diseñado específicamente para realizar cómputos y gráficos estadísticos. Está disponible para distintas plataformas

basadas en UNIX, Windows y MacOs y permite utilizar paquetes de terceros para usos específicos (The R Foundation, 2024).

- **Python:** es de código abierto permite procesar datos, analizarlos y crear modelos a partir de machine learning mediante bibliotecas como Pandas, NumPy y SciPy (Python Software Foundation, 2025).
- **SAS:** permite procesar grandes volúmenes de datos y realizar análisis predictivos con ellos. Es un paquete de pago y su mayor fuerte es su programación basada en inteligencia artificial (SAS Institute Inc., 2025).

2.5.2 Software Estadístico Para Análisis Especializado

Estos paquetes de procesamiento de datos son utilizados en casos específicos o campos particulares de investigación para los que fueron desarrollados. Generalmente son de pago y sus capacidades se orientan a diferentes aplicaciones prácticas. Algunos ejemplos se presentan a continuación.

- **MATLAB:** Se usa generalmente en análisis numéricos, procesamiento de señales y simulaciones basadas en modelos matemáticos. Es un paquete de pago, aunque ofrece licencias estudiantiles (The MathWorks Inc., 2025).
- **Minitab:** Es un software de pago que permite realizar análisis estadístico multivariado, estimaciones y predicciones. Es altamente utilizado en la industria para análisis de calidad utilizando la metodología Six Sigma (Minitab, 2025).
- **Stata:** Es un software de pago y se usa generalmente en investigaciones de tipo social, epidemiológica y biomédica. Permite realizar gráficos estadísticos y analizar datos usando *parallel processing* (StataCorp, 2025).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se detalla la metodología de investigación, los equipos y software de apoyo utilizados. Además, se describen las consideraciones tomadas durante la campaña experimental y el procesamiento de datos recopilados. La Figura 28 muestra el flujo de las principales actividades realizadas a lo largo de la investigación, y representa la estructura del capítulo.

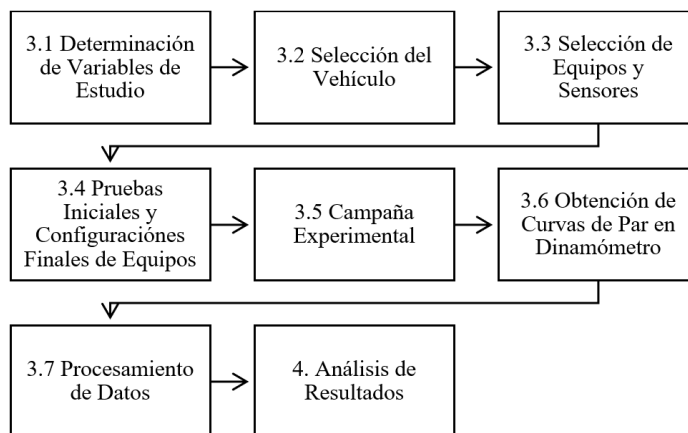


Figura 28. *Diagrama de flujo de actividades del proyecto de titulación*

(Autoría propia)

3.1 Determinación de Variables de Estudio

Para analizar el consumo de combustible de un vehículo en condiciones de tráfico real a diferentes altitudes, se seleccionaron variables de cuatro tipos: cinemáticas, modos de operación, rendimiento a nivel de vehículo y rendimiento a nivel de motor. Cada grupo de variables permitió analizar a fondo el desempeño del vehículo mediante un enfoque deductivo. A continuación, se describen dichas variables.

3.1.1 Variables Cinemáticas y Modos de Operación

Las variables cinemáticas se usaron para describir el movimiento y trayectoria del vehículo sin tomar en cuenta ninguna fuerza externa, ya sea que origine o se oponga a dicho movimiento. Dichas variables, junto con su unidad de medida, se detallan en la Tabla 3. Además, fue necesario que la frecuencia de muestreo sea de al menos 1 Hz para garantizar que las variaciones cinemáticas instantáneas queden registradas.

Tabla 3. *Variables cinemáticas del proyecto*

Variable	Unidad
Tiempo	s
Velocidad instantánea	m/s
Aceleración instantánea	m/s ²
Posición (longitud y latitud)	°
Altitud	msnm
Distancia recorrida (instantánea)	m
Pendiente relativa	%
Ganancia de Elevación Acumulada	m

(Autoría propia)

Por otro lado, para analizar el comportamiento del vehículo según el tramo recorrido, se definieron cuatro modos de operación basados en criterios de estudios previos (Tu et al., 2022) (Tabla 4). Estos modos dependieron de las variables cinemáticas seleccionadas y caracterizaron tres tipos de tramo: urbano, suburbano y carretera.

Tabla 4. *Modos de operación de vehículo*

Modo de Operación	Criterio
Ralentí	Velocidad nula, motor a revoluciones mínimas de operación.
Aceleración positiva	Aceleración mayor a 0,1 m/s ²
Aceleración negativa (desaceleración)	Aceleración menor a 0 m/s ²
Crucero	Velocidad mayor a 0 m/s; aceleración relativa mínima en el rango [-0,1; 0,1] m/s ²

(Tu et al., 2022)

3.1.2 Variables de Operación de Motor

Las variables de operación de motor se muestran en la Tabla 5. Estas permitieron calcular los parámetros de rendimiento a nivel de motor y vehículo, por lo que se consideran datos de entrada. Por otro lado, al igual que con las variables cinemáticas, los datos de operación de motor debían registrarse con una frecuencia de muestreo de al menos 1 Hz para captar sus variaciones instantáneas. Además, se agregaron otros datos de operación de motor que pueden ser útiles en investigaciones futuras.

Tabla 5. Variables de operación de motor

Variable	Unidad	Tipo
Régimen de giro de motor	rev/min	
Carga de motor (relativa)	%	
Flujo instantáneo de combustible	l/h	
Consumo máxico instantáneo de combustible	g/s	Datos de Entrada
Par efectivo estimado	Nm	
Potencia efectiva estimada	kW	
Potencia térmica estimada	kW	
Temperatura de refrigerante	°C	
Temperatura de aire de admisión	°C	Datos Adicionales
Presión de aire de admisión	psi	
Avance de encendido	°	

(Autoría propia)

3.1.3 Parámetros de Rendimiento a Nivel de Motor y Vehículo

Se establecieron dos niveles de enfoque para analizar la variación en el consumo de combustible: motor y vehículo. Los parámetros de cada nivel, mostrados en la Tabla 6, dependen de las variables de operación de motor, por lo que se consideran datos de salida. Los expresados en función de la distancia recorrida correspondieron al nivel de vehículo, mientras que los basados en la energía generada, al nivel de motor.

Tabla 6. Parámetros de rendimiento a nivel de motor y vehículo

Variable	Unidad	Tipo
Consumo Específico al Freno (BSFC)	g/kWh	
Eficiencia Térmica al Freno	%	
Tasa de consumo de combustible	g de combustible/s	
Factor de emisión de CO ₂ en función de energía	g de CO ₂ /kWh	Datos de Salida
Tasa de emisión de CO ₂	g de CO ₂ /s	
Factor de emisión en función de distancia	g de CO ₂ /km	
Factor de consumo en función de distancia	g de Combustible /km	
Consumo promedio de combustible	L/100km	

(Autoría propia)

3.2 Selección del Vehículo

3.2.1 Criterio de Selección

En el Ecuador, la venta de automóviles en el 2023 representó el 24,03% de las ventas totales de vehículos (AEADE, 2024). Por otro lado, desde años anteriores, el mercado de vehículos de origen chino ha crecido significativamente y llegó a ocupar el 40,8% de las importaciones de vehículos en el país. Asimismo, más de un cuarto del total de vehículos matriculados en el Ecuador son

automóviles (28,19%) y la mayoría de estos funcionan con gasolina (INEC, 2023), como lo muestra la Figura 29. Por ello, el vehículo seleccionado debía ser un automóvil, preferiblemente de origen chino, con especificaciones técnicas similares a las de la mayoría de los autos del parque automotor del Ecuador, es decir, con cilindrada de 1500 cm³, carrocería de tipo sedán y funcionamiento a gasolina de bajo octanaje.

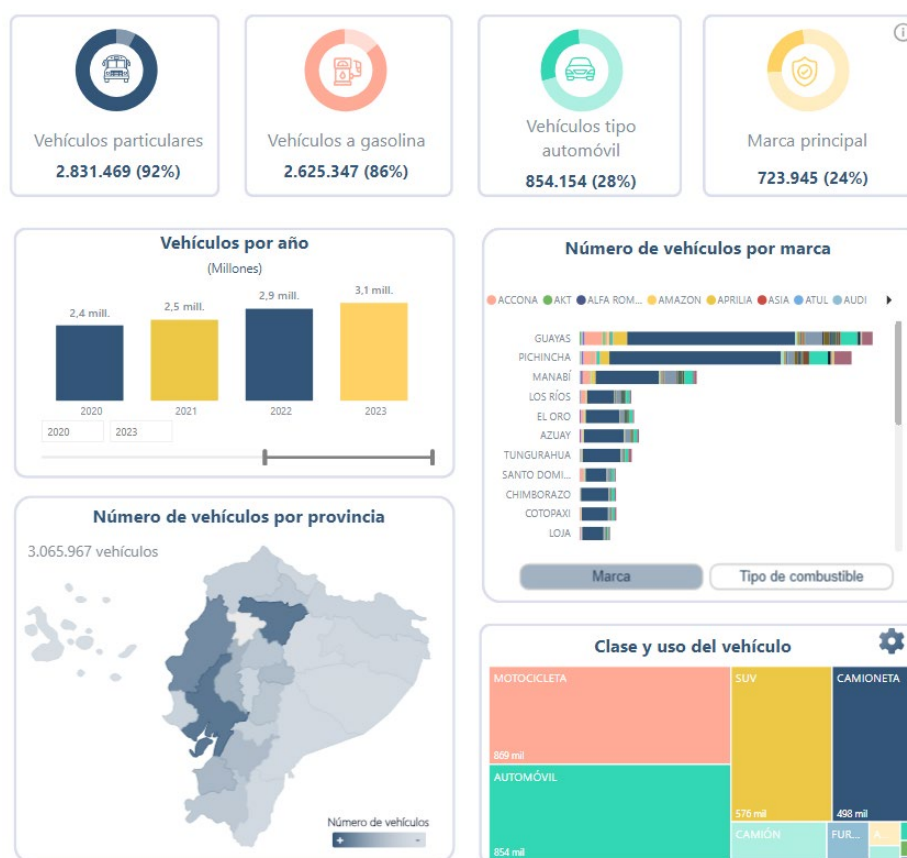


Figura 29. Estadísticas de vehículos matriculados en el Ecuador (2023)

(INEC, 2021)

3.2.2 Vehículo Seleccionado

El vehículo utilizado (Figura 30) fue un automóvil sedán, con un motor de cilindrada 1500 cm³ a gasolina e inyección indirecta multipunto. Contó con una transmisión manual de 5 velocidades y tracción delantera. Además, vehículo fue de marca asiática (Great Wall Motors) y cumplió con las regulaciones de homologación del país (Euro 3).



Figura 30. Vehículo utilizado en la campaña experimental

(Autoría propia)

Las características técnicas del vehículo se detallan en la Tabla 7. Es importante mencionar que este contó con apertura variable de válvulas y un régimen de giro óptimo por encima del generalmente usado en vehículos de su tipo. Por otro lado, el automóvil pasó la Revisión Técnica Vehicular justo antes de la realización de la campaña experimental, por lo que se encontraba en perfectas condiciones.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del vehículo utilizado

Dato	Descripción
Marca del vehículo	Great Wall
Modelo	C30 Confort
Tipo de carrocería	Sedán
Largo/Ancho/Alto	4,45 m /1,71 m/1,49 m
Distancia entre ejes	2,61 m
Año	2018
Motor	4 cilindros en línea, 4 tiempos
Tipo de combustible	Gasolina
Tipo de inyección de combustible	Inyección multipunto
Transmisión	Manual – 5 velocidades
Relación de compresión	10,5:1
Cilindrada	1497 cm ³
Potencia máxima indicada	78 kW @ 6000 rpm
Par máximo indicado	138 Nm @ (4000 – 5500) rpm
Consumo de gasolina indicado	7,30 L/100km
Tara	1160 kg
Peso Bruto Vehicular (PBV)	1535 kg

(GWM, 2018)

3.3 Selección de Equipos y Sensores

La selección de equipos debía garantizar el registro de las variables cinemáticas del vehículo y las variables de operación de motor seleccionadas. Además, la medición física de consumo de combustible era necesaria para que el análisis de los resultados de la investigación no se base únicamente en estimaciones.

Además, los equipos registradores de datos y sensores debían cumplir con características específicas: registrar las variables de estudio seleccionadas con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, ser fácilmente configurables, operar con un voltaje de 12 V o a través del puerto OBD – II del vehículo durante al menos una hora y de forma sincronizada e instalarse de manera no intrusiva en el vehículo.

En función de estos criterios, se seleccionaron dos registradores de datos y tres sensores para realizar las pruebas iniciales y la campaña experimental. Los registradores elegidos fueron el ELM327 y el CANEdge2, mientras que los sensores, conectados a CANEdge2 mediante una red CAN, fueron dos flujómetros de combustible DFM ACAN 100 y una antena de posicionamiento GNSS con su respectivo módulo (CANMod.gps). Además, debido a un cambio en la metodología inicial (descrito en la sección 3.4.2.2), se utilizó un dinamómetro Vamag BPA – V2R después de la campaña experimental.

Por otro lado, la integración de los sensores a la red CAN proporcionada por CANEdge2 requirió el uso de dos cables de conexión especiales: uno de comunicación común para los flujómetros y un cable serial RS232 para enviar la información de consumo de combustible hacia CANEdge2. Además, puesto que CANEdge2 y ELM327 obtienen su voltaje de alimentación del puerto OBD – II, se utilizó un conector en “Y” para este último. En la Tabla 8 se presenta un resumen de los equipos utilizados, mientras que en las siguientes secciones se presentan los detalles de cada uno de ellos.

Tabla 8. *Equipos utilizados y su función*

Tipo de Variable	Equipo	Función
Variables cinemáticas	Registrador CANEdge2	Registrar datos provenientes de la red CAN con frecuencia de 1 Hz
	CANMod.gps + antena GNSS	Obtener datos de posición e inerciales del vehículo en tiempo real y enviarlos la red CAN
Variables de operación de motor	Registrador ELM327 + Torque Pro	Registrar datos provenientes de OBD – II
	Conector en “Y” para puerto OBD – II	Compartir alimentación de voltaje para CANEdge2 y ELM327 desde puerto OBD – II
	Dinamómetro Vamag BPA V2R	Obtener curvas de par y potencia efectivas a plena carga

(Continúa)

Variables de operación de motor (medición física)	Flujómetros DFM ACAN 100	Medir físicamente el flujo de combustible en las líneas del vehículo de prueba
	Cable de conexión común	Conectar flujómetros DFM ACAN 100 en paralelo
	Cable RS232	Enviar los datos de consumo de combustible proveídos por los flujómetros a la red CAN

(Autoría propia)

3.3.1 Registrador de Datos CANEdge2

CANEdge2 (Figura 31) es un registrador de datos que permitió grabar información de los sensores mediante una red CAN y almacenarla en una memoria externa para su posterior procesamiento. El dispositivo es compatible con software libre e interoperable con bases de datos de decodificación de libre acceso. Además, su diseño compacto y velocidad de reloj interno de $50 \mu\text{s}$ permitió su aplicación en el vehículo sin pérdidas de información.



Figura 31. Registrador de datos CANEdge2

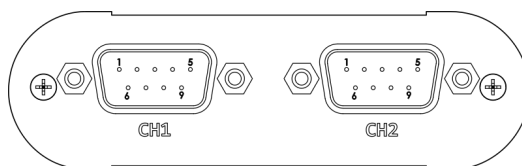
(CSS Electronics, 2024a)

Las características técnicas relevantes para el estudio se presentan en la Tabla 9. Entre ellas, los dos canales de conexión permitieron integrar dos redes CAN en una sola. Además, al soportar identificadores de datos tanto de 11 y 29 bits se logró registrar los mensajes enviados por los flujómetros y la antena GNSS para luego extraerlos de su tarjeta microSD industrial. El estándar de funcionamiento de hasta 1 Mbit/s fue suficiente para integrarlo con la tasa de bits de CANMod.gps (500 kbit/s) y los flujómetros DFM ACAN 100 (250 kbit/s).

Tabla 9. Características técnicas de CANEdge2

Característica	Descripción
Canales de conexión	2 Canales CAN con soporte CAN – FD
Estándares de funcionamiento	ISO 11898 (hasta 1 Mbit/s) y Bosch CAN FD (hasta 4 Mbit/s)
Protocolos	Grabación de datos en todos los protocolos basados en CAN
Identificadores de datos soportados	ID de 11 y 29 bits
Tarjeta SD	Compatibilidad para microSD de tipo industrial de hasta 32 GB. Lectura a 80 MB/s
Reloj de tiempo real	RTC de resolución de hasta 50 microsegundos
Formato de grabación de archivos	Estándar industrial binario (MF4)
Alimentación eléctrica	De +7V hasta +32V DC a través del canal 1 con protección de inversión de voltaje
Consumo de energía	Aproximadamente 1 W

Por otro lado, fue necesario conocer la disposición de pines de los dos canales disponibles en el equipo de recolección de datos para integrar los sensores mediante la red CAN del dispositivo. Dicha disposición al igual que la descripción de cada uno de ellos se presentan en la Figura 32 y en la Tabla 10 respectivamente.

**Figura 32.** Disposición de pines de CANEdge2

(CSS Electronics, 2024a)

Tabla 10. Descripción de pines de CANEdge2

Pin #	Canal 1 (CH1)	Canal 2 (CH2)
1	NA	Salida de voltaje (5V)
2	CAN 1 L	CAN 2 L
3	GND	GND
4	LIN Data 1	LIN Data 2
5	NA	NA
6	GND (Opcional)	GND (Opcional)
7	CAN 1 H	CAN 2 H
8	NA	NA
9	Alimentación y VBAT de LIN1	VBAT de LIN 2

(CSS Electronics, 2024a)

3.3.2 Registrador de Datos ELM327

El registrador de datos ELM327 (Figura 33) se conectó al módulo de control electrónico (ECU) del vehículo a través del conector OBD – II y permitió acceder a datos de operación de motor mediante una aplicación de terceros de conexión inalámbrica (Torque Pro). ELM327 soporta todos los protocolos de transmisión de datos utilizados en la conexión mediante OBD – II tales como SAE J1850 PWM, SAE J1850 VPW, ISO 9141 – 2, ISO 14230 – 4 KWP, ISO 15765 – 4 CAN y SAE J1939.



Figura 33. Registrador de datos ELM327

(Autoría propia)

3.3.3 Flujoímetro de Combustible DFM ACAN 100

El flujoímetro de combustible DFM ACAN 100 (Figura 34) permitió la medición de consumo de combustible en las líneas de suministro y retorno del hidrocarburo del vehículo. El sensor puede utilizarse para fluidos como diésel, aceite caliente o cualquier combustible con una viscosidad cinemática de 1,5 a 6 mm²/s.



Figura 34. Flujoímetro de combustible DFM ACAN 100

(Technoton, 2024)

Por otro lado, el dispositivo tiene la capacidad de usarse como parte de un sistema de monitoreo telemático (mediante el dispositivo CANUp, proveído por el fabricante Technoton) o de forma autónoma al conectarse a una red transmisión de datos, siendo este último el caso de aplicación en esta investigación. Las características técnicas principales de los flujoímetros utilizados durante la campaña experimental se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11. Características técnicas del flujómetro DFM ACAN 100

Característica	Descripción
Fabricante	Technoton
Modelo	DFM ACAN 100
Rango de viscosidad cinemática del líquido medido	1,5 – 6,0 mm ² /s
Flujo de combustible mínimo	0,5 l/h
Flujo de combustible máximo	100 l/h
Error relativo de medición	No más de 1%
Presión máxima de trabajo	25 bares
Modo de alimentación eléctrica	Combinada: externa (desde el vehículo) e interna (menos de 10 V con batería incorporada)
Protocolos de transmisión de datos	J1939 y NMEA 2000
Velocidad de intercambio de datos en kbit/s	100, 125, 250, 500 y 1000

(Technoton, 2024)

3.3.4 Módulo de Posicionamiento Satelital CANMod.gps con Sensor Inercial 3D

CANMod.gps, mostrado en la Figura 35, permitió grabar datos de posición obtenidos mediante su antena GNSS y, además, registrar información inercial gracias a su giroscopio y acelerómetro integrados. El dispositivo puede conectarse a cualquier bus de datos de protocolo CAN. Sin embargo, está específicamente diseñado para trabajar en conjunto con CANEdge2. Las características principales de este equipo se presentan en la Tabla 12.

**Figura 35.** Módulo de Posicionamiento Satelital CANMod.gps con Sensor Inercial 3D

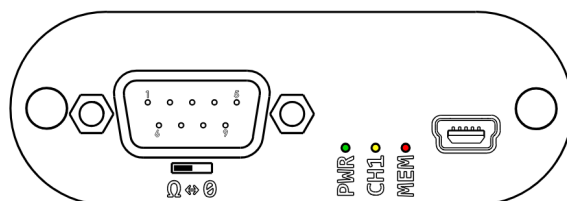
(CSS Electronics, 2024b)

Tabla 12. *Características técnicas de CANMod.gps*

Característica	Descripción
Sistema GNSS soportado	Combinaciones de GPS, Galileo, BeiDou y GLONASS
Precisión	Posición: 2,5 m Inclinación: 1 grado Velocidad: 0,05 m/s
Principales datos proporcionados	Posición, tiempo, velocidad, altitud, orientación y distancia proveídos por GNSS.
Canales	1 canal CAN
Estándar de funcionamiento	ISO 11898 de hasta 1 Mbit/s
Tasa de bits	Seleccionable desde 5K hasta 1M con posibilidad de bits personalizados
Frecuencia de muestreo	Desde 1 Hz hasta 10 Hz (dependiendo de la característica)
Alimentación eléctrica	Desde +5 V hasta +24 V a través de conexiones de pin 1 o 9 con protección de inversión de voltaje
Consumo energético	Aproximadamente 1 W

(CSS Electronics, 2024b)

La creación de un cable de conexión específico para integrar este sensor con CANEdge2 no fue necesaria. Esto debido a que su diseño permitió la conexión directa al registrador de datos mediante el cable de transmisión proveído por el fabricante. Sin embargo, la disposición y descripción de sus pines de conexión se muestran en la Figura 36 y en la Tabla 13. respectivamente como referencia.

**Figura 36.** *Disposición de pines de CANMod.gps*

(CSS Electronics, 2024b)

Tabla 13. *Descripción de pines de CANMod.gps*

Pin #	Conector DB9
1	Alimentación (5 V)
2	CAN 1 L
3	GND
4	NA
5	NA
6	GND (Opcional)
7	CAN 1 H
8	NA
9	Alimentación (5 – 24 V)

3.3.5 Cables de Conexión Especiales

3.3.5.1 Cable Común para Flujómetros DFM ACAN 100

El cable de conexión común (Figura 37) se creó a partir de los cables proveídos por el fabricante Technoton con el fin de integrarlos a la red CAN de CANEdge2. Con él, se comunicó los flujómetros entre sí y se suministró un voltaje de 12 V a ambos equipos. Además, se agregaron tres puertos de conexión: conexión a computador mediante K – Line, conexión a red CAN y conexión a CANUp mediante sistema S6.

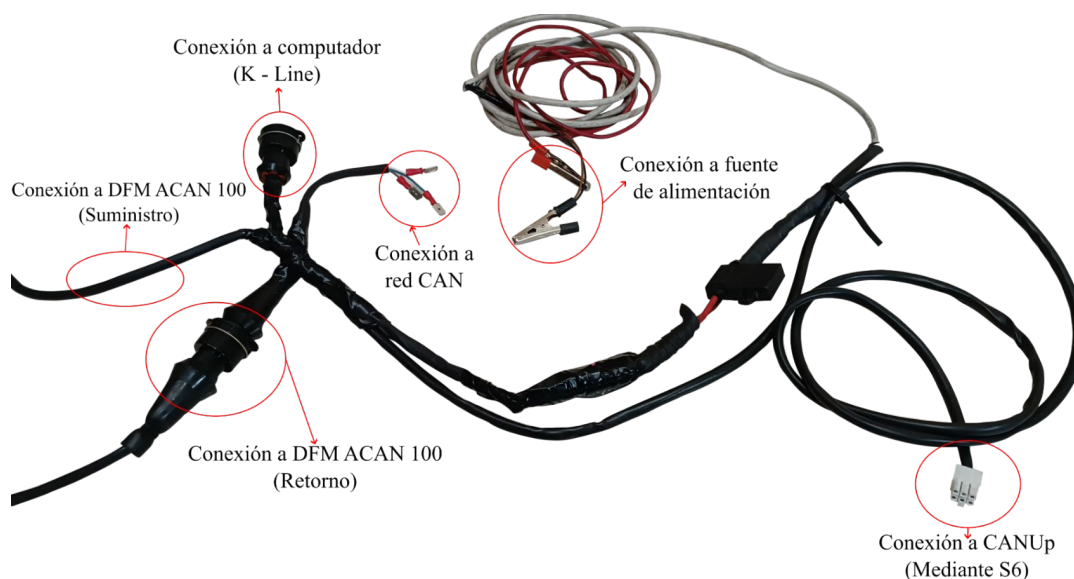


Figura 37. Cable de conexión común

(Autoría propia)

3.3.5.2 Cable de Conexión Serial RS232

Para comunicar los flujómetros con CANEdge2 y obtener los *databytes* de consumo de combustible a través de la red CAN se creó un cable de conexión serial RS232 o DB9 (Figura 38). Los terminales del cable correspondientes a CAN H, CAN L y GND se conectaron según lo mostrado en la Figura 38. Así, después de verificar que la resistencia en serie entre CAN H y CAN L era de 120 ohmios al conectarse a los dos flujómetros, se conectó la cabeza del terminal al Canal 2 de CANEdge2.



Figura 38. *Cable serial RS232*

(Autoría propia)

3.3.5.3 Conector en “Y” para Puerto OBD – II

El conector en “Y” o *splitter* para el puerto OBD – II, mostrado en la Figura 39, facilitó la conexión de los dos registradores de datos en paralelo. Con ello, se consiguió que la alimentación de voltaje de 12 V proveída por el conector pueda compartirse entre los registradores ELM327 y CANEdge2. Además, el conector en “Y” permitió que el ELM327 se conectase al computador del vehículo sin la necesidad de realizar conexiones invasivas.



Figura 39. *Conector en “Y” o splitter para puerto OBD – II*

(Autoría propia)

3.3.6 Dinamómetro Vamag BPA – V2R

El dinamómetro inercial Vamag BPA – V2R, mostrado en la Figura 40, permitió obtener curvas de par y potencia a plena carga, tanto de forma gráfica como punto a punto, en función de las revoluciones del motor. Además, el software propio del equipo permitió corregir la potencia y par medidos en las ruedas del vehículo a los valores a la salida del cigüeñal del motor.

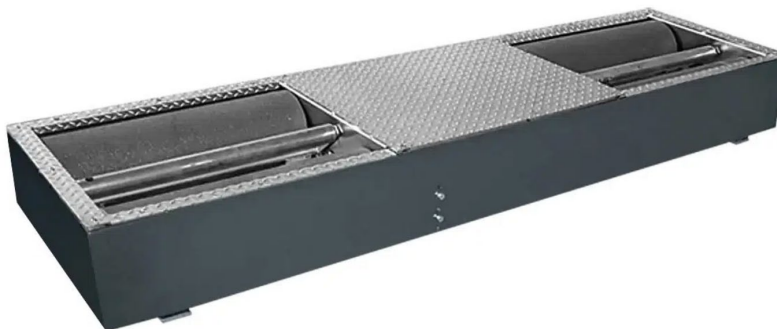


Figura 40. *Dinamómetro inercial Vamag BPA – V2R*

(Vamag, 2025)

El dinamómetro se encuentra ubicado en las instalaciones de la Universidad Técnica del Norte. Estas contaron con las medidas de seguridad y control necesarias para llevar a cabo los ensayos con el vehículo utilizado en la campaña experimental. Por otro lado, las características técnicas de este se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14. *Características técnicas de dinamómetro Vamag BPA – V2R*

Característica	Descripción
Fabricante	Vamag – Tecniche di Collaudo
Modelo	BPA – V2R
Voltaje de alimentación	220 – 400 V AC / 50 – 60 Hz
Corriente Indicada	16 A
Masa	1200 kg
Dimensiones	3070 x 870 x 310 mm
Presión de circuito de aire comprimido	6 bares
Diámetro de rodillo	240 mm
Ancho de rodillo	660 mm
Velocidad máxima de vehículo de prueba	180 km/h

(Vamag, 2025)

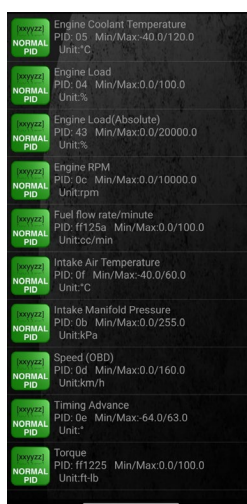
3.4 Pruebas Iniciales y Configuraciones Finales de Equipos

Durante las pruebas iniciales se verificó la conexión de los equipos y su correcta transmisión de datos, al igual que su capacidad de sincronización. Luego, se validaron los datos recolectados en recorridos de prueba. Este paso previo fue fundamental para establecer el protocolo de registro de datos durante la campaña experimental y el posterior procesamiento de datos.

Al terminar las pruebas iniciales, las configuraciones e instalación finales de los equipos fueron establecidas y se garantizó el funcionamiento óptimo de estos bajo las condiciones específicas de explotación. A continuación, se presentan las pruebas de comunicación OBD – II, las pruebas de comunicación CAN y las configuraciones finales de los equipos.

3.4.1 Pruebas de Comunicación OBD – II: ELM327 y Torque Pro

En primer lugar, se determinaron los datos de operación de motor que el recolector ELM327 fue capaz de registrar adecuadamente a través de Torque Pro (Figura 41). Con ello, se configuró la aplicación y se validaron los datos obtenidos después de pruebas en ruta. Esto último determinó un cambio en la metodología inicial de procesamiento de datos. Tanto la configuración como el cambio en la metodología inicial en cuanto a parámetros obtenidos a través de OBD – II se explican a continuación.



Engine Coolant Temperature PID: 05 Min/Max:-40.0/120.0 Unit:°C
Engine Load PID: 04 Min/Max:0.0/100.0 Unit:%
Engine Load(Absolute) PID: 43 Min/Max:0.0/20000.0 Unit:%
Engine RPM PID: 0c Min/Max:0.0/10000.0 Unit:rpm
Fuel flow rate/minute PID: ff125a Min/Max:0.0/100.0 Unit:cc/min
Intake Air Temperature PID: 0f Min/Max:-40.0/60.0 Unit:°C
Intake Manifold Pressure PID: 0b Min/Max:0.0/255.0 Unit:kPa
Speed (OBD) PID: 0d Min/Max:0.0/160.0 Unit:km/h
Timing Advance PID: 0e Min/Max:-64.0/63.0 Unit:°
Torque PID: ff1225 Min/Max:0.0/100.0 Unit:ft-lb

Figura 41. Datos de operación capaces de registrarse adecuadamente

(Autoría propia)

3.4.1.1 Configuración de Torque Pro

La aplicación para dispositivos Android que permitió la recolección de datos de operación del motor al conectarse por medio de Bluetooth a la interfaz ELM327 fue Torque Pro (Figura 42). Se utilizó su versión de pago y se creó un perfil de vehículo con las características del vehículo ocupado durante la campaña experimental.

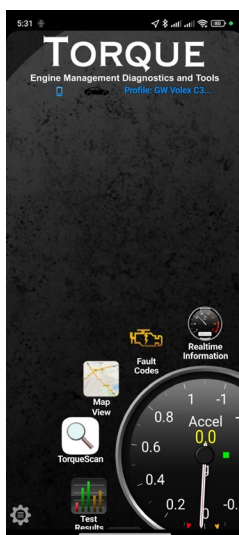


Figura 42. *Interfaz de Torque Pro*

(Autoría propia)

Por otro lado, se incluyeron los ID estándar del protocolo OBD – II para la recolección de datos de operación de motor, mostrados en la Tabla 15. Además, se fijó la frecuencia de muestreo en 1 Hz (aunque se permiten intervalos más cortos) y las unidades de medida en el sistema internacional.

Tabla 15. *ID estándar de datos recolectados a través de ELM327 y Torque Pro*

Parámetro	ID (Estándar)
Engine RPM	0C
Speed (OBD)	0D
Torque	62
Engine Load	04
Engine Coolant Temperature	05
Fuel Flow Rate	ff15a
Intake Air Temperature	0f
Intake Manifold Pressure	0b
Timing Advance	0e

(SAE International, 2017)

3.4.1.2 Cambio en Metodología Inicial: Datos de Par y Potencia Efectivos

Al sincronizar y evaluar los registros de operación de motor registrados a través del ELM327, se observó que los datos de potencia y par efectivos no eran coherentes, a pesar de derivarse de la carga de motor y la potencia o par máximos indicados. Esto, debido a que la carga de motor registrada hacía referencia al par máximo disponible a un régimen dado, tal y como lo indica la norma SAE J1979 (SAE International, 2017). Por ello, se necesitó un dinamómetro para obtener las curvas de par y potencia máximas efectivas para que el procesamiento de datos sea válido. Por ello, se añadieron los ensayos en dinamómetro después de la campaña experimental descritos en la sección 3.6

3.4.2 Pruebas de Comunicación CAN: CANEdge2, CANMod.gps y Flujómetros de Combustible

Durante las pruebas de comunicación CAN se evaluó el funcionamiento del registrador CANEdge2, la antena GNSS junto con su módulo y los flujómetros de combustible DFM ACAN 100 al ser integrados en una misma red. Además, se cambió la metodología inicial en cuanto a medición de consumo de combustible se refiere. A continuación, se describen las pruebas de comunicación, el cambio de metodología planteado, la configuración de los equipos y la instalación física de estos.

3.4.2.1 Descripción de Pruebas de Comunicación CAN

Inicialmente, el vehículo de prueba permaneció inmóvil, funcionando ya sea a ralentí o con aceleraciones sostenidas. Durante este período, se visualizó y comprobó la conexión entre flujómetros, al igual que los datos enviados por ellos hacia el registrador CANEdge2. Para ello, se usó un equipo auxiliar conectado a un computador: CAN BUS Analyzer, de la compañía Microchip (Figura 43).



Figura 43. *CAN BUS Analyzer utilizado durante las pruebas iniciales*

(Autoría propia)

El equipo CAN BUS Analyzer permitió acceder a la red CAN por la que viajaron los datos de los flujómetros y verificar los valores de medición en tiempo real mediante su aplicación para Windows. Para que la aplicación muestre los datos recibidos se estableció la tasa de bits (*bitrate*) de los flujómetros, que es de 250 kB/s, y el modo de red CAN a sólo lectura (Figura 44).

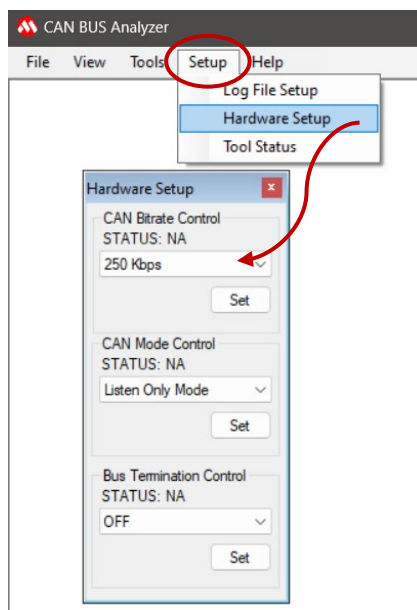


Figura 44. *Configuración de aplicación de CAN BUS Analyzer*

(Autoría propia)

En la Figura 45 se muestra una captura de pantalla de los valores en tiempo real de una de las pruebas iniciales en funcionamiento a ralentí. Estos valores se encuentran en base decimal, por lo que posteriormente, con la ayuda del manual de instrucciones de DFM, se obtuvo el valor de consumo que representaban y se verificó el funcionamiento de ambos sensores.

TRACE	ID	DLC	DATA 0	DATA 1	DATA 2	DATA 3	DATA 4	DATA 5	DATA 6	DATA 7	TIME STAMP (sec)	TIME DELTA (sec)	COUNTER
RX	0x18F68970x	8	53	0	6	0	193	147	12	0	393,7322	1,039	271
RX	0x18F6856Fx	8	175	24	1	0	169	8	0	0	393,7952	1,000	271
RX	0x18F81B6Fx	8	255	255	255	255	0	0	255	255	394,1952	1,000	273
RX	0x18FD096Fx	8	255	255	255	255	177	40	0	0	394,2352	1,000	274
RX	0x18F81470x	8	59	230	9	0	100	7	255	255	394,1312	1,018	272
RX	0x18F69170x	8	0	0	0	0	0	0	0	0	394,1712	1,038	270
RX	0x18F6876Fx	8	0	0	0	0	0	0	0	0	394,2952	1,040	271
RX	0x18FEEE70x	8	255	59	255	255	255	255	255	255	394,4512	1,058	271
RX	0x18F68D6Fx	8	0	0	0	0	0	0	0	0	394,5342	0,999	273
RX	0x18FD0970x	8	255	255	255	255	120	228	8	0	394,6312	1,039	272
RX	0x18F60B70x	8	32	1	253	143	102	22	0	255	394,4712	1,039	271
RX	0x18F81B70x	8	255	255	255	255	0	0	255	255	393,9722	1,019	269
RX	0x18FE4D6Fx	5	51	7	255	255	255				393,7752	1,000	273
RX	0x18F68E6Fx	8	0	0	0	0	0	0	0	0	393,8952	1,020	270
RX	0x18F68F6Fx	8	0	0	0	0	0	0	0	0	393,9342	1,039	272

Figura 45. Datos en tiempo real de la red CAN obtenidos a través de CAN BUS Analyzer

(Autoría propia)

Además, durante las pruebas en ruta se registraron datos de posición e inerciales proporcionados por CANMod.gps y se revisó el funcionamiento adecuado de los equipos de manera autónoma. Esto último al verificar características como: continuidad de registro y coherencia de datos, operación satisfactoria de los sensores bajo carga, estanqueidad de las líneas de combustible y sincronización exitosa entre datos obtenidos mediante ELM327 y CANEdge2.

3.4.2.2 Cambios en Metodología Inicial: Medición Física de Flujo de Combustible

Las pruebas iniciales de comunicación CAN permitieron determinar cambios en la metodología de recolección de datos. Inicialmente, se pensó en utilizar un solo flujómetro para medir el consumo de combustible. No obstante, esto requería alterar la configuración de líneas de combustible del vehículo al evitar que la línea de retorno del carburante se conectase directamente al tanque de combustible. Por ello, se prefirió una configuración de medición del tipo diferencial, comparando el flujo de suministro con el de retorno. Es decir, se usó un flujómetro por cada línea de combustible. Esta disposición de sensores se explica más adelante.

Es importante mencionar que, para lograr la medición del tipo diferencial también pudo optarse por usar un flujómetro de dos cámaras. Sin embargo, la disponibilidad de tal equipo fue limitada, por lo que la opción fue descartada.

3.4.2.3 Configuración de CANEdge2 + CANMod.gps

La configuración del dispositivo CANEdge2 junto con CANMod.gps se realizó siguiendo lo especificado en el manual de instrucciones y la interfaz gráfica de configuración proveídos por CSS Electronics (Figura 46). Se partió del archivo de configuración base proveída por el fabricante y se configuraron dos canales de red CAN que trabajaron sincronizados: uno para CANMod.gps y alimentación a través de OBD y otro para los flujómetros de combustible. El código grabado en el archivo Config-01.07.json se encuentra en el Anexo 1.

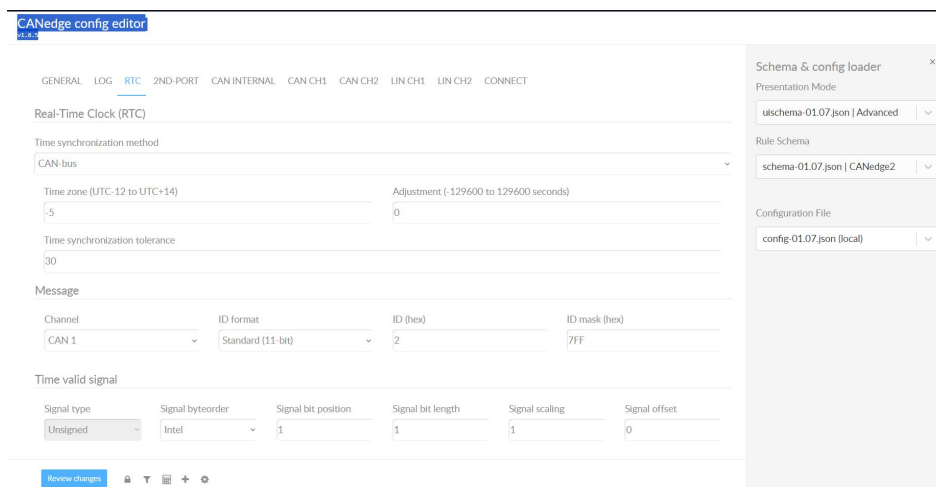


Figura 46. Interfaz de CANEdge config editor para CANEdge2

(Autoría propia)

En la pestaña *LOG*, los parámetros se mantuvieron de fábrica, por lo que el tamaño máximo de cada registro de datos es de 50 MB, la compresión de los datos está deshabilitada y el ciclado de registros habilitado.

En la pestaña *RTC (Real – Time – Clock)*, siguiendo los pasos propuestos por la documentación de CANMod.gps para obtener datos de tiempo precisos a partir de GNSS, se seleccionó el tipo de sincronización CAN – bus. La zona horaria se ajustó a UTC -5, correspondiente a la del Ecuador y el ajuste fino en segundos se mantuvo en el valor de fábrica (0 segundos). Generalmente, en el apartado *Channel* de la pestaña *RTC* se selecciona el segundo canal de CANEdge2. Sin embargo,

este fue utilizado para leer el segundo bus de datos CAN correspondiente a los flujómetros DFM ACAN 100. Por ello, en *Channel* se selecciona CAN 1. Las demás configuraciones se dejan por defecto. En los apartados *Time valid signal* y *Time value signal*, se utilizaron los datos propuestos por el manual de instrucciones de CANEdge2 mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16. Configuración de *Time valid signal* y *Time value signal*

Parámetro	Time valid signal	Time value signal
Signal byteorder	Intel	Intel
Signal bit position	1	8
Signal bit length	1	40
Signal scaling	1	0,001
Signal offset	0	1577840400

(CSS Electronics, 2024a)

En las pestañas *2ND – PORT* y *CAN INTERNAL* se utilizaron las configuraciones por defecto, ya que el pin de 5V del segundo canal de CANEdge2 no fue utilizado y no se establecieron disparadores para el inicio y final de la recolección de datos.

En la pestaña *CAN CH* se habilitó la recepción (rx) y transmisión (tx) de datos al encender el dispositivo. Debido al funcionamiento normal de obtención de datos a partir del conector OBD – II, el modo de comunicación se estableció como Normal y la tasa de bits en 500 Kbit/s con configuración Bit – rate (simple). En el apartado *Transmit messages* no se agregó ningún PID puesto que CANEdge2 no es capaz de transmitir y recibir mensajes cuando el protocolo de comunicación OBD – II es distinto al protocolo SAE J15765 – 4 CAN. En el caso del vehículo utilizado, el protocolo de comunicación es el ISO 14230 – 4 KWP.

En la pestaña *CAN CH2* los apartados *General* y *Physical* fueron idénticos a los de *CAN CH 1*, a diferencia de la tasa de bits, que fue de 250 K, misma que corresponde a la tasa de comunicación de los flujómetros mediante protocolo J1939. La demás configuración fue dejada por defecto.

Las características disponibles en las pestañas *LIN CH1*, *LIN CH2* y *CONNECT* no fueron utilizadas.

3.4.2.4 Configuración de Módulo CANMod.gps con Sensor Inercial 3D

La configuración cargada en el módulo de posición, encontrada el Anexo 2, tiene dos apartados importantes para la investigación en cuestión: la tasa de bits utilizada y la activación de la fusión de sensores. La primera permitió conectar el módulo de CANMod.gps en paralelo con CANEdge2,

mientras que la segunda permitió obtener datos de posición más precisos incluso cuando la señal GNSS no estuviese disponible. Para configurar ambos apartados, se utilizó la misma interfaz gráfica proveída por CSS Electronics, mostrada en la Figura 47.

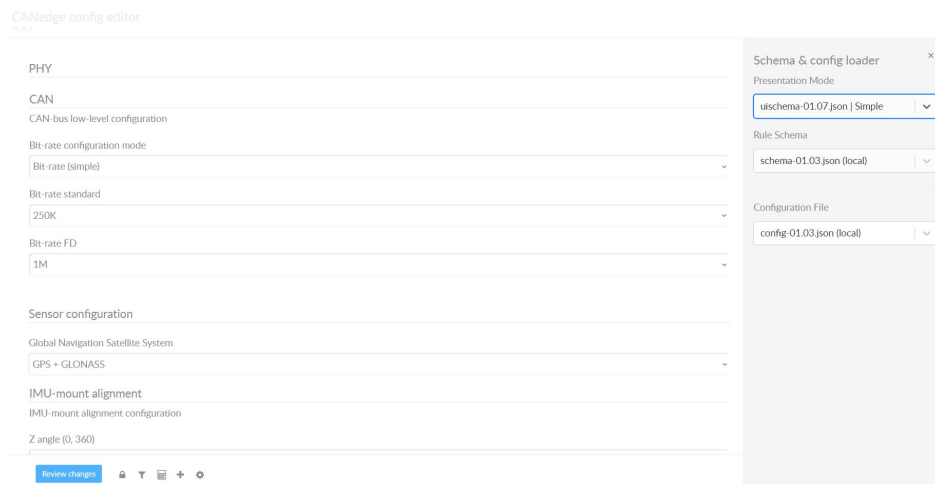


Figura 47. Interfaz de CANEdge config editor para CANMod.gps

(Autoría propia)

La tasa de bits se configuró en 500 kbit/s. Así, el módulo actuó como receptor de posición por medio de GNSS y como actualizador del RTC de CANEdge2 al haberse conectado en el CH 1.

Por otro lado, para la activación de fusión de sensores, fue necesario medir la distancia de ubicación de la antena GNSS y del módulo CANMod.gps con respecto a un punto de referencia del modelo dinámico proveído por la documentación CSS Electronics (Figura 48). Las distancias medidas se encuentran en la Tabla 17.

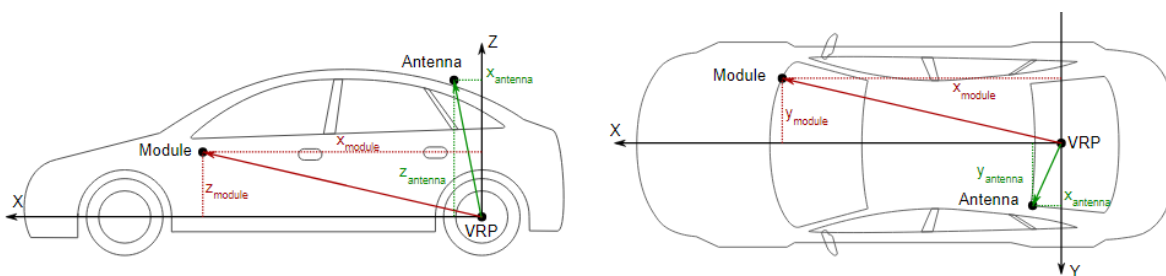


Figura 48. Modelo dinámico automotriz configurado en CANMod.gps

(CSS Electronics, 2024b)

Tabla 17. Distancias con respecto al punto de referencia del modelo dinámico

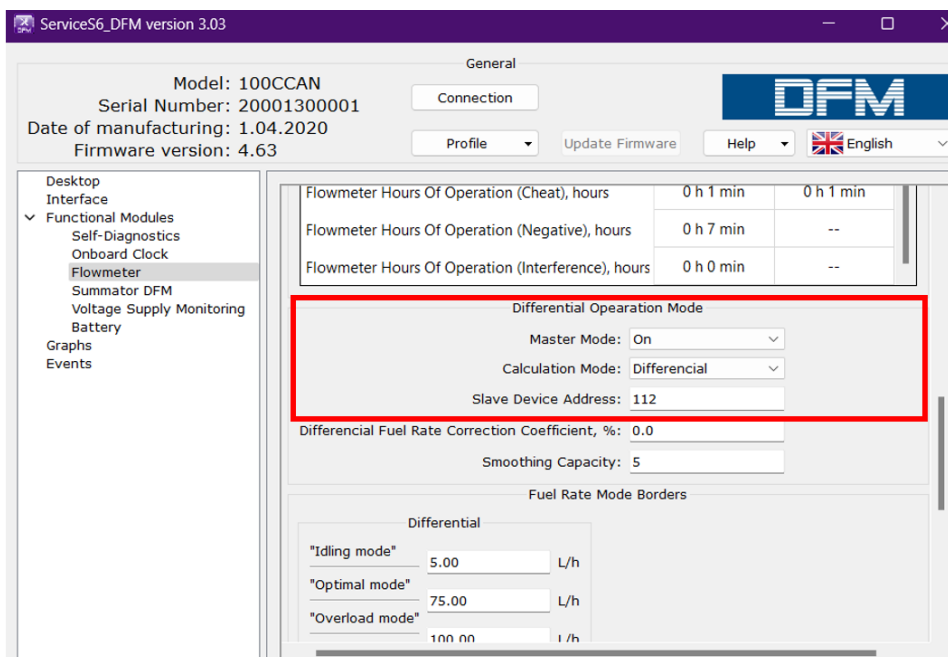
Parámetro	Distancia (cm)
x – módulo	196
y – módulo	0
z – módulo	44
x – antena	51
y – antena	0
z – antena	16

(Autoría propia)

3.4.2.5 Configuración Informática de los Fluómetros

La configuración de los flujómetros en modo de operación diferencial se hizo con la ayuda de un conector S6 que permite la comunicación de la red de flujómetros con un computador a través de la red digital K – Line (ISO 14230).

Mediante la aplicación Service S6 DFM proveída por Technoton, se configuró el modo de operación diferencial y las direcciones S6 de cada uno de los flujómetros (Figura 49). La dirección del flujómetro de suministro (*Master*) fue la 112, mientras que la de retorno (*Slave*), 113. Ello se configuró en el apartado *Functional Modules – Flowmeter*.

**Figura 49.** Interfaz de aplicación Service S6 DFM con modos de operación y direcciones S6

(Autoría propia)

3.4.2.6 Integración de Fluómetros en la Red CAN

Para sincronizar los datos cinemáticos obtenidos por CANMod.gps con los de consumo de combustible, se utilizó el protocolo SAE J1939 en los flujómetros. Esta es la configuración por defecto de los flujómetros. Con ello, al usar la red CAN, los *databytes* de los dos canales de CANEdge2 se registraron de manera sincronizada. Además, como se muestra en la (Figura 50), los datos de consumo de combustible enviados por el flujómetro se hacen cada 1000 ms (1 Hz), por lo que no fue necesaria una configuración adicional en cuanto a la frecuencia de muestreo se refiere.

Número del campo	Longitud	Parámetro	Nombre	Reglamento de envío
Flowmeter. Parameters PGN 62981 (0xF605)				1000 ms
1	2 bytes	SPN 183	Engine fuel rate	
3.1	4 bits	SPN 521181	Engine mode by fuel rate	
4	2 bytes	SPN 521027 /18.0	Chamber fuel rate. Feed chamber	
6	2 bytes	SPN 521027 /18.1	Chamber fuel rate. Reverse chamber	
8.1	4 bits	SPN 521028 /18.0	Chamber working mode. Feed chamber	
8.5	4 bits	SPN 521028 /18.1	Chamber working mode. Reverse chamber	

Figura 50. PGN de flujómetro con reglamento de envío respectivo
(DFM)

Es importante tener en cuenta que todos los parámetros proveídos por la configuración diferencial de flujómetros se envían en paquetes, llamados Parameter Group Number (PGN). Cada paquete contiene dentro de sí los datos de señal o datos físicos sin decodificar proveídos por los flujómetros. Cada dato de señal o dato físico tiene un identificador conocido como Suspect Parameter Number (SPN) y tanto su descripción como su ecuación de decodificación se obtuvo de la base de datos S6 de Technoton (Figura 51) (Technoton, 2025). Para futuros trabajos, se puede acceder a la plataforma con el nombre de usuario *daniel_arias_c* y contraseña *Daniel10T.21* y consultar los PGN y SPN necesarios.

Figura 51. *Interfaz de Technoton S7 Database*

(Technoton, 2025)

3.4.2.7 Instalación Física de los Fluómetros DFM ACAN 100

Los flujómetros se instalaron según el esquema “Diferencial – De presión” mostrado en el manual de funcionamiento de Technoton, fabricante de los sensores (Figura 52). En este caso, se utilizaron dos flujómetros con operación paralela en las líneas de suministro y retorno de combustible. El flujómetro de la línea de suministro se ubicó después de la bomba de combustible de baja presión precedido de un filtro de partículas. El flujómetro de retorno se instaló entre el riel y la entrada al tanque de combustible. Así, el flujo total de combustible correspondió a la diferencia entre el flujo de suministro y el flujo de retorno.

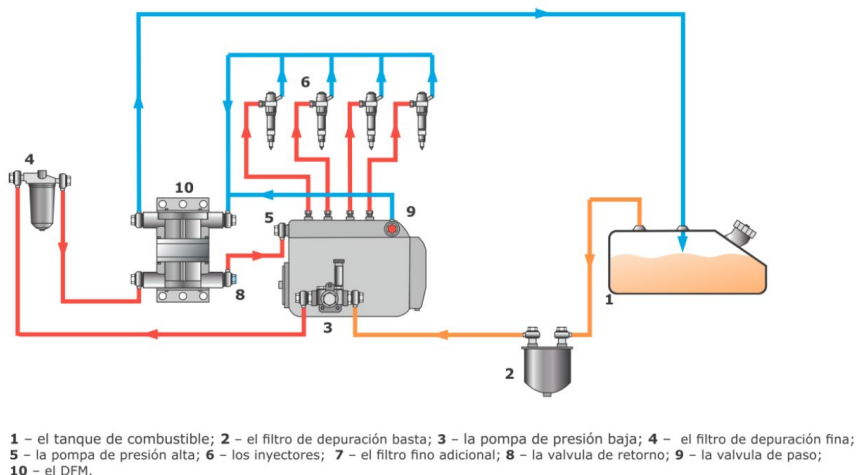


Figura 52. *Esquema de instalación “Diferencial – De presión”*

(Technoton, 2024)

Los dos flujómetros utilizados en el estudio se fijaron a la carrocería del vehículo mediante pernos. El lugar de instalación fue a la salida del conjunto de bomba eléctrica, ubicado debajo del asiento de pasajeros como se muestra en la Figura 53. Tal instalación facilitó el acceso a las líneas de combustible sin afectar la configuración de fábrica del vehículo.

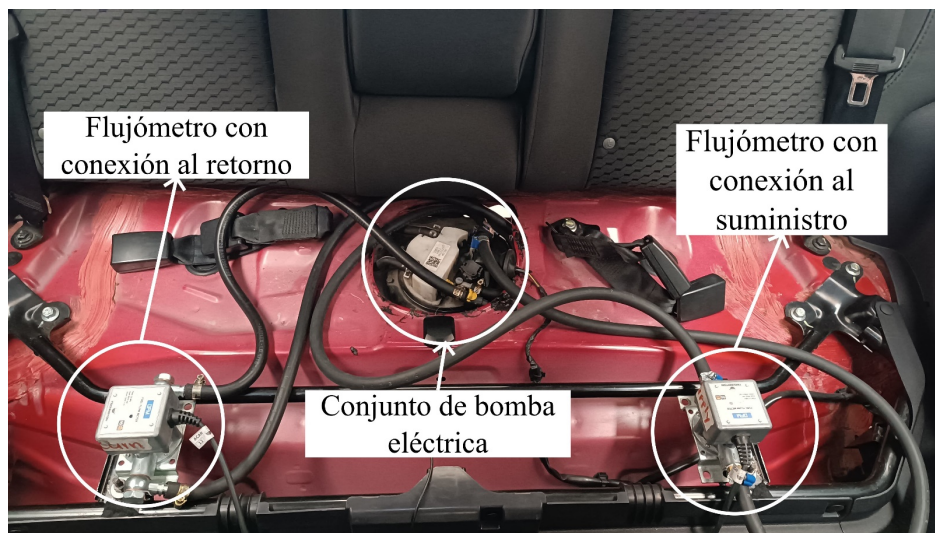


Figura 53. *Instalación de flujómetros en el vehículo de prueba*

(Autoría propia)

3.4.2.8 Instalación Eléctrica de los Equipos

La conexión eléctrica utilizada fue distinta a la propuesta por el fabricante Technoton y se realizó a través del cable de conexión común creado previamente (sección 3.3.5.1). Esto debido a que los flujómetros trabajaron en modo diferencial comunicados por una red CAN y compartieron una misma fuente de alimentación.

La instalación consistió en conectar todas las terminales de ambos flujómetros en paralelo (Figura 54). Ello permitió compartir la fuente de alimentación de 12 V (proporcionada por la batería del vehículo) y la conexión a CAN H y CAN L utilizada para comunicarse con CANEdge2. El terminal de conexión S6, usado para el funcionamiento telemático de los flujómetros junto con el sistema ORF4, no fue usado. Por otro lado, el terminal de conexión K – Line se usó para configurar los sensores mediante un computador personal.

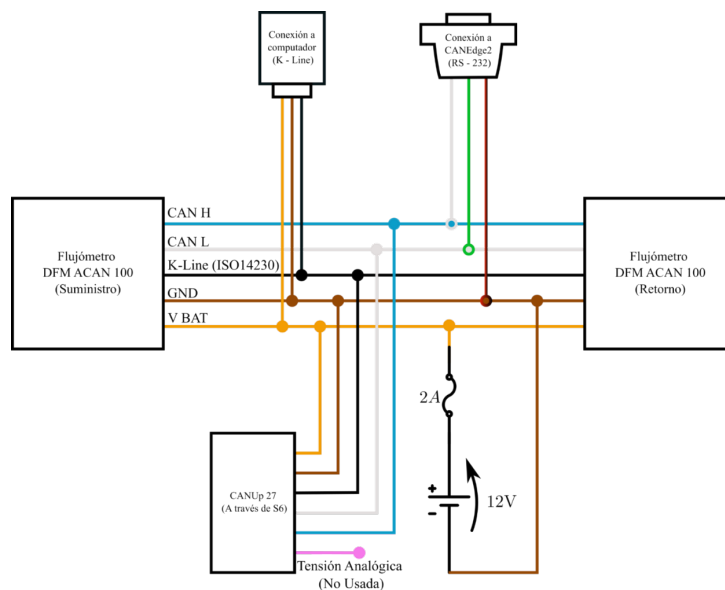


Figura 54. Diagrama de conexión eléctrica de flujómetros, cable común y cable serial RS232

(Autoría propia)

3.4.3 Configuración Final

La configuración final de equipos para la campaña experimental se ilustra en la Figura 55. Esta se estableció después de las pruebas de comunicación, siguiendo las configuraciones anteriormente mencionadas.

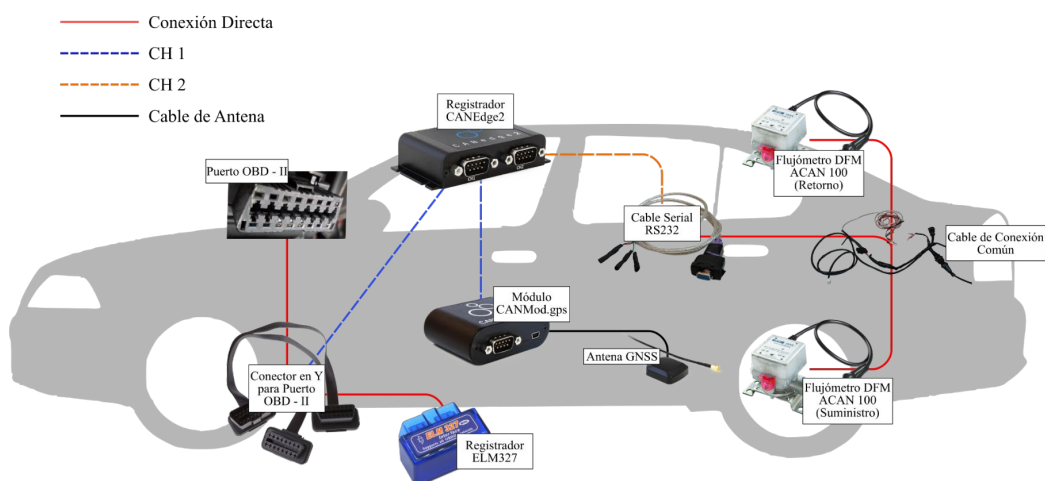


Figura 55. Diagrama de instalación de equipos

(Autoría propia)

3.5 Campaña Experimental

En esta subsección, se habla a detalle sobre la campaña experimental y sus características principales. Primero, se describen las particularidades comunes a todas las rutas de estudio, sin excepción. Posteriormente, se añade información específica sobre las rutas de cada ciudad.

3.5.1 Características Generales de las Rutas de Estudio

La campaña experimental se llevó a cabo durante el mes de junio del año 2024. En ella, se realizaron pruebas en cuatro ciudades con altitudes distintas: Manta, Santo Domingo, Ibarra y Tulcán. En cada ciudad se realizaron dos recorridos con duraciones de aproximadamente 50 min cada una.

Cada ruta tuvo tres tramos distintos: zona urbana, zona suburbana y carretera. Además, se llevaron a cabo durante días y horarios en los que se presentan horas pico, con el mismo conductor y sin utilizar el aire acondicionado para no alterar el consumo estándar del vehículo. Así, se caracterizó el funcionamiento del vehículo en tráfico real abarcando las zonas más frecuentes de operación de su motor.

Es importante mencionar que, si bien se buscó caracterizar el funcionamiento del motor del vehículo en condiciones de tráfico real, las rutas utilizadas no fueron totalmente estandarizadas. Es decir, el estudio cinemático previo a la caracterización de una ruta RDE estandarizada para cada ciudad no fue realizado. Esto, ya que el uso de este tipo de rutas se encuentra fuera del alcance de esta investigación. Sin embargo, se procuró que la conducción del vehículo y sus condiciones de operación se asemejen a los patrones típicos presentados durante un uso cotidiano. Esto último, al incluir vías con tráfico en el centro de las ciudades, vías suburbanas de velocidades promedio menores a 90 km/h y tramos en carretera sin tráfico y con operación crucero. Además, el tramo correspondiente al sector urbano fue el de mayor duración.

Con lo anteriormente mencionado, a continuación, se presenta más información sobre las rutas de cada ciudad.

3.5.2 Rutas de Estudio

3.5.2.1 Tulcán

La ciudad de mayor altitud seleccionada fue Tulcán, ubicada en la provincia del Carchi. Esta tiene una altitud promedio de 2980 msnm, temperatura promedio de 13,5°C y una presión atmosférica calculada de 71,85 kPa. Las características geoclimáticas de esta ciudad se encuentran detalladas en la Tabla 18. Estas permiten identificar factores externos adicionales que pueden afectar en el consumo de combustible de un vehículo y la cantidad de emisiones de CO₂ que este produce.

Tabla 18. Características geoclimáticas de Tulcán

VARIABLES CLIMÁTICAS Y GEOGRÁFICAS	VALOR
Altitud media	2980 msnm
Presión atmosférica calculada	71,85 kPa
Temperatura máxima promedio	18,3 °C
Temperatura media	13,5 °C
Temperatura mínima promedio	6,5 °C
Humedad relativa	77,7%

(Autoría propia)

Por otro lado, los dos recorridos realizados, mostrados en la Figura 57, cuentan con tramos de carretera, suburbanos, y urbanos. Además, el perfil de altitud de ambas rutas se muestra en la Figura 56, presentando ligeras variaciones entre ellas. Con este perfil, es posible analizar la topografía de los caminos en esta ciudad, siendo predominante la cantidad de pendientes y pocas zonas de elevación constante.

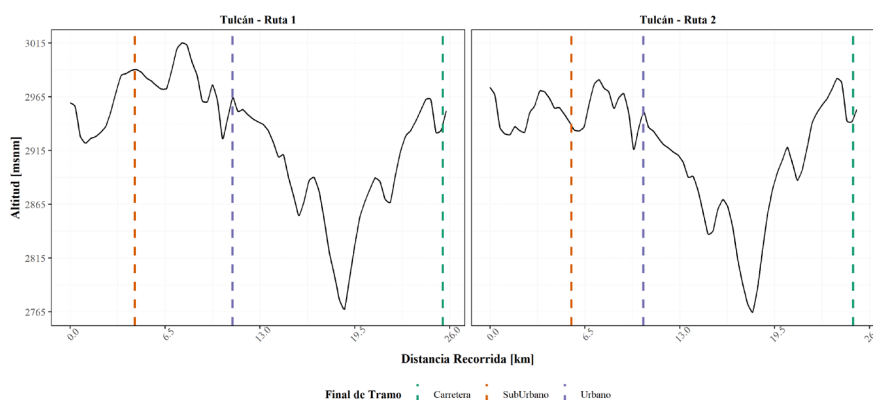


Figura 56. Perfil de altitud de rutas en la ciudad de Tulcán (2980 msnm)

(Autoría propia)

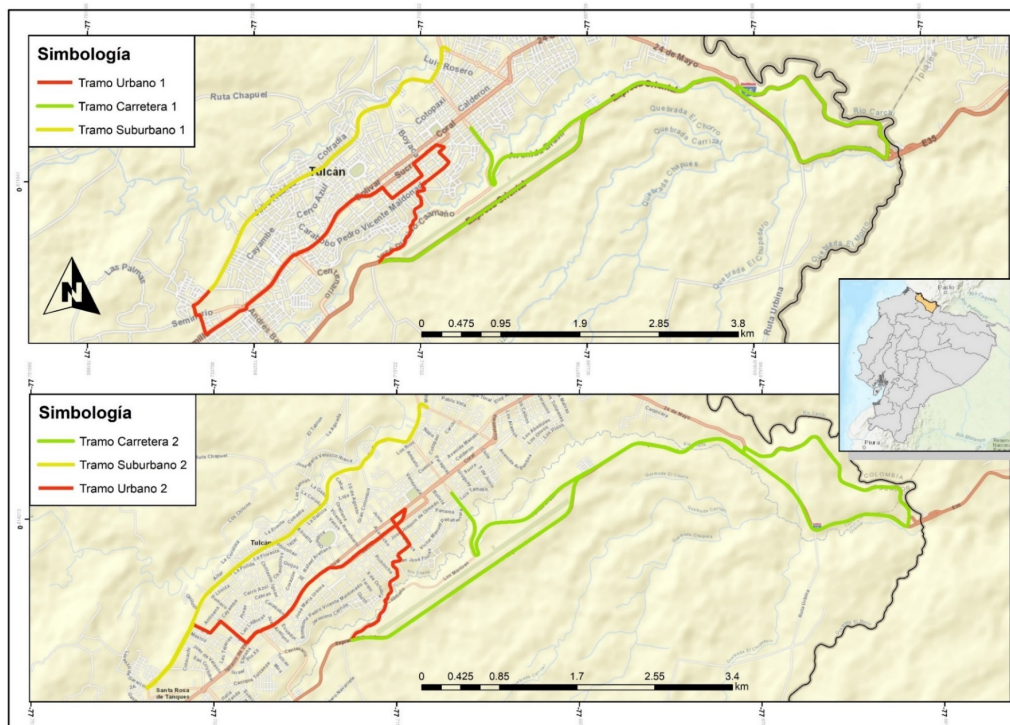


Figura 57. *Rutas de estudio en la ciudad de Tulcán (2980 msnm)*

(Autoría propia)

3.5.2.2 Ibarra

La siguiente ciudad seleccionada es la segunda más alta de todo el estudio: Ibarra, ubicada en la provincia de Imbabura, perteneciente a la sierra ecuatoriana. Esta cuenta con una altitud de 2225 msnm, temperatura media de 16,9°C y una presión atmosférica calculada de 77,23 kPa. Las características geográficas y climáticas de esta ciudad de estudio se muestran en la Tabla 19 y, al igual que en Tulcán, permitieron identificar otros factores que afectaron el desempeño del vehículo.

Tabla 19. *Características geoclimáticas de Ibarra*

Variables climáticas y geográficas	Valor
Altitud media	2225 msnm
Presión atmosférica calculada	77,23 kPa
Temperatura máxima promedio	22,5 °C
Temperatura media	16,9 °C
Temperatura mínima promedio	6,7 °C
Humedad relativa	78,25%

(Autoría propia)

Asimismo, se llevaron a cabo dos rutas (Figura 58) que contasen con los tres tramos previamente mencionados. Además, los perfiles de altitud de las rutas en esta ciudad, mostrados en la Figura 59, indican que existe una meseta durante el tramo de carretera. En contraste, los tramos suburbanos y urbanos cuentan con menos cambios bruscos en la pendiente del camino, indicando caminos más nivelados.

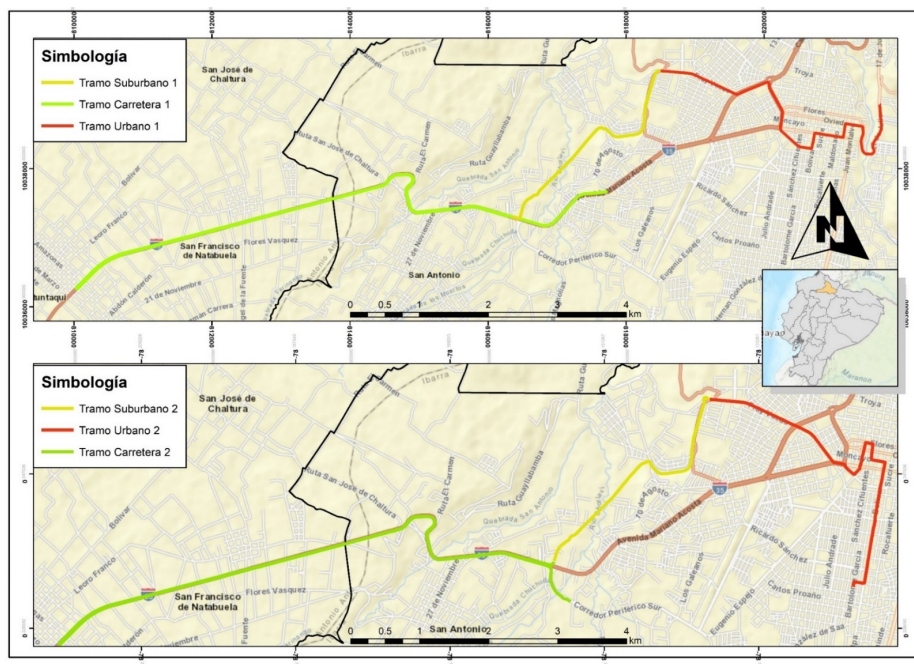


Figura 58. Rutas de estudio en la ciudad de Ibarra (2225 msnm)

(Autoría propia)

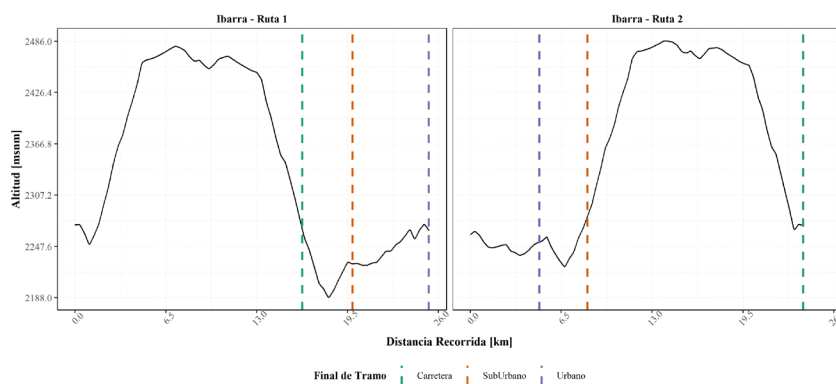


Figura 59. Perfil de altitud de rutas en la ciudad de Ibarra

(Autoría propia)

3.5.2.3 Santo Domingo

La tercera ciudad de estudio fue Santo Domingo, perteneciente a la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. Su altitud promedio es de 550 msnm y representa una altitud intermedia entre el nivel del mar y el nivel andino. Es decir, se encuentra entre las ciudades de mayor altitud (Tulcán e Ibarra) y la de baja altitud (Manta). Su presión atmosférica calculada es de 94,89 kPa, mientras que su temperatura media es de 22,1°C. Asimismo, sus características geoclimáticas relevantes para el estudio se detallan en la Tabla 20.

Tabla 20. Características geoclimáticas de Sto. Domingo

Variables climáticas y geográficas	Valor
Altitud media	550 msnm
Presión atmosférica calculada	94,89 kPa
Temperatura máxima promedio	25,1 °C
Temperatura media	22,1 °C
Temperatura mínima promedio	20 °C
Humedad relativa	87,3%

(Autoría propia)

Las dos rutas de estudio realizadas (Figura 61) tuvieron los mismos tramos que las anteriores: urbano, suburbano y carretera. En el caso del perfil de altitud expuesto en la Figura 60, demuestra aún menor variación en cuanto a pendiente se refiere. Sin embargo, a diferencia de Ibarra, no existen mesetas. Además, en gran parte de los tramos el vehículo circuló con pendiente negativa, afectando significativamente su desempeño y favoreciendo el consumo de combustible.

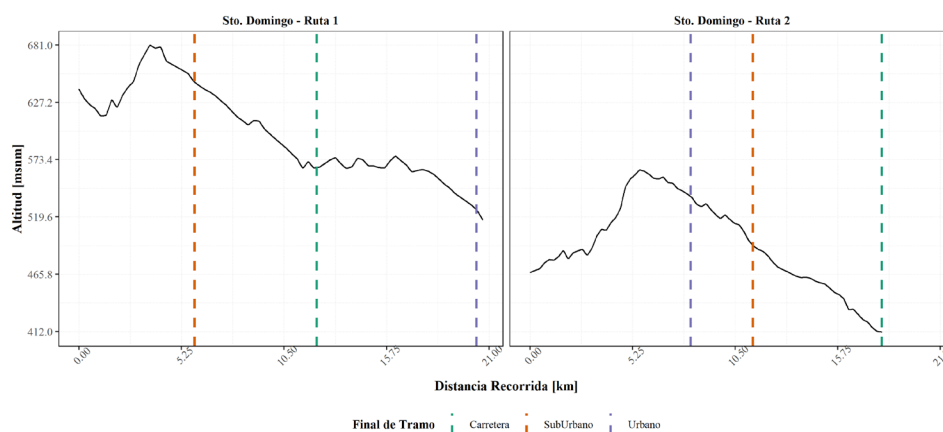


Figura 60. Perfil de altitud de rutas en la ciudad de Sto. Domingo (550 msnm)

(Autoría propia)

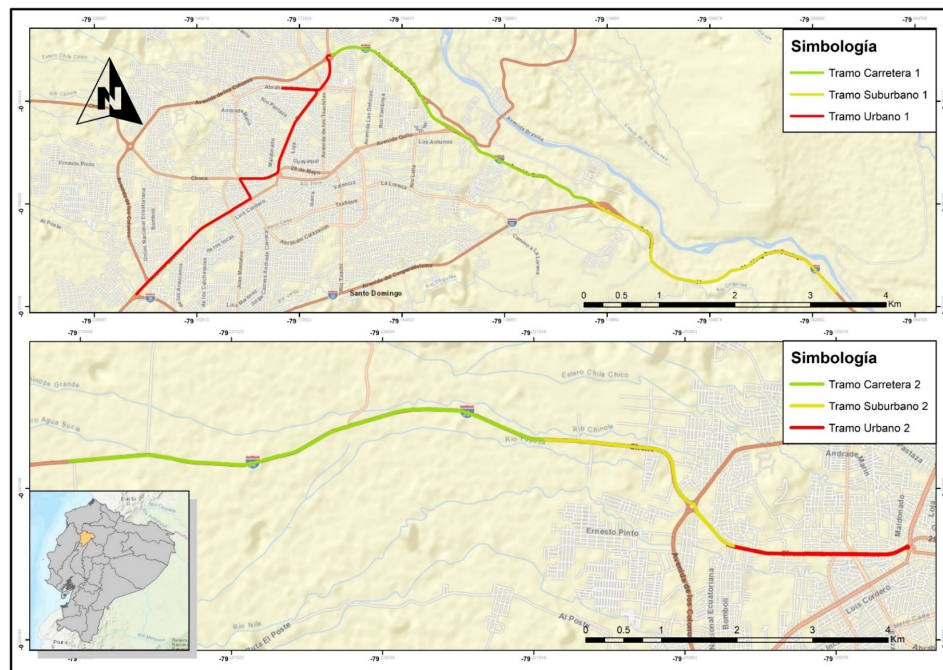


Figura 61. *Rutas de estudio en la ciudad de Sto. Domingo (550 msnm)*

(Autoría propia)

3.5.2.4 Manta

Para realizar una comparación de la operación del motor con los mayores niveles de presión atmosférica posibles, sin dejar de lado las condiciones dadas en una ruta en tráfico real, se seleccionó la ciudad de Manta, ubicada en la provincia de Manabí, perteneciente a la costa ecuatoriana. Su altitud promedio es de 6 msnm, con presión atmosférica calculada de 101,25 kPa y temperatura media de 25,5 °C. Sus características geográficas y climáticas (Tabla 21) difieren por mucho a las presentadas en ciudades de la sierra como Ibarra y Tulcán. Además, al ser una ciudad portuaria desarrollada, sus condiciones de tráfico fueron idóneas para el estudio.

Tabla 21. *Características geoclimáticas de Manta*

Variables climáticas y geográficas	Valor
Altitud media	6 msnm
Presión atmosférica promedio	101,25 kPa
Temperatura máxima promedio	29,7 °C
Temperatura media	25,5 °C
Temperatura mínima promedio	21,2 °C
Humedad relativa	79,8%

(Autoría propia)

Las dos rutas realizadas en Manta, mostradas en la Figura 62, contienen tramos urbanos, suburbanos y de carretera. Sin embargo, a diferencia de las demás ciudades, los tramos no están conectados en su totalidad. Esto último debido a la topografía de la ciudad y a la dificultad de conectarlos todos en un solo recorrido. Por otro lado, los perfiles de altitud de cada ruta se muestran en la Figura 63. En este caso, la presencia de caminos con baja pendiente es predominante, especialmente para la Ruta 2. Sin embargo, en el tramo de carretera se observa un comportamiento atípico en la altitud, sugiriendo problemas en la medición que debieron tomarse en cuenta.

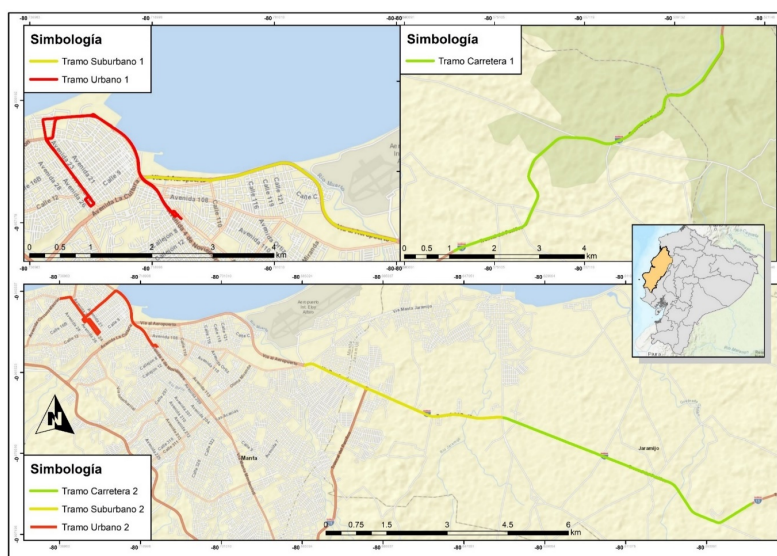


Figura 62. Rutas de estudio en la ciudad de Manta (6 msnm)

(Autoría propia)

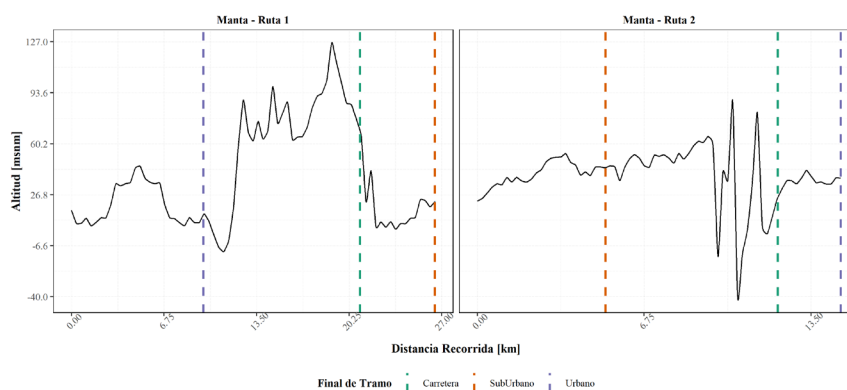


Figura 63. Perfil de altitud de rutas en la ciudad de Manta (6 msnm)

(Autoría propia)

3.6 Obtención de Curvas de Par en Dinamómetro

Antes de realizar el procesamiento de datos, se realizó una prueba adicional con el vehículo utilizado durante la campaña experimental. En ella, se determinaron las curvas máximas de potencia y par usando un dinamómetro, como se muestra en la Figura 64, mediante una prueba de aceleración libre. A continuación, se describe el procedimiento de obtención de curvas experimentales.



Figura 64. Prueba en dinamómetro con vehículo usado en la campaña experimental

(Autoría propia)

3.6.1 Descripción de Ensayos

El proceso de medición de las curvas se detalla a profundidad en otro estudio (Carrera, 2019). Sin embargo, a breves rasgos, el proceso fue el siguiente:

- Identificar con anterioridad cuál es la marcha directa del vehículo (generalmente, cuarta).
- Subir el vehículo de prueba a los rodillos, de manera que las ruedas con tracción se encuentren alineadas con estos.
- Asegurar el vehículo con correas de seguridad para evitar accidentes en caso de que los rodillos no funcionen adecuadamente.
- Asegurarse que el freno de servicio del vehículo quede totalmente levantado (poner un taco debajo de él, preferiblemente) y que el freno de mano no esté accionado.
- Encender el vehículo y proceder a sincronizar las revoluciones de motor (en cuarta marcha) con las revoluciones de los rodillos.

- Iniciar la prueba de obtención de las curvas de par y potencia realizando los siguientes pasos:
 - Acelerar el vehículo hasta antes de las 2000 revoluciones por minuto y cambiar a la marcha siguiente. Dicho cambio de marcha debe hacerse de la forma más rápida y prolija posible.
 - Una vez se encuentre en la marcha directa (en este caso, cuarta), acelerar a fondo hasta llegar al número de revoluciones máximas deseadas para la prueba.
 - Al llegar a las revoluciones máximas, soltar el acelerador y dejar que las ruedas dejen de girar por sí solas.
 - Repetir este proceso en cambio de existir errores.
- Descargar los datos obtenidos mediante el dinamómetro: gráfica de curvas típicas y archivo con datos en función del régimen de giro del motor.

Una vez realizado este proceso, se obtuvo la gráfica de par y potencia a la salida del cigüeñal para el vehículo utilizado en el estudio. La corrección de datos para obtener las curvas efectivas a la salida del cigüeñal se hizo automáticamente mediante el software del dinamómetro según la norma ISO 1585. Sin embargo, dichas curvas fueron ajustadas en el procesamiento de datos, puesto que el dinamómetro se utilizó a una altitud considerable por encima del nivel del mar. Es decir, el rendimiento del vehículo mostrado durante la prueba no es realmente su rendimiento máximo.

Se realizaron dos pruebas, siendo los datos obtenidos en la segunda los que se utilizaron para calcular las curvas máximas de par y potencia. Los resultados inmediatos de esta segunda prueba se encuentran en el Anexo 3.

3.7 Procesamiento de Datos

El procesamiento de datos constó de cuatro procesos, mostrados en la Figura 65, agrupados en tres fases distintas. La primera fue el pre – procesamiento de datos, en el que se descargó, sincronizó y limpió los registros de la campaña experimental. La segunda fase fue el procesamiento de datos como tal, que consistió en calcular todas las variables derivadas de los datos obtenidos. Por último, en la fase de post – procesamiento de datos se crearon gráficos cinemáticos y estadísticos, al igual que mapas de motor para su análisis posterior. En las siguientes secciones se detallan los procesos y programas utilizados en cada una de las tres fases.

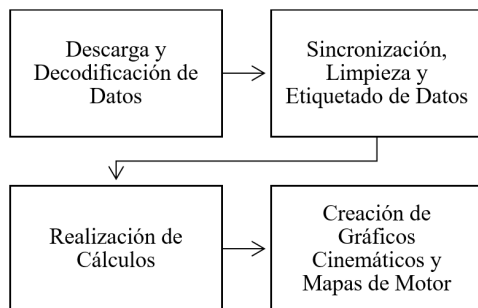


Figura 65. *Proceso general de procesamiento de datos*

(Autoría propia)

3.7.1 Pre – Procesamiento de Datos

En esta etapa se prepararon los datos para realizar cálculos posteriores utilizando principalmente dos paquetes de software: R (mediante RStudio) y Asammdf. El flujo de actividades seguido durante esta fase se presenta en la Figura 66.

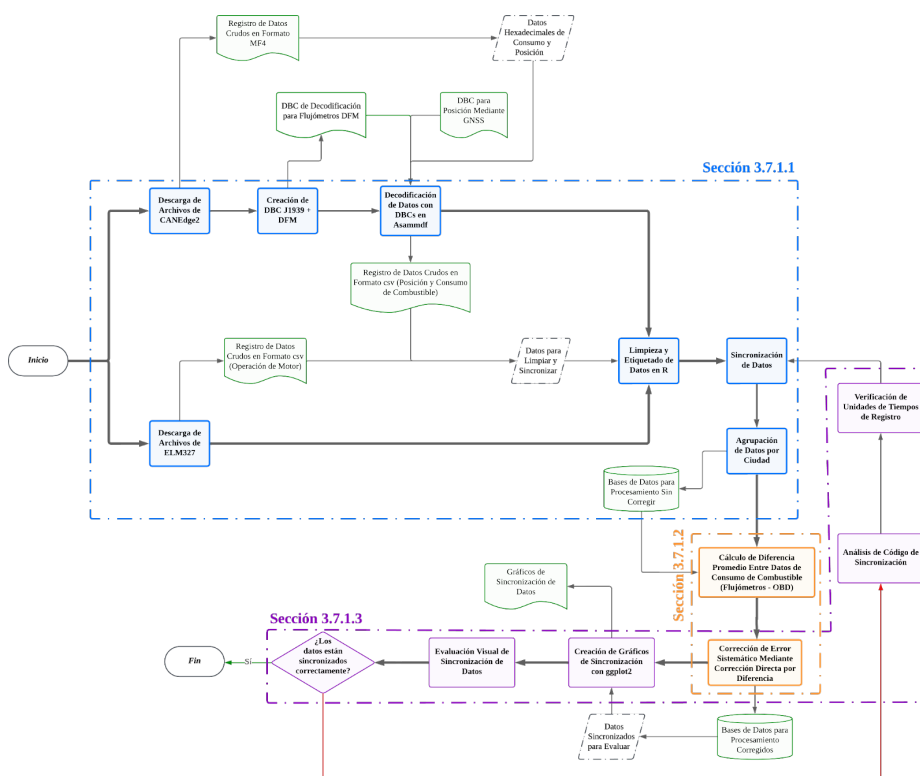


Figura 66. *Diagrama de flujo de pre – procesamiento de datos*

(Autoría propia)

El diagrama incluye los tres procesos principales del pre – procesamiento de datos: decodificación, limpieza y sincronización de datos (azul); corrección de error sistemático en el consumo de combustible medido (naranja); y sincronización de datos mediante gráficos (violeta). Además, se incluyen en color verde los archivos resultantes de esta etapa. En las secciones siguientes se describen los detalles de la etapa.

3.7.1.1 Decodificación, Limpieza y Sincronización de Datos

Primero, se descargaron los datos obtenidos por los registradores de datos. Los archivos con los registros de operación de motor obtenidos mediante el ELM327 eran de formato CSV y fueron automáticamente decodificados por Torque Pro. Sin embargo, los archivos con registros cinemáticos y de consumo de combustible obtenidos mediante CANEdge2 se guardaron en formato MF4, por lo que se hizo una decodificación previa utilizando una Base de Datos de Bus CAN (DBC) modificada.

El archivo DBC modificado se creó usando la herramienta *DBC Editor for CAN Bus Database Files* proveída por CSS Electronics (Figura 67). El archivo partió del DBC general del protocolo J1939 al que se le agregó una regla de decodificación para los flujómetros DFM ACAN 100.

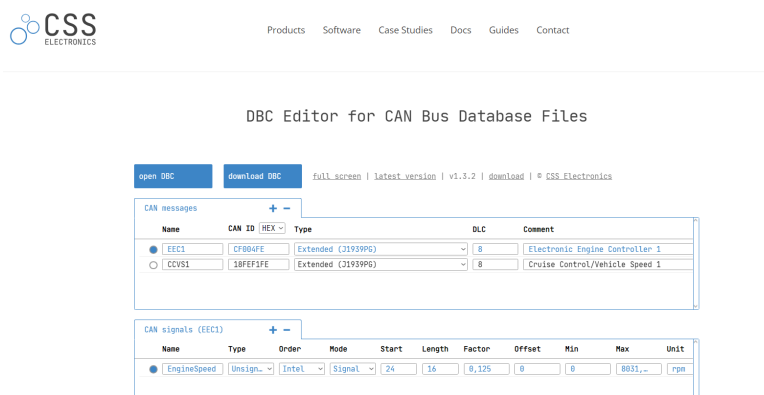


Figura 67. Interfaz de *DBC Editor for CAN Bus Database Files*

(CSS Electronics, 2025)

La regla agregada, mostrada en la Figura 68, contiene un mensaje CAN (PGN) que contiene una sola señal (SPN) que representa la tasa de consumo de combustible en unidades de L/h. Los parámetros de configuración del mensaje CAN se obtuvieron de la base de datos S6 del fabricante de los flujómetros de combustible (Technoton).

CAN messages					
Name	CAN ID [HEX]	Type	DLC	Comment	
ESSI	18F021FE	Extended (J1939PG)	8	Engine Speed Sensor Information	
EngTrboWast...	18F02EFE	Extended (J1939PG)	8	Engine Turbocharger Wastegate Actua...	
FlwMtr_Prm...	18F605FE	Extended (J1939PG)	8	Flowmeter Parameters (DFM)	
EC3	18FCE7FE	Extended (J1939PG)	8	Engine Configuration 3	

CAN signals (FlwMtr_Prmt...)										
Name	Type	Order	Mode	Start	Length	Factor	Offset	Min	Max	Unit
EngFuelRat...	Unsign...	Intel	Signal	0	16	0,05	0	0	3212,...	L/h

Figura 68. Mensaje y señal CAN agregadas a DBC de protocolo SAE J1939

(Autoría propia)

El nuevo archivo DBC, junto a otro para datos cinemáticos proveído por CSS Electronics, se usó para decodificar los archivos en formato MF4 extraídos de CANEdge2 mediante el paquete de software Asammdf. El software está basado en Python, por lo que se instaló el paquete del lenguaje de programación previamente. Por otro lado, la interfaz de Asammdf, en el apartado *Bus Logging*, permitió cargar los DBCs, convertir los valores hexadecimales de los archivos en su valor físico correspondiente y exportar los datos en archivos de formato CSV siguiendo el proceso ilustrado en la Figura 69.

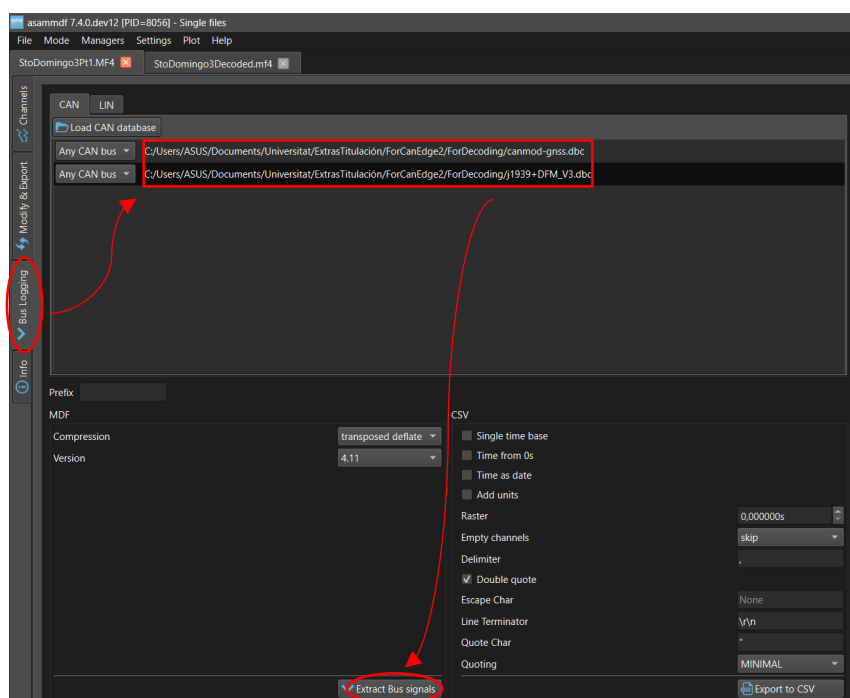


Figura 69. Interfaz de Asammdf con DBCs cargados

(Autoría propia)

Con los datos de operación de motor, posición y flujo de combustible guardados en archivos CSV se realizó la limpieza, etiquetado y sincronización de estos usando R y su interfaz gráfica R Studio, mostrada en la Figura 70. El orden del procedimiento se debe a una conveniencia de método. Además, los paquetes Tidyverse y data.table, instalados desde la red CRAN de la comunidad de R, facilitaron la manipulación de datos en *dataframes* y la aplicación de funciones en ellos.

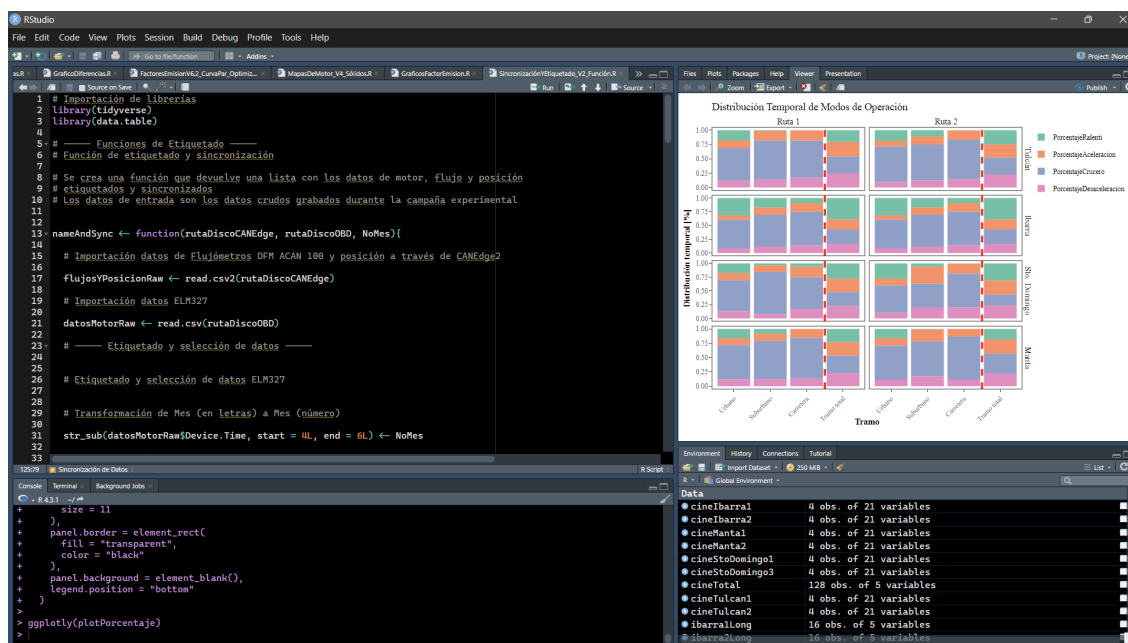


Figura 70. Interfaz gráfica de R Studio

(Autoría propia)

Para la limpieza y etiquetado de datos se seleccionaron y etiquetaron manualmente las variables de estudio (Figura 71). Esto ya que, tanto CANEdge2 como ELM327, registraron automáticamente variables redundantes o no relevantes para la investigación. Por otro lado, para facilitar la sincronización, se realizaron dos transformaciones de tipo de datos en todos los registros experimentales. Primero, los datos de fecha y hora fueron convertidos a formato de tiempo compacto usando la función `base::as.POSIXct`. Luego, todos los demás campos se transformaron a valores numéricos, a excepción de las coordenadas de longitud y latitud.

```

# Renombramiento de variables y conversión a datos numéricos
datosFlujoPosicion <- rename(datosFlujoPosicion,
                             LongitudAntena = Longitude,
                             LatitudAntena = Latitude,
                             AltitudAntena_m = Altitude,
                             DistanciaTotal_m = DistanceTrip,
                             Cabeceo_deg = Pitch,
                             VelocidadAntena_mps = Speed,
                             ConsumoSuministro_lph = FeedFuelRate,
                             ConsumoRetorno_lph = FeedFuelRate_0,
                             ConsumoDiferencial_lph = EngFuelRate
                             )

datosFlujoPosicion[4:10] <- lapply(select(datosFlujoPosicion, AltitudAntena_m : ConsumoDiferencial_lph), as.numeric)

# Selección de registros con posición conocida
datosFlujoPosicion <- filter(datosFlujoPosicion, AltitudAntena_m > -5400)

# — Sincronización de Datos —
# Se realiza una sincronización de los dos dataframes por medio de la variable FechaHora
# OJO: No existe (aparentemente) otra variable para sincronizar ambos dataframes
# Es necesario utilizar el formato compacto de fecha (POSIXct) con el fin de compararlos
datosMotor$FechaHora <- as.POSIXct(datosMotor$FechaHora)
datosFlujoPosicion$FechaHora <- as.POSIXct(datosFlujoPosicion$FechaHora) + 4
# La sincronización se hace con el paquete data.table
# Deben seleccionarse las variables a agregar
variables <- c(select.list(names(datosFlujoPosicion), multiple = TRUE, title = "Escoge variables", graphics = TRUE))
setDT(datosMotor)[datosFlujoPosicion, c(variables) :=
                  .(LongitudAntena,
                    LatitudAntena,
                    AltitudAntena_m,
                    DistanciaTotal_m,
                    Cabeceo_deg,
                    VelocidadAntena_mps,
                    ConsumoSuministro_lph,
                    ConsumoRetorno_lph,
                    ConsumoDiferencial_lph
                  ), on = c("FechaHora")]

datosRuta <- filter(datosMotor, is.na(datosMotor$ConsumoDiferencial_lph) == FALSE)
return(datosRuta)
}

```

Figura 71. Extracto de código de limpieza y sincronización de datos

(Autoría propia)

La sincronización de datos consistió en sincronizar los tiempos de registro (*timestamps*) de cada dispositivo. Tanto CANEdge2 como ELM327 contaron con la misma referencia de tiempo global proveniente de los relojes atómicos de satélites GNSS. Esto, ya que CANEdge2 actualizó su reloj interno utilizando la configuración de RTC previa y ELM327 obtuvo sus tiempos de registro del teléfono Android (configurado en tiempo automático basado en red) en el que se ejecutó Torque Pro. Así, se sincronizaron los datos al buscar y emparejar registros con la mínima diferencia entre los valores de fecha y hora (almacenados en formato de tiempo compacto, POSIXct). Luego, se agruparon los registros experimentales por ciudad y se creó una base de datos inicial.

3.7.1.2 Corrección de Error Sistemático de Flujo de Combustible

Durante las pruebas piloto, se notó un error sistemático constante entre el valor medido por los flujómetros DFM ACAN 100 y el registrado por la ECU del vehículo de prueba. Por ello, se corrigieron los datos de la campaña experimental antes de realizar el procesamiento de estos. La corrección del error se hizo mediante en R Studio utilizando las funciones base de R (Figura 72).

```

# ——— Corrección Datos Consumo ———

# El consumo OBD se toma como "valor real" y se los necesita en [l/h]
# Además es necesario recalcular el consumo diferencial con resta directa

datosCiudad <- datosCiudad %>%
  mutate(ConsumoOBD_lph = ConsumoOBD_ccmin * 60 / 1000, .after = ConsumoDiferencial_lph)

datosCiudad <- datosCiudad %>%
  mutate(ConsumoDiferencial2_lph = ConsumoSuministro_lph - ConsumoRetorno_lph, .after = ConsumoDiferencial_lph)

# Mediante optimización se busca reducir la desviación máxima de datos

funcion_ERM <- function(verdadero, medido, delta){
  errores <- abs((verdadero - (medido - delta)) / verdadero)
  erm <- mean(errores)
  return(erm)
}
rOptim <- optim(
  par = 0,
  fn = funcion_ERM,
  verdadero = datosCiudad$ConsumoOBD_lph,
  medido = datosCiudad$ConsumoDiferencial2_lph
)

delta <- rOptim$par

# Se resta de los valores medidos, los valores predichos de consumo

datosCiudad <- datosCiudad %>%
  mutate(ConsumoDiferencialCorr_lph = ConsumoDiferencial2_lph - delta)

```

Figura 72. Extracto de código de corrección de error sistemático

(Autoría propia)

Para corregir el valor medido por los flujómetros con respecto al valor de OBD (considerado real), se usó el método de corrección directa por diferencia. Puesto que el error sistemático fue constante, el valor corregido dependió de la diferencia promedio global o delta (Ecuación 5).

$$\text{Valor corregido} = \text{Valor medido} - \frac{\text{Valor medido} - \text{valor real}}{\text{Cantidad de datos}} \quad \text{Ecuación. 5}$$

Los valores de consumo de combustible se corrigieron utilizando un delta distinto para cada ciudad. Algunos de los valores corregidos se volvieron negativos, por lo que sus registros fueron eliminados para mantener coherencia en los cálculos. Como información adicional, en la Tabla 12 se presentan los valores de delta, la cantidad porcentual de datos eliminados y la cantidad final de registros para cada ciudad.

Tabla 22. Datos referentes a corrección de error sistemático

Ciudad	Delta	Cantidad de datos eliminados (%)	Cantidad final de datos
Tulcán	1,17	18,89	4930
Ibarra	1,38	18,14	4649
Sto. Domingo	1,18	9,56	3925
Manta	0,97	7,27	3916

(Autoría propia)

3.7.1.3 Sincronización de Datos

Para validar la sincronización de datos, se eligieron dos mediciones que hayan sido obtenidas por distintos registradores de datos y que se sepa tengan una dependencia directa. Estas fueron el consumo instantáneo de combustible en L/h (grabados por CANEdge2 y ELM327) y el régimen de motor (grabado únicamente por ELM327). En este caso, para lograr un mayor régimen de giro, se requiere inyectar una mayor cantidad de combustible, indicando una relación directamente proporcional entre ambas variables.

La evaluación se hizo de forma visual, por lo que se creó un gráfico de líneas que representó la variación de ambas magnitudes en función del tiempo transcurrido en segundos. Las curvas de consumo instantáneo y variación de régimen de motor fueron suavizadas utilizando la función `stats::spline`, nativa de R, que permitió seleccionar valores de abscisas y ordenadas para los cuales se ajusta una curva automáticamente (Figura 73). Este suavizado se logró al especificar el número de datos a 400 por cada curva.

```
# — Gráficos de sincronización —
# Es necesario crear una línea continua con una interpolación (spline)

splined ← function(datosRuta, vx, vy, nDatos, ciudad){
  # Es necesario un número de datos mínimos para los cuales se "interpolan" dentro del rango total de datos
  splineInt ← as.data.frame(spline(vx, vy, n = nDatos))
  # Se agrega una columna de ciudades para luego agrupar los datos
  splineInt ← splineInt %>%
    mutate(Ciudad = ciudad)
  return(splineInt)
}

# Se crea una función que devuelva un dataframe con datos suavizados seleccionados
# En valorX y valorY es posible especificar los valores _provenientes_ del dataframe original
# Se especifica un vector con los valores de ciudad
# Los datosCiudades son precalculados en el script FactoresEmisionV2_Funcion.R

dfSpline ← function(datosCiudades, valorX, valorY, nDatos, nombresCiudades){
  # Se llama a la función de línea continua creada para cada ciudad

  spline1 ← splined(
    datosRuta = datosCiudades[[1]],
    vx = pull(datosCiudades[[1]], valorX),
    vy = pull(datosCiudades[[1]], valorY),
    nDatos = nDatos,
    ciudad = nombresCiudades[1])

  spline2 ← splined(
    datosRuta = datosCiudades[[2]],
    vx = pull(datosCiudades[[2]], valorX),
    vy = pull(datosCiudades[[2]], valorY),
    nDatos = nDatos,
    ciudad = nombresCiudades[2])

  spline3 ← splined(
    datosRuta = datosCiudades[[3]],
    vx = pull(datosCiudades[[3]], valorX),
    vy = pull(datosCiudades[[3]], valorY),
    nDatos = nDatos,
    ciudad = nombresCiudades[3])

  spline4 ← splined(
    datosRuta = datosCiudades[[4]],
    vx = pull(datosCiudades[[4]], valorX),
    vy = pull(datosCiudades[[4]], valorY),
    nDatos = nDatos,
    ciudad = nombresCiudades[4])

  # Se unen todos los datos suavizados en un único dataframe
  # El dataframe podrá ser agrupado por ciudad gracias a su 3ra columna
  dfCombinado ← rbind(spline1, spline2, spline3, spline4)
  return(dfCombinado)
}
```

Figura 73. Extracto de código de creación de gráficos de sincronización

(Autoría propia)

El gráfico de sincronización (Figura 74) muestra las variaciones del régimen de motor y del consumo instantáneo de combustible. La gráfica permitió comparar las tendencias de variación de consumo combustible medidos por dos dispositivos distintos y visualizar si los datos de medición física se asemejan a los estimados por la ECU del vehículo. A pesar de no ser exactamente iguales, se evidenció que la sincronización de datos fue correcta. Esto, debido a que los picos en la curva de revoluciones tienen sus picos correspondientes en las curvas de consumo instantáneo de combustible.

La aprobación de la evaluación visual de sincronización de datos experimentales permitió continuar con el procesamiento y post – procesamiento de estos. Dichos procesos se describen en las secciones subsiguientes.



Figura 74. Variación instantánea de régimen de motor y consumo de combustible

(Autoría propia)

3.7.2 Procesamiento de Datos

En esta segunda fase, que es el procesamiento de datos como tal, se hicieron todos los cálculos correspondientes con los datos pre – procesados. El diagrama de flujo mostrado en la Figura 75 ilustra el proceso seguido que tiene cuatro etapas principales: cálculos cinemáticos (azul), obtención de curvas ajustadas de par y potencia efectivas máximas (naranja), estimación de parámetros de operación de motor (violeta) y cálculo de factores de emisión y consumo (marrón). Además, los datos de entrada y salida importantes se muestran en verde. A continuación, se habla a detalle de cada uno de estos procesos.

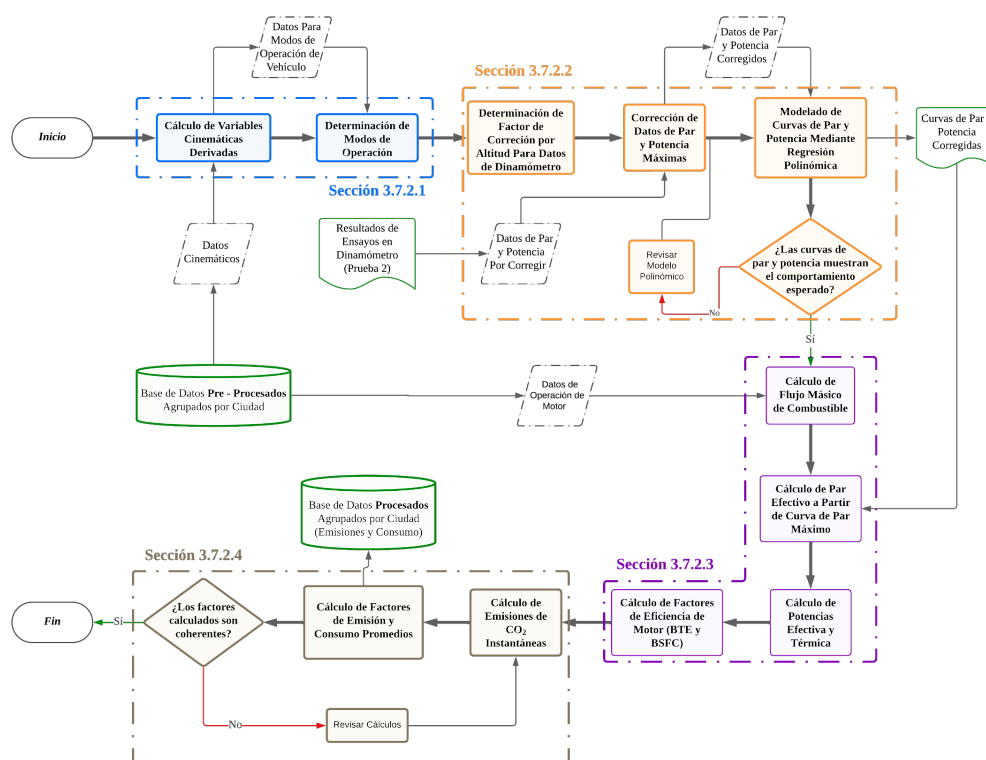


Figura 75. Diagrama de flujo de procesamiento de datos

(Autoría propia)

3.7.2.1 Cálculos Cinemáticos y Modos de Operación

Primero, se amplió la base de datos al calcular la aceleración instantánea (Ecuación 6), altitud relativa (Ecuación 7), distancia recorrida instantánea (Ecuación 8) y ángulo de pendiente instantáneo (Ecuación 9) en R Studio. Luego, se determinaron los modos de operación de vehículo por tramo y recorrido total filtrando los registros de las bases de datos por ciudad según los criterios seleccionados en la metodología (Tabla 4).

$$Aceleración_{ins} = V_{final} - V_{inicial} [m/s^2] \quad \text{Ecuación. 6}$$

$$Altitud_{rel} = Altitud_{final} - Altitud_{inicial} [msnm] \quad \text{Ecuación. 7}$$

$$Distancia_{ins} = Distancia_{final} - Distancia_{inicial} [m] \quad \text{Ecuación. 8}$$

$$\phi_{ins} = \sin^{-1} \left(\frac{Altitud_{rel}}{Distancia_{ins}} \right) [rad] \quad \text{Ecuación. 9}$$

3.7.2.2 Obtención de Curvas de Par y Potencia Máximas

La obtención de curvas de par y potencia máximas consistió en tres procesos: determinación del factor de corrección por altitud, corrección de datos y modelado de curvas mediante regresión polinómica. Todo se hizo utilizando R Studio y las funciones base de R. El código utilizado para ello se muestra en la Figura 76.

```
# Datos
curvaDino <-
  read.csv2("C:/Users/ASUS/Documents/Universitat/ExtrasTitulacion/DatosAgrupados/DatosDinamo/DatosDinamo_Prueba2.csv")

# Función de ajuste curvas
curvasMotor <- function(datosDinometro, factorCorreccion) {
  # Se eliminan los valores de rpm, par o potencia que sean nulos
  # Es necesario agregar una fila de ceros para que los datos sean "estimados" por debajo de
  # las 1000 rpm
  curvaDino <- curvaDino %>%
    filter(!is.na(RPM_2) == FALSE) %>%
    add_row(RPM_2 = 0, Par_Nm_2 = 0, Potencia_HP_2 = 0, Potencia_kW_2 = 0)

  # Se obtienen los valores de rpm, par y potencia en vectores distintos
  rpm <- curvaDino %>%
    pull(RPM_2)

  par <- curvaDino %>%
    pull(Par_Nm_2) * factorCorreccion

  potencia <- curvaDino %>%
    pull(Potencia_kW_2) * factorCorreccion

  # Se obtiene un modelo polinómico de la curva de par y de potencia
  modeloPar <- lm(par ~ poly(rpm, degree = 5, raw = TRUE))
  modeloPotencia <- lm(potencia ~ poly(rpm, degree = 2, raw = TRUE))
  # Se obtiene un rango de revoluciones mínimas y máximas para predecir la nueva curva
  revoluciones <- seq(min(rpm), max(rpm), length.out = 100)
  # Se predicen los valores de Par y Potencia de motor usando el modelo polinómico anterior
  parPredict <- predict(modeloPar, newdata = data.frame(rpm = revoluciones))
  potenciaPredict <- predict(modeloPotencia, newdata = data.frame(rpm = revoluciones))

  # Se junta todo en un data frame
  curvasAjustadas <- data.frame(RPM = revoluciones, Par_Nm = parPredict, Potencia_kW = potenciaPredict)
  curvasAjustadas[curvasAjustadas < 0] <- 0

  listaResultado <- list(modeloPar, modeloPotencia, curvasAjustadas, datosDinometro)
  names(listaResultado) <- c("modeloPar_Nm", "modeloPotencia_kW", "Puntos_CurvasAjustada", "Puntos_CurvaDino")
  return(listaResultado)
}

curvaMotorC30 <- curvasMotor(datosDinometro = curvaDino, factorCorreccion = 1.2)
rm(list = ls(pattern = "curvaDino"))
rm(list = ls(pattern = "curvasMotor"))
```

Figura 76. Código de obtención de curvas de par y potencia

(Autoría propia)

El factor de corrección calculado y aplicado fue de 1,2, ya que la presión atmosférica en la ciudad de prueba (Ibarra) es de aproximadamente 78 kPa, siendo esta 22% menor a la que se encuentra a nivel del mar. Además, los datos de potencia obtenidos en HP fueron transformados a medidas del Sistema Internacional (kW) y se agregó un punto de cruce de la gráfica (0, 0). Este punto indica que, a 0 revoluciones por minuto, se generan 0 kW de potencia o 0 Nm de par.

El modelado de curvas de par y potencia a plena carga se logró con una regresión polinómica utilizando las funciones `stats::lm` y `stats::predict`. Con la primera función se ajustó el polinomio que mejor representase los puntos corregidos, mientras que la segunda función permitió obtener los valores de par y potencia en todo el rango de régimen de giro del motor (Figura 77).

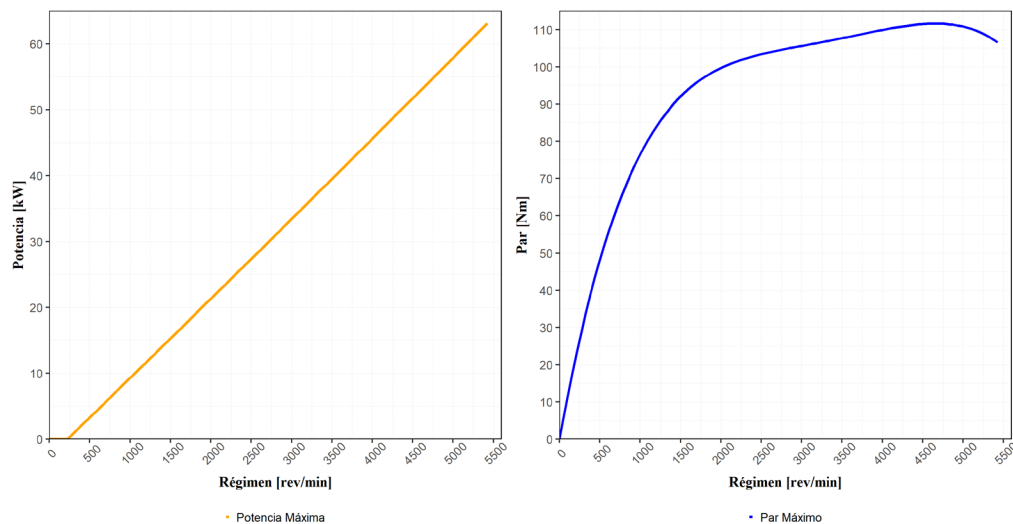


Figura 77. *Curvas máximas de potencia y par para el vehículo de prueba*

(Autoría propia)

El modelado de curvas permitió obtener los coeficientes de los polinomios de las curvas de par y potencia, siendo estos de quinto y primer grado respectivamente. En el caso de la curva de par, los coeficientes que definen sus valores en función del régimen se muestran en la Tabla 23. Dichos coeficientes se utilizaron para determinar el par máximo disponible al momento de calcular el par efectivo del motor.

Tabla 23. *Coefficientes de polinomio de par máximo en función del régimen*

Grado del polinomio	Coficiente	Valor
0	A	$-9,24 \times 10^{-2}$
1	B	$1,21 \times 10^{-1}$
2	C	$-5,23 \times 10^{-5}$
3	D	$1,19 \times 10^{-8}$
4	E	$-1,09 \times 10^{-12}$
5	F	$2,36 \times 10^{-17}$

(Autoría propia)

3.7.2.3 Estimación de Parámetros de Operación de Motor

En esta tercera etapa de procesamiento de datos se usaron los registros de operación de motor y flujo de consumo de combustible para estimar las variables de operación de motor derivadas. Así, se calculó el flujo másico de combustible, el par efectivo, las potencias térmica y efectiva, la eficiencia térmica al freno (BTE) y el consumo específico al freno (BSFC) (Figura 78).

```
# ---- Cálculo de Potencia Efectiva y Térmica ----
# Se necesita el consumo de combustible diferencial en unidades de (g/s)

densidadGasolina ← 720 # [kg/m³]
datosCiudad ← datosCiudad %>% mutate(
  ConsumoDiferencial_gps = pull(datosCiudad, ConsumoDiferencialCorr_lph) * densidadGasolina / (3600),
  ConsumoOBD_gps = ConsumoOBD_lph * densidadGasolina / 3600
)

# Para el cálculo del par efectivo se toma en cuenta una ecuación polinómica que parte
# de los puntos de régimen-par de la curva de par máximo obtenida en el dinamómetro

# El valor del par efectivo máximo dependerá del par máximo disponible dado por la ecuación de modelado
# de par obtenida en el dinamómetro

datosCiudad ← datosCiudad %>%
  mutate(ParEfectivo_Nm = CargaMotor/ 100 *
    predict(curvaMotorC30=modeloPar_Nm, newdata = data.frame(rpm = datosCiudad$RPM)),
    PotenciaEfectiva_KW = (RPM * ParEfectivo_Nm * 2 * 3.1416/60) / 1000
  )

# Cálculo de Potencia Térmica
lHVGasolina ← 43.4 # [MJ/kg]
datosCiudad ← datosCiudad %>%
  mutate(PotenciaTermica_kW = pull(datosCiudad, ConsumoDiferencial_gps) * lHVGasolina,
    PotenciaTermicaOBD_kW = pull(datosCiudad, ConsumoOBD_gps) * lHVGasolina)

# Eficiencia térmica (BTE)
datosCiudad ← datosCiudad %>%
  mutate(BTE = pull(datosCiudad, PotenciaEfectiva_kW) / pull(datosCiudad, PotenciaTermica_kW),
    BTEOBD = pull(datosCiudad, PotenciaEfectiva_kW) / pull(datosCiudad, PotenciaTermicaOBD_kW))
```

Figura 78. Extracto de código de estimación de parámetros de operación de motor

(Autoría propia)

Para calcular el flujo másico de combustible (o tasa de consumo), se partió de la diferencia entre el flujo volumétrico de suministro y el de retorno. Luego, con la densidad de gasolina Extra (la cual se utilizó durante la campaña experimental), se calculó el flujo másico de combustible como se muestra en la Ecuación 10. En ella, el flujo diferencial de combustible se encuentra en L/h, mientras que la densidad de gasolina en kg/m³. Esta última tuvo un valor de 720 kg/m³.

$$\dot{m}_{combustible} = \frac{\text{Flujo diferencial de combustible} \cdot \rho_{gasolina}}{3600} \text{ [g/s]} \quad \text{Ecuación. 10}$$

El par efectivo se calculó con la estimación de carga de motor obtenida a través de OBD y el par máximo disponible a cierto régimen de giro. El par máximo disponible actual ($T_{m\acute{a}x}$) se calculó con los coeficientes mostrados en la Tabla 23 utilizando la Ecuación 11. Con él, se calculó el par efectivo (T_e) a partir del porcentaje de carga de motor actual (Ecuación 12).

$$T_{m\acute{a}x} = A \cdot rpm^5 + B \cdot rpm^4 + C \cdot rpm^3 + D \cdot rpm^2 + E \cdot rpm + F [Nm] \quad \text{Ecuaci3n. 11}$$

$$T_e = T_{m\acute{a}x} \cdot \% \text{ Carga de motor} [Nm] \quad \text{Ecuaci3n. 12}$$

Para el cálculo de la potencia térmica instantánea se utiliz3 la Ecuaci3n 13, d3nde m_{comb} es la masa de combustible consumido en el intervalo de 1 segundo y C_p es el poder calorífico de la gasolina. La masa de combustible se expresa en g/s mientras que el poder calorífico, en MJ/kg. El valor utilizado para este último fue de 43,4 MJ/kg. Por otro lado, el cálculo de la potencia efectiva parti3 del par efectivo calculado y las revoluciones del motor. Así, la potencia efectiva (P_e) se calcul3 como se muestra en la Ecuaci3n 14

$$P_T = m_{comb} \cdot C_p \cdot 10^3 [kW] \quad \text{Ecuaci3n. 13}$$

$$P_e = rpm \cdot T_e \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{1}{1000} [kW] \quad \text{Ecuaci3n. 14}$$

Para calcular la eficiencia térmica al freno (BTE) se relacion3 la potencia térmica y la potencia efectiva mediante la Ecuaci3n 15, mientras que el consumo específico al freno se calcul3 utilizando el consumo másico instantáneo de combustible y la potencia efectiva del motor (Ecuaci3n 16).

$$BTE = P_T/P_e \quad \text{Ecuaci3n. 15}$$

$$BSFC = \frac{\text{Consumo instantáneo de combustible} \cdot 3600}{P_e} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad \text{Ecuaci3n. 16}$$

3.7.2.4 Cálculo de Factores de Emisi3n y Consumo

En la última etapa del procesamiento de datos se calcularon la tasa de emisi3n de CO₂ y los factores de emisi3n y consumo promedios por tramo y recorrido total como se muestra en la Figura 79. Además, el análisis inicial de estos factores permiti3 validar los registros de consumo de combustible al compararlos con los de estudios previos.

```

# — Cálculo de Factores de Emisión —
# CO2 instantáneo
# Se calcula el CO2 instantáneo utilizando la fórmula estequiométrica
# Los factores de emisión por motor y vehículo se expresan en [g/kWh] y [g/km]
# También se calcula el valor del BSFC en [g_comb/kWh]
reLCH ← 2.25
kgCO2 ← 44 / (12 + reLCH)

datosCiudad ← datosCiudad %>%
  mutate(CO2Ins_g = ConsumoDiferencial_gps * kgCO2,
         CO2InsOBD_g = ConsumoOBD_gps * kgCO2,

         CO2pkWh = CO2Ins_g * 3600 / PotenciaEfectiva_kW,
         CO2pkWh_OBD = CO2InsOBD_g * 3600 / PotenciaEfectiva_kW,

         CO2pkm = CO2Ins_g / (DistanciaRelativa_m / 1000),
         CO2pkm_OBD = CO2InsOBD_g / (DistanciaRelativa_m / 1000),

         BSFC = ConsumoDiferencial_gps * 3600 / PotenciaEfectiva_kW,
         BSFC_OBD = ConsumoOBD_gps * 3600 / PotenciaEfectiva_kW
  )

```

Figura 79. Extracto de código de cálculo de factores de emisión y consumo

(Autoría propia)

Para calcular la tasa de emisiones de CO₂ se utilizó la Ecuación 17, puesto que la regulación de la carga en motores de encendido provocado se hace de forma cuantitativa y se trabaja con un dosado estequiométrico. La expresión H/C hace referencia a la relación hidrógeno – carbono del hidrocarburo utilizado. Para la gasolina, puesto que su fórmula es C_8H_{18} , esta relación tuvo el valor de 2,25. Así, mediante una relación lineal, se obtiene la cantidad de CO₂ producido por cada unidad másica de combustible utilizado.

$$\frac{\text{kg de CO}_2}{\text{kg de Combustible}} = \frac{44}{12 + \frac{H}{C}} \quad \text{Ecuación. 17}$$

El cálculo del factor de emisión de CO₂ consistió en dividir las emisiones totales de CO₂ entre la potencia efectiva total del motor multiplicado por un factor de tiempo (Ecuación 18). Además, se obtuvo el factor de emisión de CO₂ a nivel de vehículo al dividir las emisiones totales de CO₂ para la distancia total del recorrido (Ecuación 19).

$$FE_{motor} = \frac{\text{Masa total de CO}_2 \cdot 3600}{P_{eTotal}} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad \text{Ecuación. 18}$$

$$FE_{vehículo} = \frac{\text{Masa total de CO}_2}{\text{Distancia total recorrida}} \left[\frac{g}{km} \right] \quad \text{Ecuación. 19}$$

Por último, la tasa de consumo total de combustible por kilómetro recorrido y el consumo a los 100 kilómetros recorridos se calcularon utilizando las Ecuaciones 20 y 21, respectivamente. Con ello, se finalizó el procesamiento de datos.

$$\text{Consumo}_{km} = \frac{\text{Masa total de combustible consumido} \left[\frac{g}{km} \right]}{\text{Distancia total recorrida}} \quad \text{Ecuación. 20}$$

$$\text{Consumo}_{100 km} = \frac{\text{Combustible total consumido}}{\text{Distancia total recorrida}} \cdot 100 \left[\frac{L}{km} \right] \quad \text{Ecuación. 21}$$

3.7.3 Post – Procesamiento de Datos

La última etapa del procesamiento de datos consistió en crear tres tipos de gráficos para analizar los resultados. Los principales procesos llevados a cabo para ello se muestran en el diagrama de flujo de la Figura 80. En él, las etapas de creación de todos los gráficos se diferencian con distintos colores (azul, naranja y violeta).

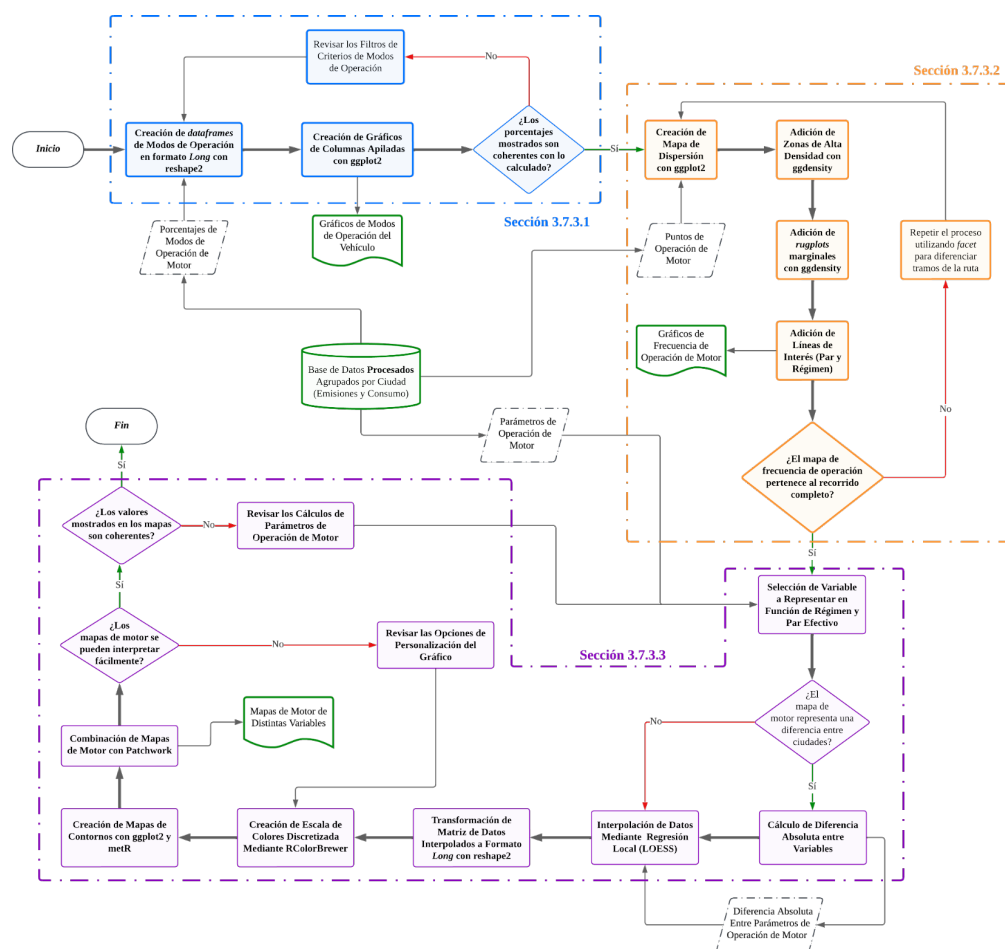


Figura 80. Diagrama de flujo de post – procesamiento de datos

(Autoría propia)

3.7.3.1 Gráficos de Modos de Operación

Los gráficos de modos de operación del vehículo partieron de las variables cinemáticas del vehículo y los criterios de agrupación de modos de operación (aceleración, desaceleración, ralentí o crucero) descritos en la Tabla 4. Estos se crearon con R Studio y el paquete ggplot2 (Figura 81). Además, permitieron visualizar el comportamiento cinemático del vehículo dependiendo del tipo de tramo recorrido.

```

# Se crean nuevos dataframes con variables de ciudad y ruta para agruparlos en el gráfico
tulcanLong <- cineLong(cineTulcan1, varCine) %>%
  mutate(Ciudad = "Tulcán\n(2980 msnm)", Ruta = "Ruta 1", .before = "Tramo")
tulcanLong <- cineLong(cineTulcan2, varCine) %>%
  mutate(Ciudad = "Tulcán\n(2980 msnm)", Ruta = "Ruta 2", .before = "Tramo")

ibarraLong <- cineLong(cineIbarral, varCine) %>%
  mutate(Ciudad = "Ibarra\n(2225 msnm)", Ruta = "Ruta 1", .before = "Tramo")
ibarraLong <- cineLong(cineIbarr2, varCine) %>%
  mutate(Ciudad = "Ibarra\n(2225 msnm)", Ruta = "Ruta 2", .before = "Tramo")

stodomingoLong <- cineLong(cineStodomingo1, varCine) %>%
  mutate(Ciudad = "Sto. Domingo\n(550 msnm)", Ruta = "Ruta 1", .before = "Tramo")
stodomingoLong <- cineLong(cineStodomingo2, varCine) %>%
  mutate(Ciudad = "Sto. Domingo\n(550 msnm)", Ruta = "Ruta 2", .before = "Tramo")

mantalLong <- cineLong(cineMantal, varCine) %>%
  mutate(Ciudad = "Manta\n(6 msnm)", Ruta = "Ruta 1", .before = "Tramo")
mantalLong <- cineLong(cineManta2, varCine) %>%
  mutate(Ciudad = "Manta\n(6 msnm)", Ruta = "Ruta 2", .before = "Tramo")

# Se crea un dataframe único para poder agrupar en un sólo gráfico
datosmir <- select(list(l1), multiple = TRUE, graphics = TRUE, title = "Selecciona las matrices long")

cineTotal <- data.frame()

for (i in c(1 : length(datosmir))) {
  cineTotal <- rbind(cineTotal, get(datosmir[i]))
}

# Gráfico de Cinemática de Rutas
# Los levels son creados para luego utilizarlos en variables convertidas en factores y ordenar el gráfico
levelTramo <- c("Urbano", "Suburbano", "Carretera", "Tramo total")
levelCiudad <- c("Tulcán\n(2980 msnm)", "Ibarra\n(2225 msnm)", "Sto. Domingo\n(550 msnm)", "Manta\n(6 msnm)")

plotPorcentaje <- ggplot(data = cineTotal, aes(x = factor(Tramo, levels = levelTramo), y = value, fill = variable)) +
  geom_bar(position = "fill", stat = "identity") +
  scale_fill_brewer(palette = "Set2", labels = c("Aceleración", "Cruce", "Desaceleración")) +
  facet_grid(
    rows = vars(factor(Ciudad, levels = levelCiudad)),
    cols = vars(Ruta)
  ) +
  geom_vline(aes(xintercept = 3.5,
                linetype = "dashed",
                color = "red",
                lwd = 1))

labs(
  x = "Tramo",
  y = "Distribución temporal [%]",
  fill = NULL,
  title = "Distribución Temporal de Modos de Operación"
)
theme(
  text = element_text(
    size = 10
  )
)

```

Figura 81. Extracto de código de gráficos de modos de operación

(Autoría propia)

Consisten en gráficos de barra apilados que representan los porcentajes de modo de operación mostrados en las tablas de características cinemáticas de cada ruta (Anexo 4). Además, se plasmó la distribución temporal de cada modo de operación diferenciando tipos de tramo (urbano, suburbano, carretera y total). Por último, se utilizó una escala de color cualitativa para 4 clases de datos ("Set 2", de Color Brewer) para mejorar la claridad del gráfico.

3.7.3.2 Gráficos de Frecuencia de Operación de Motor

Los mapas de frecuencia creados son histogramas en tres dimensiones que, mediante contornos, representan la cantidad de agrupación de datos: entre más oscuro sea el contorno, más datos se encuentran agrupados en esa zona. Además, se añadió un *rugplot* paralelo a cada eje para mejorar la visualización de dicha agrupación. En este caso, la magnitud de las abscisas fue el régimen de giro de motor y el de ordenadas el par efectivo.

Cada mapa de frecuencia partió de un gráfico de dispersión de los puntos experimentales de operación. Este, se creó con la función `ggplot2::geom_point`. A él, se le añadieron zonas de alta densidad de puntos (*High Density Regions*) utilizando la función `ggdensity::stat_hdr`. Se seleccionaron tres zonas de agrupación para graficarse: 50%, 80% y 90% de toda la cantidad de datos representados.

Finalmente, se añadieron tres líneas que permiten profundizar el análisis de la frecuencia de operación del motor: la línea de régimen de motor promedio, la de par efectivo promedio y la curva de par máximo del vehículo de prueba. En cuanto a los colores utilizados, se intentó crear alto contraste entre las zonas de alta densidad y los puntos de operación experimentales, mientras que los *rugplots* usaron la escala “mako” del paquete de colores *Viridis* (Figura 82).

```
# Se crean scatterplots combinados con rugplots con el fin de mejorar la comprensión
# Usar ggdensity permite entender de mejor manera la agrupación de datos

# También es necesario crear un dataframe con los valores promedio de régimen y par
# Para los subtramos y el tramo total
promedios <- ciudadAnálisis %>%
  group_by(Tramo) %>%
  summarise(x = mean(RPM), y = mean(ParEfectivo_Nm))

promediosTotal <- ciudadAnálisis %>%
  summarise(x = mean(RPM), y = mean(ParEfectivo_Nm))

frOperacionTotal <- ggplot(data = ciudadAnálisis, aes(x = RPM, y = ParEfectivo_Nm)) +
  # Se usa stat_hdr para controlar la resolución de las curvas (n) y la probabilidad de
  # agrupación de datos
  stat_hdr(
    method = "kde",
    xlim = c(400, 3500), ylim = c(0, 120), n = 200,
    probs = c(0.99, 0.8, 0.5),
    geom = "hdr") +
  # Se grafican los puntos de operación para dar contexto a la agrupación de datos
  geom_point(aes(color = "Puntos de Operación"), alpha = 0.5, shape = 20, size = 1) +
  # Se agrega el valor de la curva de par máxima para contexto
  geom_line(data = curvaMotorC30$Puntos_CurvaAjustada,
    aes(x = RPM, y = Par_Nm, color = "Curva de Par Máximo"), linewidth = 1) +
  # Promedios de par y régimen
  geom_hline(data = promediosTotal, aes(yintercept = y, color = "Promedio Par Efectivo"),
    linewidth = 1, linetype = "dashed") +
  geom_vline(data = promediosTotal, aes(xintercept = x, color = "Promedio Régimen"),
    linewidth = 1, linetype = "dashed") +
  # Creación de rugplots
  stat_hdr_rug(
    aes(fill = after_stat(probs)),
    method = "kde",
    xlim = c(400, 3500), ylim = c(0, 120), n = 512,
    probs = c(0.99, 0.8, 0.5),
    geom = "hdr_rug",
    sides = "bl",
    alpha = 1,
    length = unit(6, "points"),
    show.legend = NA
  ) +
  scale_fill_viridis_d(name = "Concentración",
    option = "viridis",
    begin = 0.9, end = 0.3) +
  scale_color_manual("",
    breaks = c("Puntos de Operación",
      "Curva de Par Máximo",
      "Promedio Par Efectivo",
      "Promedio Régimen"),
    values = c("Puntos de Operación" = "cyan",
      "Curva de Par Máximo" = "red",
      "Promedio Par Efectivo" = "blue",
      "Promedio Régimen" = "orange")) +
```

Figura 82. Extracto de código de gráficos de frecuencia de operación de motor

(Autoría propia)

Los mapas de frecuencia permitieron la visualización de zonas de mayor frecuencia de operación del motor durante los distintos tramos de las rutas de estudio, diferenciados usando la función `ggplot2::facet_wrap`, y su influencia en el total de datos por ruta.

3.7.3.3 Mapas de Motor: Distintas Variables

La esencia de los mapas de motor fue representar por medio de un mapa de calor la relación entre dos variables de entrada (régimen de giro y par efectivo, por ejemplo) y una de salida. Esta última (de tipo continua) definió el tema de cada uno de los mapas y se representó con una escala de colores progresiva y discretizada. Para crearlos, se utilizó el método propuesto por Belletiere et al. (2016), R Studio y los paquetes Tidyverse, Patchwork, RColorBrewer, metR y reshape2. Un extracto del código utilizado se muestra en la figura

```
# Se inicia creando un dataframe específico que contenga únicamente los valores de
# rpm, par efectivo y la variable a analizar (bte, bsfc, FE...)
# Es necesario eliminar los valores infinitos o nulos, puesto que se realizará una
# regresión local de datos
# .data[[variable]] se utiliza puesto que se provee el nombre de la variable en caracteres
# Es necesario renombrar la tercera variable a "z" por conveniencia del método utilizado
dataRaster <- ciudadAnalysis %>%
  filter(.data[[variable]] != Inf) %>%
  select(RPM, ParEfectivo_Nm, all_of({{variable}})) %>%
  rename(z = .data[[variable]])

# Se crea una variable tipo lista que contiene una Regresión Local (loess) con las variables
# rpm, par efectivo y la tercera seleccionada
# El valor de _span_ en este caso permite ajustar el suavizado de curvas de nivel al momento
# de generar el mapa motor
dataLoess <- loess(z ~ RPM * ParEfectivo_Nm, data = dataRaster, span = span)

# Se crea una secuencia incremental de datos que depende de los datos mínimos y máximos
# de par y régimen del motor
xgrid <- seq(min(dataRaster$RPM), max(dataRaster$RPM), by = 5)
ygrid <- seq(min(dataRaster$ParEfectivo_Nm), max(dataRaster$ParEfectivo_Nm), by = 5)

# Se crea una grilla con el tamaño de ejes de abscisas y coordenadas creadas anteriormente
dataFit <- expand.grid(RPM = xgrid, ParEfectivo_Nm = ygrid)

# Se crea una matriz tridimensional con datos de predicción para los "lugares faltantes"
# Dicha predicción parte de la loess realizada anteriormente
matriz3d <- predict(dataLoess, newdata = dataFit)

# Se crea una nueva matriz en formato "long" con el fin de facilitar la creación de contornos
# Es necesario el paquete de datos reshape2
matrizLong <- melt(matriz3d)

# Debido al comando de predicción de datos, es necesario tomar únicamente el valor numérico
# de los ejes x e y
# Ello se hace con un subsetting de caracteres
matrizLong$RPM <- as.numeric(
  str_sub(matrizLong$RPM, str_locate(matrizLong$RPM, "=")[1,1] + 1))
matrizLong$ParEfectivo_Nm <- as.numeric(
  str_sub(matrizLong$ParEfectivo_Nm, str_locate(matrizLong$ParEfectivo_Nm, "=")[1,1] + 1))

# OJO: Cabe mencionar que la interpolación de datos realizada con la regresión local (LOESS)
# podría haberse hecho con el comando akima::interpol(). Sin embargo, se optó por no usar ese
# paquete con el fin de hacer más accesible el código a otras personas en el futuro.

# El mapa motor, que depende de la variable seleccionada, se crea con el paquete ggplot2
# Es necesario crear una paleta de colores discretizada (se usa color brewer)
# Los límites de escala dependen de cada mapa motor
nBreaks <- c(-Inf, round(seq(limEscala[1], limEscala[2], length.out = 7), digits = 2), Inf)
colores <- brewer.pal(n = length(nBreaks), name = "BuPu")
# browser()
```

Figura 83. Extracto de código de mapas de motor

(Autoría propia)

Siguiendo ese método, primero, se creó una serie continua de valores de salida con una regresión local de datos (LOESS) mediante la función `stats::loess`. Con ella, se predijo el comportamiento de cualquiera de las variables seleccionadas (BTE, BSFC, FE, etc.) en función del rango de régimen de giro y par efectivo seleccionado. Esta predicción es un tipo de interpolación ya que dependió totalmente de los datos suministrados. Por otro lado, el suavizado de la regresión fue del 20%.

El rango de revoluciones y par efectivo para la regresión fue el acotado por los valores mínimos y máximos registrados en cada una de las rutas de estudio. Sin embargo, el rango de régimen utilizado para todas las gráficas fue de 650 a 3450 rpm y, el de par efectivo, de 15 a 100 Nm. Esto, para facilitar la comparación entre mapas de motor de distintas ciudades.

Con los datos de predicción obtenidos, se creó un *dataframe* que se transformó de formato *wide* a *long* utilizando la función `reshape2::melt`. Además, para facilitar la visualización de resultados, se discretizó la variable continua del eje z. Tal discretización constó de 9 niveles representados con la escala de color “BuPu” del paquete *RColorBrewer*.

Los mapas se crearon con la función `ggplot2::geom_contour_filled` en la que se introdujo los valores del *dataframe* de tipo *long*. Además, se agregaron líneas de contorno junto con anotaciones de los valores acotados por cada nivel de color para mejorar la interpretación de datos. Esto, mediante la función `metR::stat_contour2`. Este procedimiento se siguió para los mapas de motor que muestran diferencias entre ciudades, con la particularidad de que la tercera variable, calculada aparte, representó la diferencia absoluta entre los registros de la ciudad de Tulcán menos los de la ciudad de Manta.

Terminada esta fase de la metodología, se analizaron los resultados obtenidos, mismos que se presentan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación junto con su análisis y discusión. Primero, se indican los resultados generales referentes a la cinemática del vehículo y sus modos de operación, incluyendo todas las ciudades de estudio. A continuación, se analizan los puntos y zonas más frecuentes de operación del motor. Posteriormente, se presentan los mapas de motor para cada ciudad, incluyendo una comparación entre Tulcán, la ciudad con mayor altitud del estudio, y Manta, ubicada a nivel del mar. Finalmente, se discuten los factores de emisión calculados para cada ciudad en función de la distancia recorrida y la energía generada.

4.1 Cinemática del Vehículo y Modos de Operación

En esta sección se muestran los resultados de cinemática obtenidos para cada una de las rutas de estudio. Luego, se analiza la distribución temporal de los modos de operación del vehículo (ralentí, aceleración, desaceleración y crucero) calculada a partir de las variables cinemáticas registradas.

4.1.1 Cinemática del Vehículo

4.1.1.1 Cinemática de Rutas

En la Tabla 24 se muestran las características cinemáticas de las dos rutas realizadas en la ciudad de Tulcán. Ambas tuvieron una distancia recorrida y duración similar, con valores de 25 km y 51 minutos aproximadamente. Además, la velocidad máxima registrada para cada tramo (urbano, suburbano y carretera) se encuentra dentro de los valores comunes en cada uno de ellos. Sin embargo, la velocidad promedio tiende a ser más baja de lo esperado para cada tramo, especialmente en carretera. Ello es resultado de la metodología empleada para seleccionar las rutas, misma que carece de un estudio cinemático previo que estandarice cada subtramo. Por otro lado, la ganancia de elevación acumulada y la diferencia de altitud sugieren un terreno con varias pendientes tanto positivas como negativas, tal y como se mostró en el perfil de altitud de la ciudad (Figura 56).

Tabla 24. *Cinemática de rutas en la ciudad de Tulcán*

	Características de Rutas en Tulcán							
	Ruta 1				Ruta 2			
	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total
Duración (min)	30,87	5,55	13,43	51,13	27,47	9,33	14,55	52,45
Distancia (km)	6,69	4,43	14,39	25,76	4,93	5,57	14,37	25,13
Velocidad Máxima (km/h)	45,97	67,11	103,85	103,85	37,76	64,24	94,89	94,89
Velocidad Promedio (km/h)	12,84	47,74	64,17	30,10	10,64	35,61	59,17	28,61
Aceleración Positiva Promedio (m/s²)	1,01	1,02	1,05	1,02	1,01	1,05	1,05	1,03
Altitud Inicial (m)	2989,46	2959,57	2965,29	2959,04	2941,41	2973,99	2953,18	2973,35
Altitud Final (m)	2965,20	2989,33	2942,21	2951,80	2952,92	2941,21	2947,24	2953,06
Diferencia de Altitud (m)	24,26	29,76	23,09	7,24	11,51	32,77	5,94	20,29
Ganancia de Elevación Acumulada (m)	131,73	101,11	248,13	480,97	134,99	96,00	279,80	510,79

(Autoría propia)

Por otro lado, la Tabla 25 muestra los valores de cinemática del vehículo para la ciudad de Ibarra. Los tramos tuvieron distancias similares, con una diferencia de 1,5 km. Por otro lado, la duración de cada ruta fue de aproximadamente 48 minutos cada una. La velocidad promedio para cada tramo no refleja totalmente el comportamiento esperado para cada tramo, a pesar de que las velocidades máximas en cada uno de ellos sí lo hagan. Esto es consecuencia de la metodología utilizada. Por otro lado, la ganancia de elevación acumulada es mayor en la Ruta 1, aunque su diferencia con respecto a la Ruta 2 es mínima (7%).

Tabla 25. *Cinemática de rutas en la ciudad de Ibarra*

	Características Cinemáticas de Rutas en Ibarra							
	Ruta 1				Ruta 2			
	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total
Duración (min)	24,75	5,07	16,82	48,48	26,27	4,32	17,33	48,08
Distancia (km)	5,46	3,51	16,13	25,32	4,93	3,44	15,40	23,80
Velocidad Máxima (km/h)	61,89	77,82	100,67	100,67	44,08	72,98	86,22	86,22
Velocidad Promedio (km/h)	12,81	41,42	57,33	31,02	11,04	47,67	53,11	29,49
Aceleración Positiva Promedio (m/s²)	1,07	1,02	1,05	1,06	1,05	1,07	1,03	1,04

(Continúa)

Altitud Inicial (m)	2227,38	2262,27	2274,90	2272,03	2261,40	2252,20	2282,96	2261,00
Altitud Final (m)	2267,40	2227,24	2267,37	2265,91	2252,20	2282,67	2271,80	2271,71
Diferencia de Altitud (m)	40,02	35,03	7,53	6,12	9,20	30,47	11,16	10,71
Ganancia de Elevación Acumulada (m)	72,35	39,24	202,96	314,58	34,89	57,40	200,26	292,56

(Autoría propia)

En el caso de Sto. Domingo, los valores cinemáticos de los recorridos realizados se muestran en la Tabla 26 e indican diferencias significativas entre ellos. La Ruta 1 fue 2,66 km más larga y tuvo una duración mayor. Además, la ganancia de elevación acumulada de la Ruta 2, junto con el perfil de altitud anteriormente mostrado (Figura 59) indica que la mayoría del recorrido tuvo una pendiente negativa, por lo que los resultados obtenidos presentan un sesgo en cuanto a nivel de consumo y emisiones se refiere al obligar al motor a trabajar con una menor carga. Por otro lado, aunque las velocidades máximas para cada subtramo se encuentren dentro del rango cinemático característico de cada uno de ellos, la velocidad promedio, especialmente en carretera, no alcanza el valor esperado.

Tabla 26. *Cinemática de rutas en la ciudad de Sto. Domingo*

	Características Cinemáticas de Rutas en Sto. Domingo							
	Ruta 1				Ruta 2			
	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total
Duración (min)	25,13	6,68	7,02	40,87	19,47	4,50	5,68	36,33
Distancia (km)	8,16	5,92	6,25	20,68	4,94	3,18	6,58	18,02
Velocidad Máxima (km/h)	50,30	68,01	94,71	94,71	56,82	76,06	92,52	92,52
Velocidad Promedio (km/h)	19,21	53,15	53,17	30,12	14,67	42,18	69,05	29,30
Aceleración Positiva Promedio (m/s²)	1,06	1,00	1,05	1,05	1,05	1,16	1,14	1,09
Altitud Inicial (m)	564,90	639,62	645,10	640,65	493,17	538,70	492,62	466,36
Altitud Final (m)	525,44	645,71	564,90	516,50	538,80	492,94	411,40	411,50
Diferencia de Altitud (m)	39,46	6,09	80,20	124,15	45,63	45,75	81,22	54,86
Ganancia de Elevación Acumulada (m)	51,57	72,06	14,66	138,29	0,00	0,00	0,00	0,00

(Autoría propia)

Por último, la cinemática de las rutas llevadas a cabo en la ciudad de Manta muestra en la Tabla 27. La duración de cada ruta es significativamente distinta, con una diferencia del 45% entre la Ruta 1 y la Ruta 2. Además, la distancia recorrida también difiere bastante al haber una diferencia

de 8,89 km entre ellas. Esto puede deberse a la dificultad de conectar los distintos tramos de cada recorrido. Sin embargo, el tramo urbano tuvo mayor duración, por lo que la caracterización en tráfico real sigue siendo válida. Es importante mencionar que la ganancia de elevación acumulada para la Ruta 1 y Ruta 2 pueden no ser confiables por lo mostrado en el perfil de altitud de la ciudad (Figura 63). Los valores de velocidad promedio, al igual que en las otras ciudades, no reflejan en su totalidad el comportamiento cinemático típico de cada tramo. Sin embargo, existen registros de velocidades máximas que se encuentran dentro del rango característico esperado.

Tabla 27. *Cinemática de rutas en la ciudad de Manta*

	Características Cinemáticas de Rutas en Manta							
	Ruta 1				Ruta 2			
	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total
Duración (min)	28,18	6,60	6,77	868,90	17,82	5,42	5,50	833,92
Distancia (km)	9,63	4,78	8,87	21,05	5,07	5,18	6,96	12,16
Velocidad Máxima (km/h)	57,77	63,24	111,19	111,19	58,42	86,51	88,83	88,83
Velocidad Promedio (km/h)	20,26	43,12	78,71	33,43	16,70	57,41	75,86	35,73
Aceleración Positiva Promedio (m/s²)	1,02	1,19	1,23	1,08	1,01	1,03	1,00	1,01
Altitud Inicial (m)	16,61	5,96	58,78	16,61	14,35	22,57	44,40	14,35
Altitud Final (m)	14,36	22,29	69,31	69,31	37,61	44,57	56,54	56,54
Diferencia de Altitud (m)	2,25	16,33	10,53	52,70	23,26	22,00	12,14	42,19
Ganancia de Elevación Acumulada (m)	173,22	419,49	267,44	860,15	100,19	70,12	135,26	305,57

(Autoría propia)

4.1.1.2 Comparación de Cinemática Entre Ciudades

En la Figura 84 se muestran los valores cinemáticos promedio para cada ciudad representados en diagramas de barras. Tulcán fue la ciudad con rutas de mayor duración, sugiriendo que el tráfico encontrado fue mayor. Por otro lado, la distancia recorrida promedio fue similar para Ibarra, Tulcán y Manta, mientras que en Sto. Domingo esta tuvo un valor de 19,35 km, siendo la menor de todas. En cuanto a la ganancia de elevación acumulada, existe una diferencia significativa entre las rutas de Sto. Domingo y las demás ciudades. La velocidad máxima promedio es similar en todas las ciudades, existiendo una diferencia máxima de 7,06% entre Manta e Ibarra, mismas que presentan los valores máximos y mínimos respectivamente. Por último, la velocidad promedio se mantiene alrededor de los 30 km/h, a excepción de Manta que presenta un aumento del 15% con respecto a ese valor.

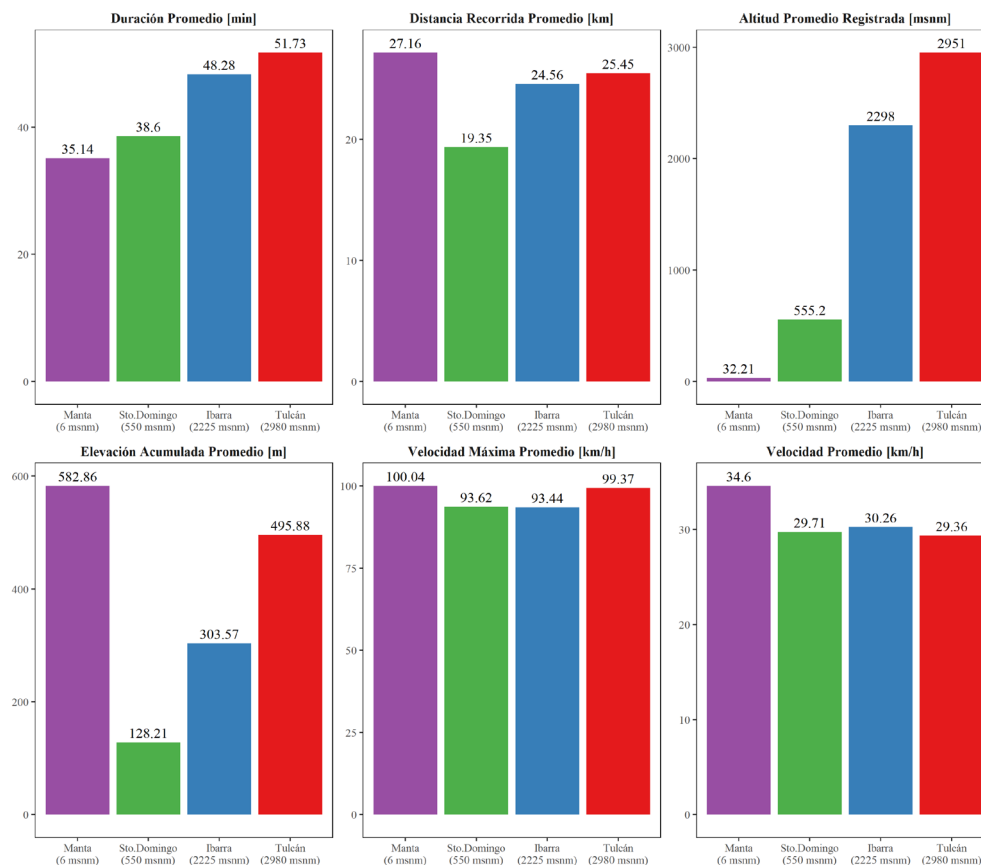


Figura 84. Valores cinemáticos promedio para todas las ciudades

(Autoría propia)

En general, las rutas presentan valores similares en cuanto a velocidad máxima, velocidad promedio y distancia recorrida. Sin embargo, las diferencias en cuanto a ganancia de elevación acumulada y duración de los recorridos generan un sesgo significativo en los resultados de consumo de combustible y emisión de CO₂ puesto que afectan directamente al desempeño del vehículo en condiciones de tráfico real.

4.1.2 Modos de Operación del Vehículo

La distribución temporal de los modos de operación (ralentí, aceleración, desaceleración y crucero) con respecto a la duración total de las rutas de estudio se muestra en la Figura 85, mientras que los valores específicos que determinan dicha distribución temporal se detallan en el Anexo 4.

La Figura 85 diferencia claramente los subtramos y el comportamiento cinemático típico del vehículo en cada uno de ellos. Por ejemplo, de los períodos a ralentí, se espera que durante los

tramos de carretera sean prácticamente nulos, que en urbanos tenga una mayor presencia y en los suburbanos se encuentre entre el medio. Este modo de operación, en promedio para todas las rutas, ocupa el 18% de la distribución total para caminos urbanos, siendo 2,25 veces mayor que el presentado en tramos suburbanos. Adicionalmente, todos los tipos de tramo en cada una de las rutas de estudio presentan patrones similares, indicando que la caracterización de estos en condiciones de tráfico real fue exitosa.

Por otro lado, la Figura 85 indica que para todos los tramos la operación en velocidad crucero es la que predomina, encontrándose generalmente alrededor del 60%. Además, la distribución temporal de este modo de operación es mayor al recorrer caminos suburbanos o carreteras. Cabe mencionar que en la segunda ruta en Sto. Domingo no se sigue este patrón, ya que la parte suburbana de la ruta tiene una distribución temporal 15% menor con respecto a su tramo urbano.

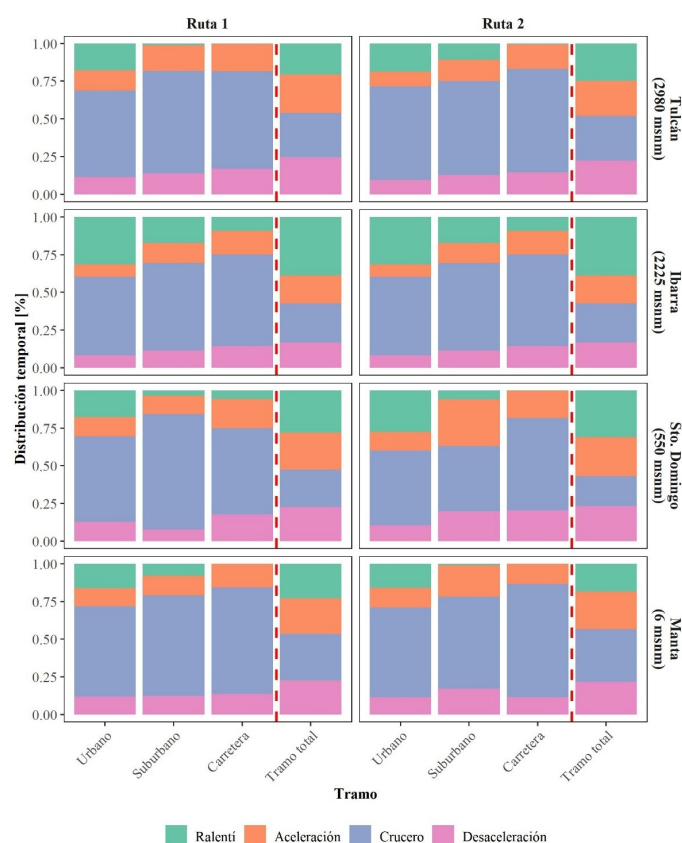


Figura 85. Distribución temporal de modos de operación con rutas y ciudades diferenciadas

(Autoría propia)

En el caso de la aceleración positiva, esta es predominante en tramos suburbanos y de carretera, encontrándose siempre por encima del 13%. Por su parte, los períodos de desaceleración tienen patrones similares para todas las rutas, con excepción de Sto. Domingo. Esto, debido a que en esa ciudad la cantidad de rompe velocidades y semáforos encontrados en tramos de carretera y suburbanos fue considerable.

Para el caso de Tulcán, tomando en cuenta los tramos totales, predominan los períodos a ralenti, con un promedio de 23%; y los de aceleración, con un promedio de 24%. La elevada cantidad de períodos de aceleración sugiere una topografía más accidentada, lo que es coherente con el perfil de altitud de esta ciudad. Para Ibarra, la operación a ralenti ocupa la mayor cantidad de la distribución temporal, con un promedio de 39%. Tal aumento puede deberse a la presencia de semáforos durante el tramo de carretera, mismos que tuvieron duraciones considerables. El caso de Sto. Domingo es similar al de Tulcán, con períodos a ralenti y aceleración representando la mayor cantidad de tiempo en rutas (con promedios de 29% y 25%, respectivamente). Sin embargo, en la ciudad de Manta se evidencia menor predominancia de los períodos de ralenti y aceleración que en las otras ciudades, teniendo promedios de 21% y 24% respectivamente. Estos datos permiten estimar el nivel de tráfico existente en cada ciudad. Así, las rutas en Ibarra contaron con mayor cantidad de tráfico. A ella le siguen las ciudades de Tulcán y Sto. Domingo. Por último, Manta tuvo un mejor flujo vehicular en promedio. Esto último debe tenerse en cuenta para el análisis de consumo de combustible.

Esta sección de resultados, en cuanto a caracterización de los tramos y rutas completas se refiere, son similares a los presentados en los estudios de Rosero Obando et al. (2024) y Murillo & Usca (2021c) donde se registraron valores cinemáticos y se evaluó el consumo de combustible en condiciones de tráfico real en las ciudades de Ibarra y Riobamba, respectivamente.

4.2 Frecuencias de Operación de Motor

Continuando con el análisis de consumo de combustible en condiciones de tráfico real del vehículo seleccionado, se evaluaron las zonas de mayor frecuencia de operación dentro del rango de régimen y par efectivo registrado durante la campaña experimental. Este análisis permite validar la selección de rutas al confirmar que los patrones típicos de operación de motor bajo las condiciones impuestas por los tramos son los esperados. Asimismo, enriquece el estudio de

consumo de combustible permitiendo identificar zonas de mayor eficiencia. En las secciones subsiguientes, se analizan y discuten los mapas de frecuencia elaborados, diferenciando tramos completos y sub – rutas para cada ciudad.

4.2.1 Operación de Motor en Tulcán

En la Figura 86 se muestran los puntos de operación experimentales registrados en la ciudad de Tulcán, destacando las zonas de mayor frecuencia (representadas mediante escala de grises y *rugplots* marginales). Para profundizar el análisis, se presentan tres líneas clave: la curva de par máximo del motor (rojo), que define el límite superior de operación a plena carga; el par efectivo promedio (azul), como referencia de la carga promedio registrada; y el régimen de giro promedio (naranja), que indica el comportamiento del motor. El panel A muestra los puntos de operación distinguiendo el tipo de tramo (urbano, suburbano y carretera), mientras que el B lo hace para el conjunto de datos completo, permitiendo visualizar el desempeño global del motor.

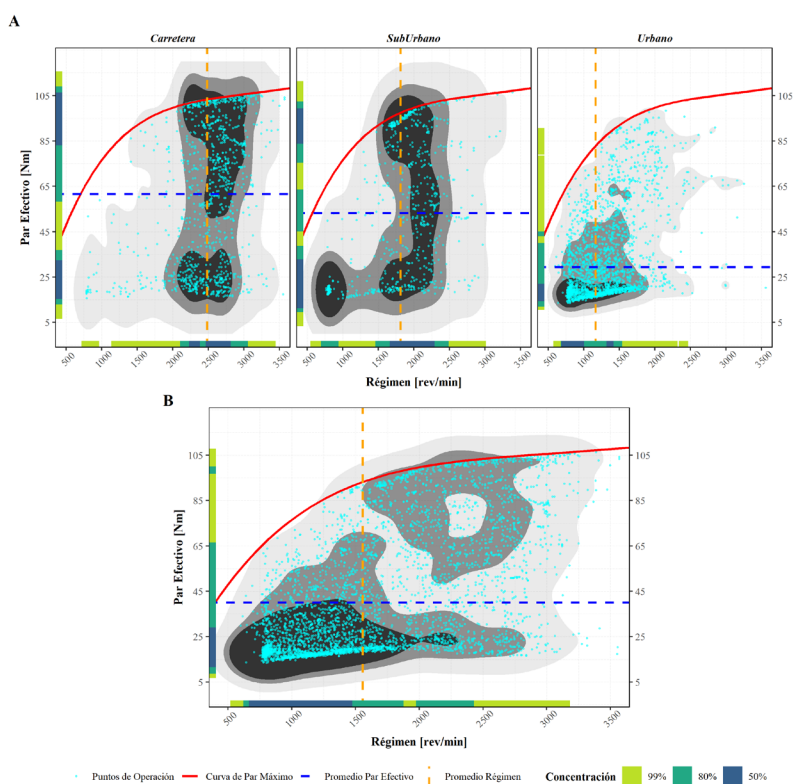


Figura 86. Frecuencia de operación de motor en Tulcán (2980 msnm)

(Autoría propia)

La Figura 86, panel A, indica diferencias marcadas en las zonas de operación más frecuentes dependiendo del tipo de tramo recorrido. Esto sugiere que existe variación en la eficiencia del motor para cada caso. En el tramo de carretera, se observa que el 50% de los datos recolectados se encuentran dentro de un régimen de giro entre 2250 y 2750 rpm aproximadamente, con pares efectivos ubicados en dos rangos: de 15 Nm a 33 Nm y de 85 Nm a 107 Nm aproximadamente. Esta zona de alta densidad tiende a ser más eficiente al estar más cerca de la banda de par máximo del motor (encontrada a 4000 – 5500 rpm). Asimismo, el par efectivo promedio al operar en carretera fue de 61,54 Nm, correspondiente al 57% del par máximo efectivo que puede generar el motor, siendo este el valor más alto alcanzado durante toda la campaña experimental en Tulcán. Por su parte, el régimen de giro alcanzó un valor promedio de 2483,2 rpm, encontrándose lejos del régimen de operación óptimo. Esto indica que, si bien la eficiencia en carretera puede ser mayor que en los demás tramos, los hábitos de conducción tuvieron un impacto negativo en ella.

En el sector urbano, el par efectivo promedio disminuyó un 52% con respecto al de carretera, con un valor de 29,44 Nm. Además, el régimen de giro promedio fue de 1168 rpm, siendo sólo 570 rpm por encima del ralentí. Esto se refleja en la alta concentración de puntos por debajo de 1000 rpm, indicando largos períodos a ralentí. Además, el 80% de los datos se ubicaron en zonas de baja carga del motor, misma que tiene un valor promedio de 36%, lo que sugiere una operación ineficiente predominante con registros prácticamente inexistentes en regímenes elevados.

Por otro lado, en la zona suburbana se evidencia un comportamiento intermedio entre lo presentado en carretera y tramos urbanos: el 99% de datos se concentran dentro del rango [600, 3000] rpm y [5, 110] Nm. Las zonas de alta densidad equivalentes al 50% de datos incluyen regímenes de giro medios con pares efectivos altos como zonas de bajo régimen y poca carga. El par efectivo promedio fue de 53,21 Nm, y el régimen promedio de 1813 rpm, ubicándose entre lo obtenido en tramos de carretera y urbanos.

En el caso del panel B de la Figura 86 (conjunto global de datos) la zona de mayor densidad ocupa regímenes desde las 600 hasta las 1875 revoluciones por minuto y pares efectivos de 8 Nm a 35 Nm aproximadamente. Tal predominancia es producto de la cantidad de puntos de operación pertenecientes al tramo urbano y suburbano. El par efectivo promedio global en la ciudad de Tulcán fue de 40,05 Nm (37% del par máximo), mientras que el régimen promedio fue de 1556 rpm (61% por debajo de la banda de operación óptima del motor). Este comportamiento es consistente con

lo obtenido en otras rutas en condiciones de tráfico real (Rosero Obando et al., 2024;Cuzco & Espinosa, 2023), donde la operación del motor del vehículo dentro de sus rangos de mayor eficiencia es limitada, comprometiendo el consumo de combustible.

4.2.2 Operación de Motor en Ibarra

Al igual que con el caso de la ciudad de Tulcán, la Figura 87 muestra zonas de alta densidad de operación de motor para la ciudad de Ibarra. Asimismo, la figura se divide en dos paneles: el A, diferenciando tramos; y el B, que agrupa todos los registros para la ciudad. Las líneas típicas anteriormente explicadas también se encuentran presentes. Con este gráfico, se evalúa la similitud de zonas frecuentes de operación con respecto a las demás ciudades.

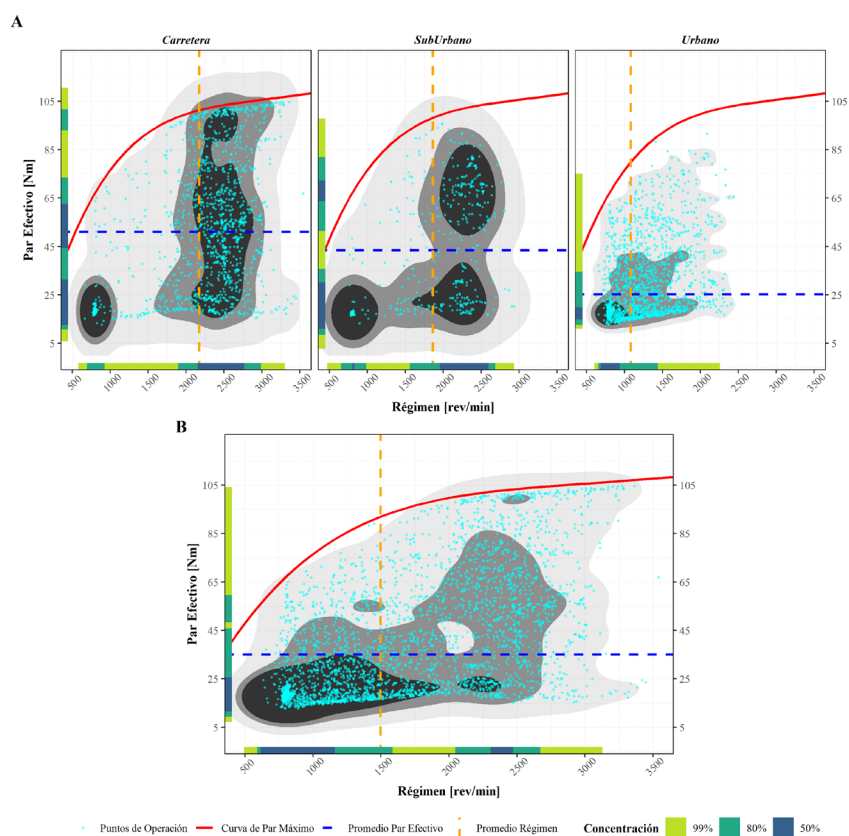


Figura 87. Frecuencia de operación de motor en Ibarra (2225 msnm)

(Autoría propia)

Para el caso de carretera, el panel A de la Figura 87 muestra una diferencia importante con respecto a lo observado en Tulcán: existen registros de operación a ralentí. Esto último se debe a la presencia ya mencionada de semáforos durante este tramo. Sin embargo, el patrón característico de carretera

se mantiene presente, agrupando el 50% de datos en rangos de régimen y par efectivo más elevados que en el resto de la ruta. Tales rangos se encontraron desde 2200 a 2750 rpm y de 45 a 62 Nm aproximadamente. Durante este tramo, el régimen promedio fue de 2175 rpm, mientras que el par efectivo promedio fue de 51,07 Nm. El rango de operación del motor se mantuvo por debajo del óptimo, siendo 46% menor a las revoluciones de la banda de par máximo (4000 – 5500 rpm). Por otro lado, el promedio de carga motor fue de 51% y el tercer cuartil correspondió al 73%, indicando que, incluso en el tramo de mayor eficiencia, no se operó a plena carga, reduciendo las prestaciones máximas capaces de ofrecer el motor. Lo anteriormente mencionado, confirma nuevamente que el patrón mostrado en carretera es el esperado, siendo este el que presenta regímenes de operación y cargas más elevados, teniendo zonas de alta densidad más amplias que en otros tipos de tramo.

En cuanto al tramo suburbano, el par efectivo y el régimen de giro promedio fueron de 43,41 Nm y 1864 rpm, respectivamente. Además, al igual que en Tulcán, el gráfico muestra un patrón de operación mixto entre lo observado en carretera y tramo urbano, con baja concentración de puntos alrededor de la curva de operación máxima (a plena carga). De hecho, el tercer cuartil de esta variable corresponde al 67% y el promedio a 45%, sugiriendo una conducción relajada y sin aceleraciones máximas requeridas por el conductor. En este tramo, el 80% de los datos de régimen de giro se agrupan en dos rangos aproximados: entre 600 a 1000 rpm y entre 1550 a 2600 rpm. Por otro lado, los dos rangos que concentran al 80% de los datos de par efectivo se encuentran entre 13 a 35 Nm y entre 53 a 83 Nm. A diferencia de lo presentado en el tramo de carretera, donde los datos se muestran más dispersos y ocupando una mayor área dentro del plano, en el tramo suburbano el rango de operación es más compacto, sugiriendo una sub – operación del motor y sus prestaciones.

Por último, el tramo urbano muestra un rango de operación aún más reducido y aglomerado que en caminos suburbanos: el 80% de los datos se agrupan en una zona de bajo régimen y baja carga. El par efectivo promedio fue de 25,3 Nm, siendo 50 % menor que el registrado en carretera y concentrándose principalmente entre los 13 y 33 Nm. Además, el régimen de giro promedio fue de 1085,8 rpm, con un máximo de 2441 rpm. Estos valores reflejan, períodos constantes a ralentí y operación ineficiente, alejada de la banda de régimen óptimo. De hecho, el 99% de los registros se concentran dentro del rango de 600 a 2750 rpm. Por ello, este tramo es considerado el más ineficiente.

El conjunto total de datos (mostrado en la Figura 87, panel B), indica lo esperado para el funcionamiento del vehículo en condiciones de tráfico real: la zona de mayor densidad corresponde a bajos regímenes con pares efectivos no mayores a los 40 Nm. Las revoluciones promedio registradas fueron de 1497 rpm con un par efectivo promedio de 35 Nm. Esto se debe a la alta frecuencia de períodos a ralentí encontrados en todos los tramos, por lo que debe tenerse en cuenta para el análisis de consumo de combustible general. Cabe mencionar que, si bien la zona de operación se extiende por casi todo el plano de coordenadas mostrado, los períodos a plena carga y régimen de giro óptimo son relativamente escasos. Esto es evidente al mirar que el 80% de datos de régimen no superan las 2700 rpm ni los 60 Nm. Con este análisis final, se corrobora lo mostrado en los anteriores estudios con los que se contrastaron los resultados de la ciudad de Tulcán.

4.2.3 Operación de Motor en Sto. Domingo

Siguiendo la misma estructura de análisis, en la Figura 88 se presenta la frecuencia de operación de motor para la tercera ciudad de estudio: Sto. Domingo. Los paneles A y B, que diferencian la agrupación de registros, y las líneas típicas roja, azul y naranja se presentan nuevamente.

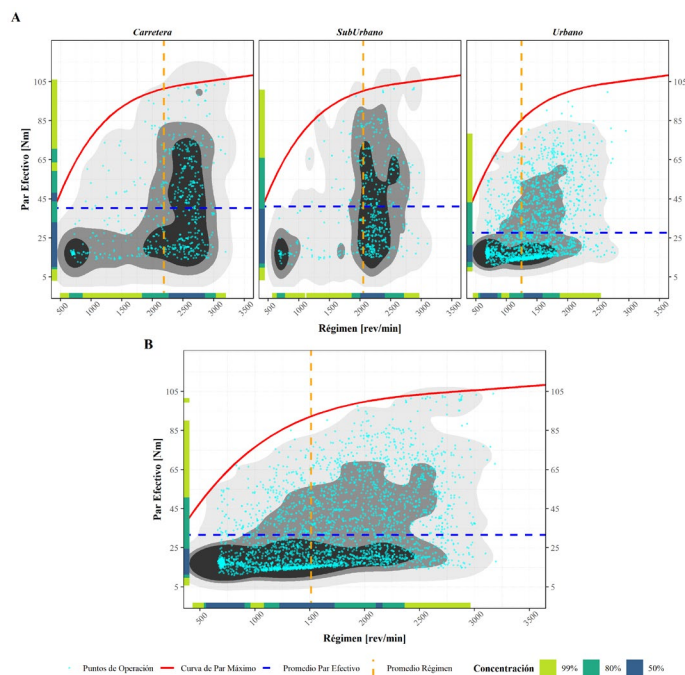


Figura 88. Frecuencia de operación de motor en Sto. Domingo (550 msnm)

(Autoría propia)

El panel A de la Figura 88 muestra patrones similares a los observados en las rutas de Ibarra. Sin embargo, existen diferencias clave en los valores de par y régimen entre tramos. En el tramo urbano, si bien la zona de mayor densidad permanece en rangos de bajo régimen y baja carga, la distribución es más uniforme (99% de datos). Esto puede ser debido a que el 75% de los valores de carga motor son menores o iguales a 40% con una media igual a 34%. El par efectivo promedio fue de 27,63 Nm y el régimen de giro alcanzó las 1247 rpm, mostrando una operación predominantemente ineficiente al igual que en las otras ciudades estudiadas. El 50% del total de datos se agrupó en regímenes de giro alrededor de 600 y 1400 rpm, mientras que el par efectivo se concentra mayormente alrededor de los 17 Nm. De hecho, el 99% de los datos se ubican debajo de 2600 rpm y par efectivo de 85 Nm, indicando que el motor operó lejos de su zona óptima. Específicamente el régimen de giro y par efectivo promedios fueron 69% y 74% menores al máximo posible, limitando la eficiencia energética del motor.

En el tramo suburbano, la operación del motor se concentró tanto en zonas a ralentí como a revoluciones medias, con ocasionales demandas de carga máxima. Esto debido a la combinación de carreteras con poco tráfico no aptas para altas velocidades, con paradas en semáforos e intersecciones. El par efectivo promedio registrado fue de 41,06 Nm y el régimen promedio de 2052,5 rpm. En este caso, el 80% de los datos de régimen se encuentran entre 1800 a 2250 rpm, mientras que el 50% del par efectivo pertenece al intervalo entre 13 y 43 Nm aproximadamente. Ello sugiere un mejor rendimiento del motor al acercarse a la banda de operación óptima. Además, tal comportamiento dentro del tramo suburbano es similar al analizado en ciudades anteriores.

En el caso del tramo de carretera, se observó un patrón similar al de Ibarra, con un par efectivo promedio de 40,24 Nm, apenas 2% menor que en el tramo suburbano, y un régimen de giro promedio de 2189,6 rpm, superior en un 7%. Esto sugiere que las condiciones de manejo en ambos tipos de tramo fueron similares, probablemente influenciadas por la elevada presencia de rompe velocidades, semáforos y radares de control de velocidad. Además, el perfil de altitud mostrado anteriormente en la Figura 60 sugiere que las diferencias topográficas entre ambos tramos son mínimas. Otro dato que confirma dicha similitud es la agrupación del 80% de datos de par efectivo, que varió entre 13 y 65 Nm en ambas secciones. Por otro lado, el régimen de giro en el tramo de carretera se agrupó alrededor de las 2600 rpm. En conclusión, los tramos carretera y suburbano no tuvieron diferencias significativas en cuanto a frecuencias de operación se refiere,

por lo que es de esperarse que ambos provean valores de eficiencia similares al conjunto total de datos.

El panel B de la Figura 88 muestra que el par efectivo y el régimen de giro promedios para todo el conjunto de datos fueron de 31,57 Nm y 1511,9 rpm, respectivamente. El régimen se concentró principalmente en dos zonas: aproximadamente a 600 y 1350 rpm, reflejando la alta influencia del sector urbano en el conjunto total. Por su parte, el 80% de datos de par se agruparon en el rango de 6 a 33 Nm, haciendo que las zonas de mayor densidad se encuentren en regiones correspondientes a baja carga motor (con promedio 36%) y bajo régimen. Este último, a pesar de ocupar un rango de revoluciones más amplio, se mantiene muy por debajo de la banda óptima (4000 a 5500 rpm). Estas condiciones de funcionamiento, caracterizadas por una operación predominantemente ineficiente, limitan la eficiencia energética del motor, aumentando el consumo de combustible y contribuyendo en gran parte a la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente en entornos urbanos con demandas de carga baja.

4.2.4 Operación de Motor en Manta

Finalizando el análisis por ciudades, la Figura 89 muestra la distribución de zonas de alta densidad para la ciudad costera: Manta. A diferencia de las anteriores ciudades, la elevada presión atmosférica puede tener un mayor impacto en las condiciones de operación del motor registradas en cada tramo. Nuevamente, el gráfico incluye la distribución de puntos de operación, zonas de alta densidad de frecuencia, curvas de par máximo y líneas promedio de par efectivo y régimen de giro.

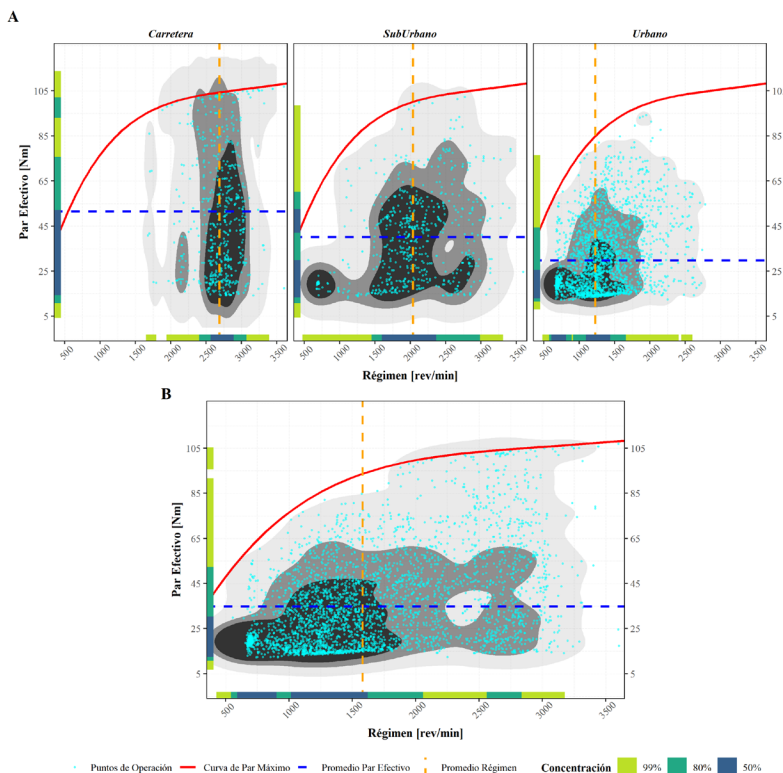


Figura 89. Frecuencia de operación de motor en Manta (6 msnm)

(Autoría propia)

Para el tramo urbano, el panel A de la Figura 89 muestra una elevada concentración de datos alrededor de regímenes y pares efectivos bajos, similar a lo observado en las otras ciudades. El régimen promedio fue de 1228,2 rpm, con el 80% de sus datos dentro del rango de 600 a 1600 rpm. En cuanto al par efectivo, su promedio se ubica en los 29,79 Nm, concentrándose en el rango de 13 a 45 Nm aproximadamente (80% de datos). Además, el patrón observado se mantiene lejos de la zona de operación óptima del motor, con una carga promedio de 36%. Cabe mencionar que, aunque la distribución uniforme anteriormente presentada en Sto. Domingo se repite, los períodos a ralentí y baja carga siguen predominando, reflejando las condiciones típicas de conducción urbana.

Por su parte, el tramo suburbano presenta un régimen de giro promedio 66% mayor que el del tramo urbano, alcanzando 2037,2 rpm. Además, si bien se observan zonas a ralentí, el 80% del tiempo total de operación se registró en un régimen entre 1500 rpm y 3000 rpm, similar a los patrones suburbanos ya analizados. El par efectivo promedio fue de 40,13 Nm, un 35% mayor al urbano, con dos zonas de concentración destacadas: entre 13 y 30 Nm y entre 42 a 53 Nm

aproximadamente (50% de datos). Ello refleja una mayor demanda para sobrepasar las fuerzas de resistencia al movimiento del vehículo. La carga del motor rara vez se acerca a la máxima, teniendo un promedio de 41% y un tercer cuartil correspondiente al 53%. Este patrón, con una amplia superficie ocupada por los puntos de operación, es el resultado de condiciones de operación mixtas, con tráfico moderado, paradas ocasionales y segmentos fluidos.

Por último, el tramo de carretera destaca un patrón marcado de regímenes agrupados entre 2500 y 3000 rpm (80% de datos) y un régimen promedio de 2688 rpm, siendo 119% mayor al presentado en la urbe. El par alcanzó un promedio de 51,47 Nm (73% mayor al urbano). Además, sus rangos son mucho más amplios que en los anteriores tramos: el 99% de datos cubren el espectro completo de par efectivo y el 80% del conjunto pertenece mayoritariamente al rango desde los 13 Nm a los 75 Nm. Por otro lado, la carga de motor tuvo un promedio de 50%. Sin embargo, a pesar de ser únicamente 21% mayor a la presentada en el sector suburbano, menos de un cuarto de los datos estuvieron por debajo del 70% de carga. Ello indica la característica operación a velocidades crucero, nula operación a ralentí y elevada carga, típico de conducción en carretera. Cabe mencionar que, nuevamente, los hábitos de conducción jugaron un papel limitante en la eficiencia energética del vehículo al influir en el régimen promedio de operación. Por lo tanto, a pesar de que el tramo en carretera presenta características de mejor funcionamiento en cuanto a eficiencia se refiere, este sigue estando lejos de ser el más favorable.

El panel B, con el conjunto total de datos, muestra la influencia de los tramos suburbanos y urbanos en la operación global del motor, manteniéndola en rangos de baja eficiencia. El régimen promedio alcanzó las 1582,2 revoluciones por minuto, mientras que el par efectivo los 34,77 Nm. El régimen se agrupó principalmente entre 600 y 2100 rpm, mientras que el par efectivo varió entre los 13 y 53 Nm, ambos para el 80% de datos. El gráfico también muestra sub – operación en cuanto a carga motor se refiere. Esta tuvo un promedio total de 39% y menos de un cuarto de los datos fueron mayores al 49% de carga. Este tipo de operación en condiciones de tráfico real es consistente con lo presentado en estudios realizados en Ecuador (Cuzco & Espinosa, 2023; Rosero Obando et al., 2024) y otros de ámbito internacional (Rosero et al., 2020b; Nylund et al., 2007). Es importante mencionar que los últimos dos estudios se realizaron en vehículos pesados. Sin embargo, las condiciones de tráfico real se mantuvieron presentes.

4.2.5 Comparación de Operación Entre Ciudades

Para analizar el comportamiento global del vehículo entre ciudades de estudio, se compararon los valores medios de régimen, par y carga registrados en cada una de ellas. La Figura 90 muestra dichos valores para el conjunto global de cada ciudad, además del tercer cuartil de carga.

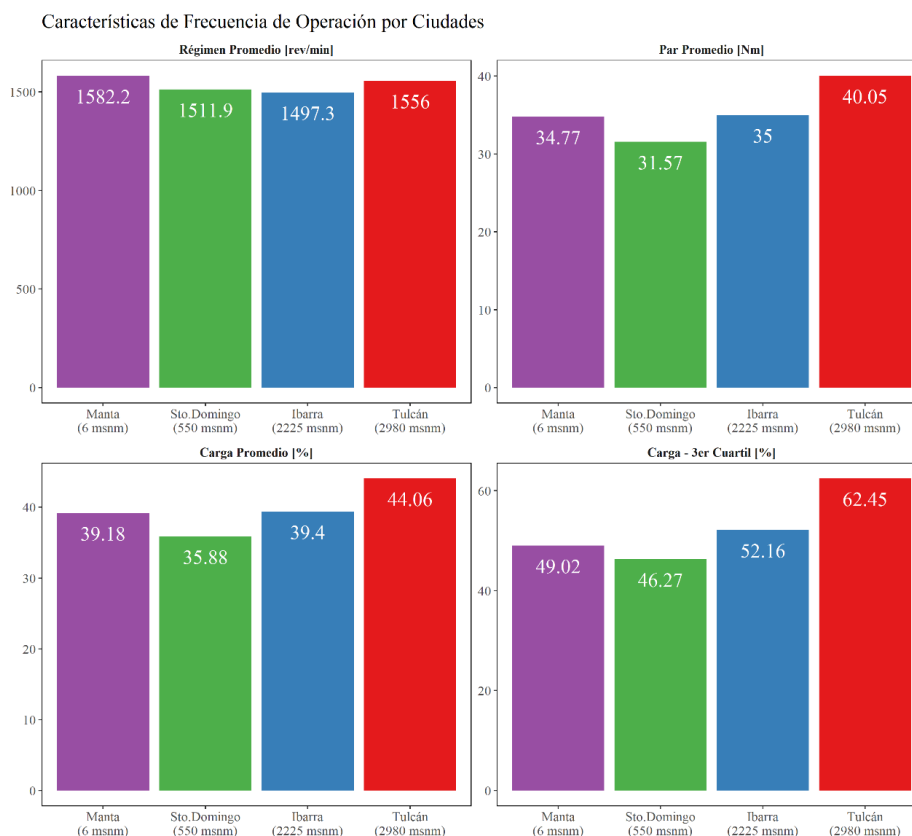


Figura 90. Valores de operación del conjunto total de datos para cada ciudad de estudio

(Autoría propia)

El primer panel indica que el régimen promedio no varió significativamente entre ciudades, con una diferencia máxima del 6% entre Manta e Ibarra. Ello sugiere un hábito de conducción relativamente consistente en todas las ciudades, aunque es probable que las paradas más frecuentes en zonas suburbanas y carretera en Ibarra y Sto. Domingo sean la causa de un promedio de régimen más bajo. En contraste, tanto Tulcán como Manta no presentaron paradas en carretera, favoreciendo el registro de un régimen de giro promedio más elevado.

El par efectivo promedio, en cambio, presenta variaciones más marcadas. Tulcán alcanzó un par promedio 15% mayor al de Manta y 27% mayor al de Sto. Domingo. Esta mayor demanda puede

atribuirse principalmente a la topografía de la ciudad, misma que, según el perfil de altitud mostrado en la Figura 56, es la más accidentada de todas. Por otro lado, Ibarra y Manta presentan terrenos más nivelados, lo que se traduce en pares efectivos similares y más bajos que en Tulcán.

Finalmente, los gráficos de carga muestran que Tulcán demandó mayor cantidad de mezcla aire – combustible para operar, sugiriendo que la menor densidad de aire característica de una mayor altitud influyó en el desempeño del vehículo. Es decir, para mantener un desempeño similar en altura, motor requirió de una mayor carga durante más tiempo. Además, las condiciones topográficas de Tulcán también contribuyeron con el aumento de la demanda de carga.

Es importante mencionar que, conforme aumenta la altitud, lo esperado es que la carga requerida por el motor también sea mayor. Sin embargo, esta no sólo es influenciada por la densidad de aire, sino también por otros factores como la topografía (ya mencionada), la humedad y la fricción entre el neumático y el terreno. En el caso de Sto. Domingo, durante la campaña experimental se presentaron ligeras lloviznas tras un día de lluvia. Por ello, es posible que el aumento de la cantidad de oxígeno presente en el aire (debido al vapor de agua) haya mejorado la combustión en el motor, requiriendo una menor carga. Además, el terreno más resbaladizo, resultado de las recientes lluvias, pudo haber contribuido al registro de un promedio de carga menor al facilitar el desplazamiento del vehículo en carretera.

4.3 Mapas de Motor Generados

En esta tercera sección de resultados se presentan los mapas de motor para comparar el consumo de combustible y el rendimiento general del vehículo a diferentes alturas. Inicialmente, se evalúa el rendimiento energético mediante mapas de motor en términos de energía al freno. Posteriormente, se analizan las tasas de consumo de combustible y emisión de CO₂. Cabe mencionar que el suavizado de interpolación de datos (20%) y la eliminación de aproximadamente el 13% de los registros pudo comprometer la validez de los resultados que se presentan a continuación.

4.3.1 Mapas en Términos de Energía al Freno

4.3.1.1 Eficiencia Térmica al Freno (BTE)

La Figura 91 muestra los mapas de motor de eficiencia térmica al freno (BTE) para todas las ciudades de estudio. Al igual que en los anteriores mapas, las zonas de variación de eficiencia se representan mediante una escala de colores discreta y contornos. Estos gráficos permiten evaluar la variación de eficiencia con respecto a la altitud, profundizando el análisis de consumo de combustible.

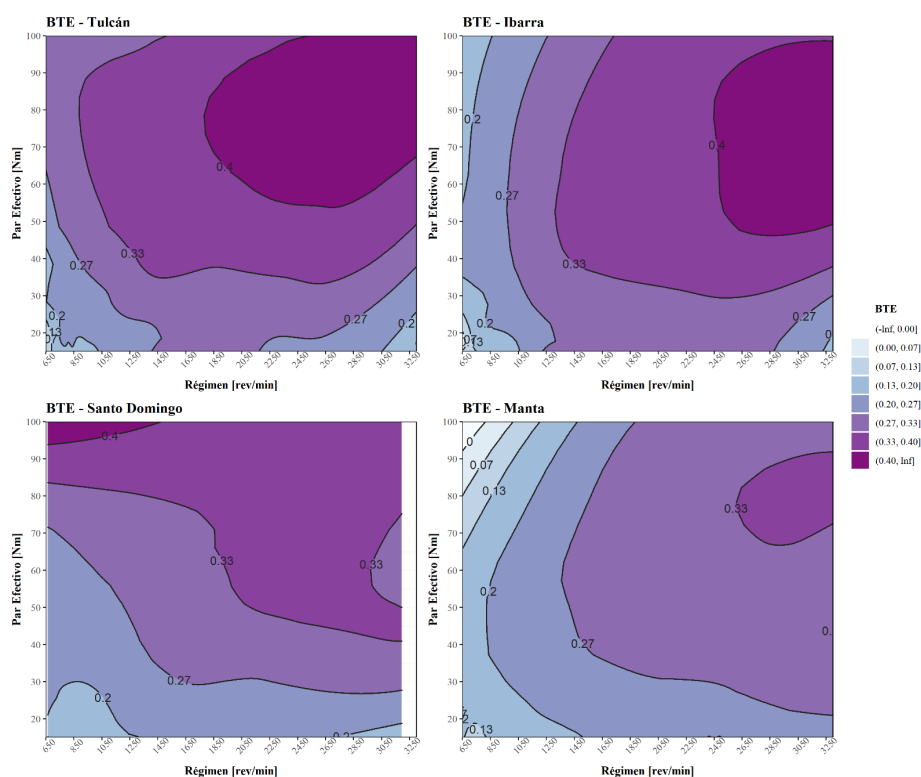


Figura 91. Mapas de eficiencia térmica al freno para todas las ciudades

(Autoría propia)

En primer lugar, los resultados indican que la eficiencia tiende a disminuir conforme la altitud disminuye. Para la ciudad de altura, Tulcán, la zona de operación con altas cargas y regímenes más elevados presenta eficiencias mayores al 40%. En contraste, en Manta, la ciudad costera, la misma zona presenta en su mayoría eficiencias de 27% a 33%. Estos valores elevados, siendo hasta 60% mayores a los teóricos en algunos casos, son el resultado de la estimación de par efectivo, mismo que depende de la carga de motor y no es un valor medido directamente.

Por otro lado, al analizar las zonas más frecuentes de operación de motor, caracterizadas por regímenes inferiores a 1500 rpm y pares efectivos por debajo de los 40 Nm, los valores de eficiencia se encuentran alrededor del 27%, teniendo más coherencia con el valor teórico esperado. Ello refuerza la idea de que la estimación de carga en condiciones más extremas puede terminar sobreestimando la eficiencia térmica al freno.

La disminución progresiva de eficiencia térmica al freno mostrada en la Figura 92 sugiere que el motor enfrentó mayores dificultades para convertir la energía térmica del combustible en energía útil a medida que la altitud disminuía. Si bien en altitudes menores la elevada densidad de aire favorece la combustión, también aumenta las pérdidas por bombeo debido a la resistencia del aire en la admisión.

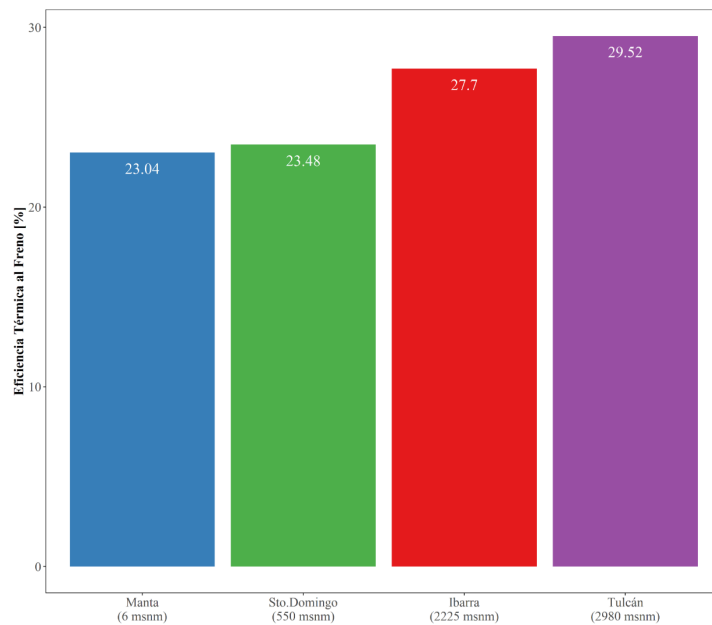


Figura 92. Eficiencia térmica al freno promedio para todas las ciudades

(Autoría propia)

Además, si se tiene en cuenta que a mayores altitudes se operó frecuentemente con mayor carga (Figura 90), es adecuado suponer que los rangos de operación más eficiente (a plena carga) también fueron mayores, favoreciendo la eficiencia térmica. Así, las zonas de mayor frecuencia de operación son dominadas por Tulcán, con una diferencia del 5% en con respecto a lo registrado en Manta (Figura 93).

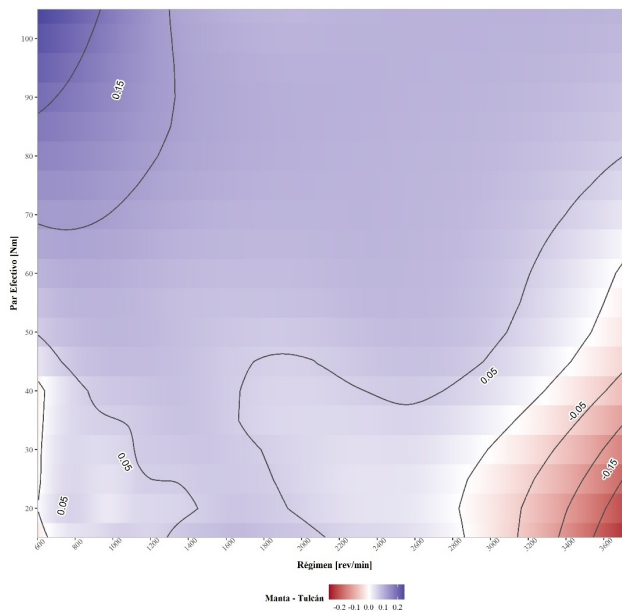


Figura 93. *Diferencia de BTE entre Tulcán (2890 msnm) y Manta (6 msnm)*

(Autoría propia)

Asimismo, el aumento en la densidad de aire a nivel del mar provocó que el motor quemase mayor cantidad de combustible incluso a ralentí. Sin embargo, el par efectivo generado bajo tales condiciones permaneció constante, puesto que no se necesitó mover el vehículo. Por tanto, la relación entre el incremento en la eficiencia térmica al freno y una mayor altitud puede explicarse por la combinación de una reducción en pérdidas por bombeo, operación a mayor carga (debida a la topografía, por ejemplo), las condiciones de tráfico real y la metodología usada para estimar el par efectivo.

4.3.1.2 Consumo Específico al Freno (BSFC)

Los mapas de motor de consumo específico al freno (BSFC) se muestran en la Figura 94. Nuevamente, el cambio de esta variable se representa mediante contornos y una escala de colores discreta. Las gráficas permiten evaluar la variación de consumo de combustible con respecto a la energía generada, ampliando el análisis de consumo de combustible a diferentes altitudes.

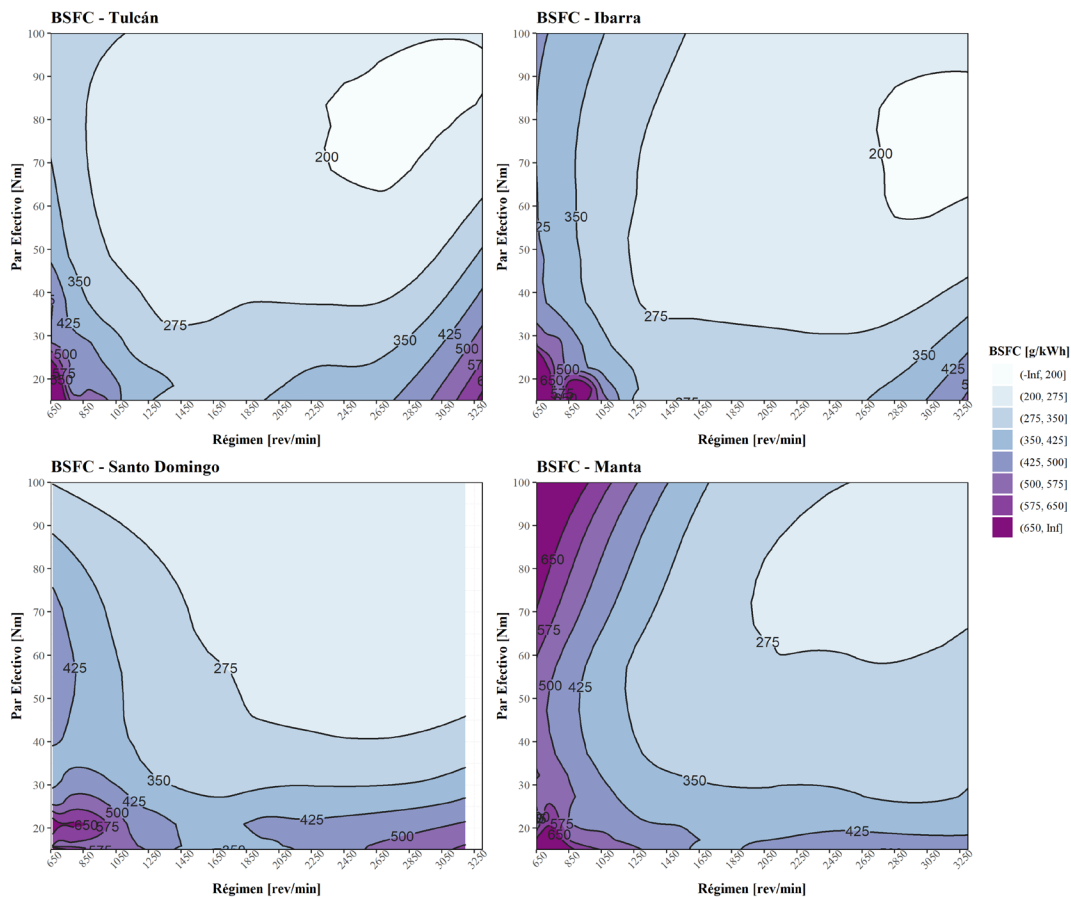


Figura 94. Mapas de consumo específico al freno (BSFC) para todas las ciudades

(Autoría propia)

La Figura 94 refuerza el análisis realizado en el apartado de eficiencia térmica al freno: en las zonas de mayor frecuencia de operación de motor, el consumo de combustible es mayor con respecto a la energía generada conforme la altitud disminuye. Ello se debe a que la energía útil (que parte de la potencia efectiva suministrada) no varía, a diferencia del consumo de combustible que aumenta al quemarse más mezcla aire – combustible debido al incremento de densidad de aire. Por otro lado, la gráfica mostrada, especialmente la de la ciudad de Ibarra, es consistente con lo presentado en otro estudio (Rosero Obando et al., 2024), dónde se evaluó el consumo de combustible en un vehículo similar en la misma ciudad, por lo que los resultados de las otras ciudades, al usar la misma metodología, son confiables.

Es importante mencionar nuevamente que la densidad de aire y presión atmosférica no son los únicos factores que pueden influenciar el consumo de combustible de un vehículo, especialmente si este opera en condiciones de tráfico real. Por ejemplo, es de esperarse que, en Tulcán, al ser una

ciudad más elevada y con temperaturas más bajas, el intercambio de calor entre el motor y el ambiente sea mayor con respecto al que se presentaría en Manta, con temperaturas ambiente más elevadas. Así, debido a que la transferencia de calor favorece gradientes térmicos más elevados, el motor debería compensar la pérdida de energía térmica aumentando el consumo de combustible para operar a temperatura óptima. Sin embargo, lo mostrado en las gráficas de consumo específico no refleja este comportamiento, sugiriendo que existen factores más predominantes.

La discrepancia en el consumo específico al freno y su disminución progresiva también puede verse reflejada en los valores promedio registrados para cada ciudad de estudio (Figura 95). En Sto. Domingo, por ejemplo, se tiene un consumo específico promedio 3% mayor al de Manta, indicando que se quemó mayor cantidad de combustible para generar la misma cantidad de energía. Por otro lado, el consumo específico en Manta fue 28% mayor al de Tulcán, con un promedio de 425,9 g/kWh.

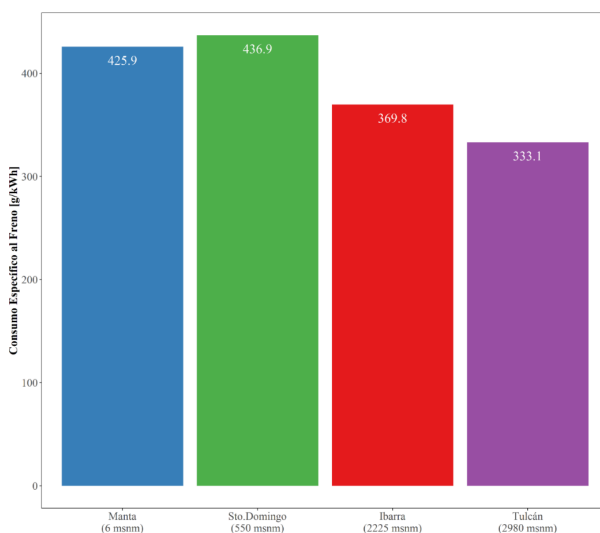


Figura 95. Consumo específico al freno promedio para todas las ciudades

(Autoría propia)

La Figura 96 muestra la diferencia del consumo específico al freno calculado para Tulcán, menos el calculado para Manta. Las zonas de color azul indican que el consumo específico fue mayor para la ciudad de Tulcán, lo propio con el color rojo y Manta. Este mapa indica que, en su mayoría, el consumo específico al freno fue mayor en Manta por 200 g/kWh o menos, especialmente en las zonas de mayor frecuencia de operación de motor. Tal observación refuerza la idea de que, a pesar

de tener mayor energía térmica disponible debido al aumento en densidad de aire, esta no fue convertida eficientemente en energía útil.

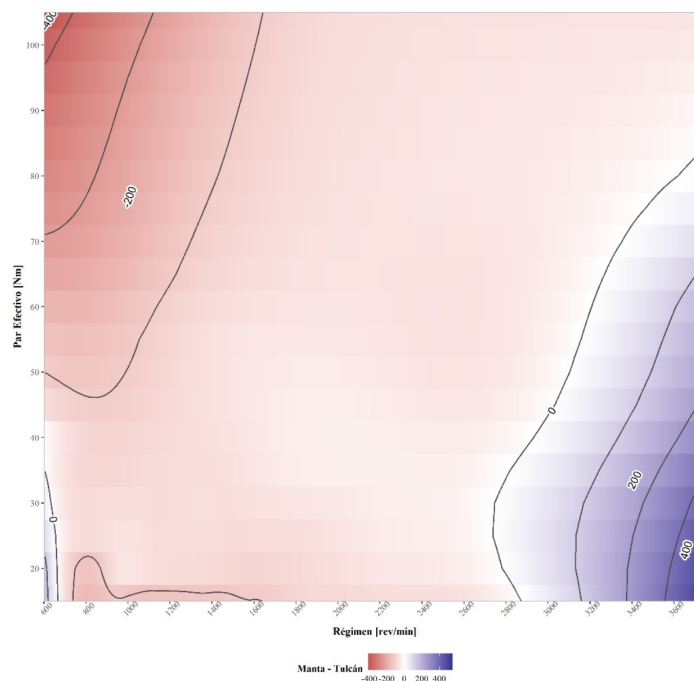


Figura 96. Diferencia de BSFC entre Tulcán (2980 msnm) y Manta (6 msnm)

(Autoría propia)

4.3.1.3 Tasa de Emisión de CO₂ por Unidad Energética

La Figura 97 muestra la tasa de emisión de CO₂ por unidad de energía generada en g/kWh para todas las ciudades de estudio. Los mapas indican que las zonas de menor emisión de CO₂ corresponden a las de alto régimen con elevada carga, reflejando un funcionamiento más eficiente al acercarse a la zona óptima de operación de motor. Por otro lado, en las zonas de operación a ralenti (que son más frecuentes) los rangos de tasa de emisión se mantienen alrededor de los 950 a 1100 g/kWh, aunque tiende a ser menor conforme la altitud aumenta.

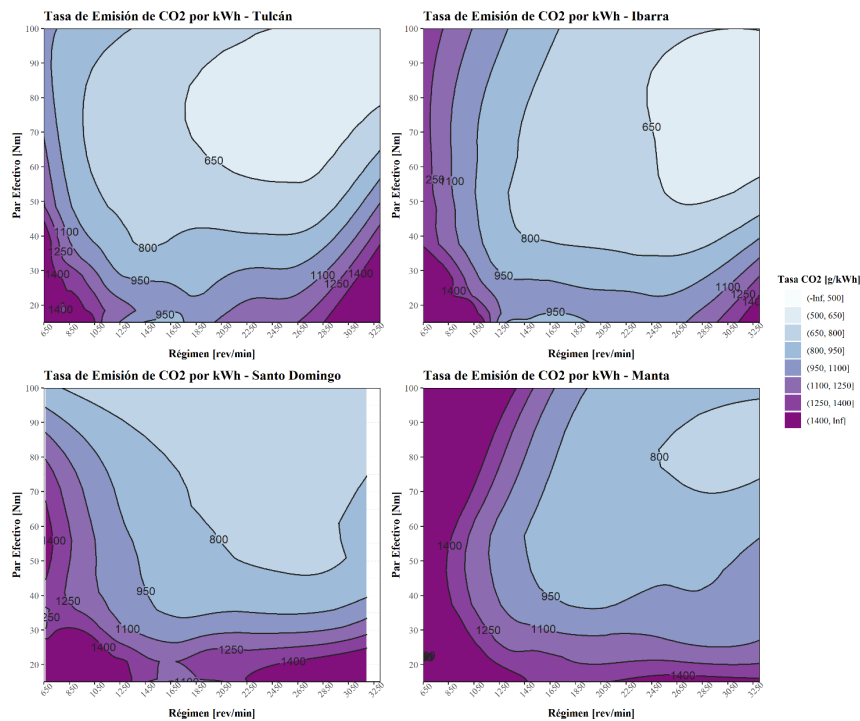


Figura 97. Mapas de tasa de emisión de CO_2 por energía generada

(Autoría propia)

Los mapas muestran un aumento en la tasa de emisión de CO_2 con respecto a la energía generada al disminuir la altitud. Esto indica un mayor consumo de combustible para la misma cantidad de energía debido al aumento de aire disponible en cada ciclo de operación de motor. En la ciudad de mayor altitud, Tulcán, las zonas de alto régimen y pares efectivos elevados inician en rangos de 500 a 650 g/kWh, en contraste a ciudades de menor altitud como Sto. Domingo y Manta en las que el rango mínimo mostrado es de 650 a 800 g/kWh.

Por otro lado, la Figura 98 muestra la tasa promedio de emisión de CO_2 por unidad de energía generada para todas las ciudades de estudio. Esta indica un aumento progresivo en la emisión de CO_2 al disminuir la altitud. Sin embargo, el registro de una mayor emisión en Sto. Domingo que en Manta, es resultado de un factor externo que influye más que la altitud y la presión atmosférica sobre la tasa de CO_2 .

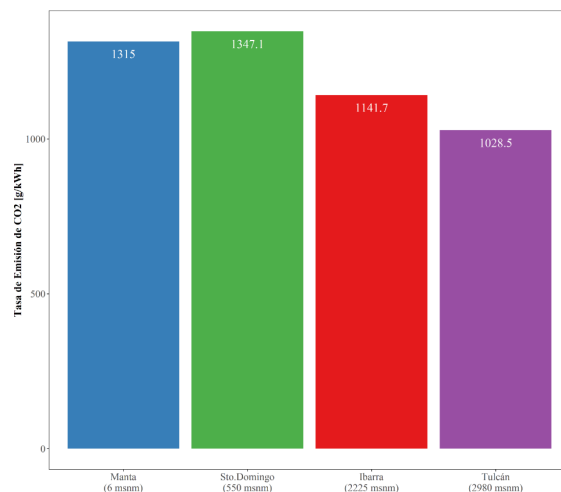


Figura 98. Tasa promedio de emisión de CO₂ por energía generada

(Autoría propia)

Entre Tulcán y Manta se observa un aumento del 28% con respecto a la tasa de emisión de CO₂ al tener valores de 1028,5 g/kWh y 1315 g/kWh respectivamente. Tal aumento también se evidencia en el mapa de diferencia relativa mostrado en la Figura 99. En él, las zonas de color rojo representan una mayor tasa de emisión para la ciudad costera. Lo propio con las zonas azules y Tulcán. Generalmente, el aumento de emisión de CO₂ por energía generada se encuentra alrededor de los 250 g/kWh.

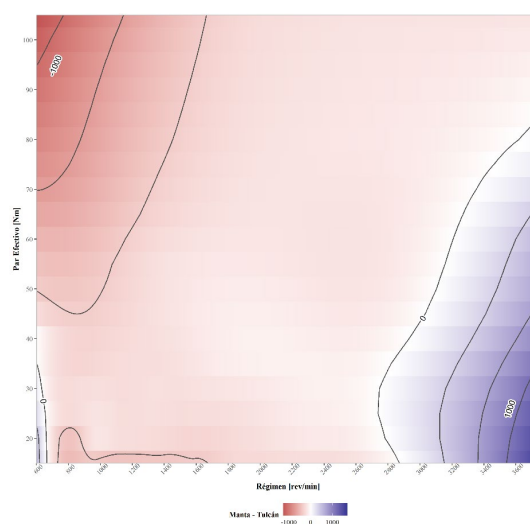


Figura 99. Diferencia de emisión de CO₂ (g/kWh) entre Tulcán (2980 msnm) y Manta (6 msnm)

(Autoría propia)

4.3.2 Mapas de Tasas de Consumo y Emisión de CO₂

4.3.2.1 Consumo Instantáneo de Combustible

La Figura 100 muestra los mapas de motor de consumo instantáneo de combustible para todas las ciudades de estudio. En ellos, la variación de la tasa de consumo con respecto al régimen de giro del motor y el par efectivo generado se visualiza mediante líneas de isoconsumo y una escala de colores discreta. Estos mapas permiten identificar las condiciones de operación que conducen a un consumo de combustible distinto, proporcionando una idea clara al momento de evaluar el impacto de la altitud, topografía y condiciones de tráfico real en el desempeño del vehículo.

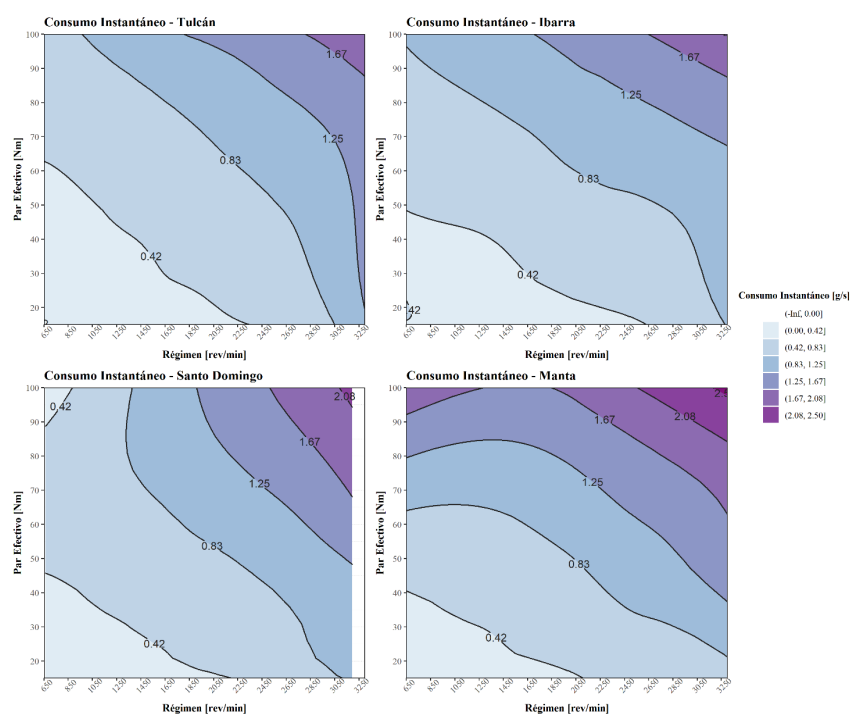


Figura 100. Mapas de tasa de consumo para todas las ciudades

(Autoría propia)

En primer lugar, la Figura 100 refleja el comportamiento esperado en cuanto a consumo y régimen se refiere: si las revoluciones aumentan, el consumo instantáneo también lo hace. Esto se debe a que al aumentar el régimen, la cantidad de aire de admisión incrementa, necesiándose mayor inyección de combustible para mantener el dosado estequiométrico requerido.

Por otro lado, el espectro de colores indica que existe una relación inversamente proporcional en cuanto al consumo y altitud se refiere. En la ciudad de altura, Tulcán, el consumo máximo

mostrado se encuentra en el rango de 1,67 a 2,08 g/s, mientras que en Manta, la ciudad costera, el rango máximo es de 2,08 a 2,5 g/s. Tal aumento en el consumo instantáneo se debe principalmente a la mayor disponibilidad de aire en la admisión, causada por el aumento en la presión atmosférica, característica de una ciudad costera. Además, los mapas de motor de Ibarra y Sto. Domingo indican que el incremento en la tasa de consumo de combustible es progresivo.

En general, la Figura 100 indica que la altitud juega un papel predominante en la variación de la tasa de consumo de combustible. Tulcán, a pesar de presentar una mayor demanda de carga debido a su topografía, su consumo instantáneo se mantiene menor que el registrado en Manta, lo que enfatiza la influencia de la densidad del aire y presión atmosférica. Esto refuerza la idea de que, si bien la topografía puede ser relevante, la altitud tiene un impacto más significativo al momento de evaluar el consumo bajo condiciones de tráfico real.

Otro aspecto importante es que, si se comparan los mapas de frecuencia de operación con los de tasa de combustible, se puede inferir que el vehículo tendrá un consumo instantáneo de combustible de 0,42 a 0,83 g/s sin importar la ciudad de estudio. Esto indica que debido a la operación en condiciones de tráfico real la tasa promedio de combustible será similar sin importar la altitud. De hecho, la variación máxima registrada se dio entre Manta e Ibarra, siendo del 22% (Figura 101). Por otro lado, la variación entre ciudades extremo (Manta y Tulcán) fue del 11%, indicando que el comportamiento es consistente incluso al variar significativamente la altitud.

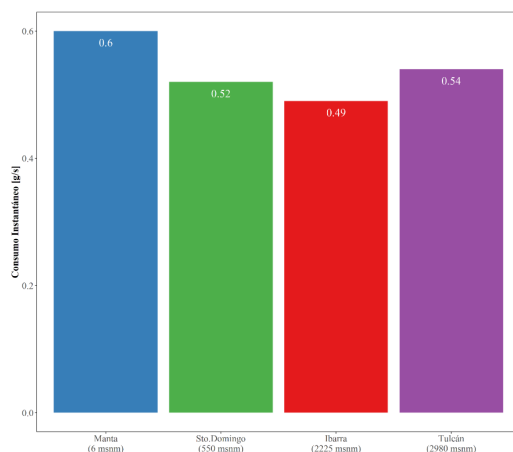


Figura 101. *Tasas promedio de consumo de combustible*

(Autoría propia)

La Figura 102 muestra el mapa de diferencia relativa del consumo instantáneo de combustible para las ciudades de altura y costera. El cálculo representado hace referencia al consumo registrado en Tulcán menos el registrado en Manta. La zona roja representa un mayor consumo en la ciudad costera, mientras que la zona azul un mayor consumo en altura.

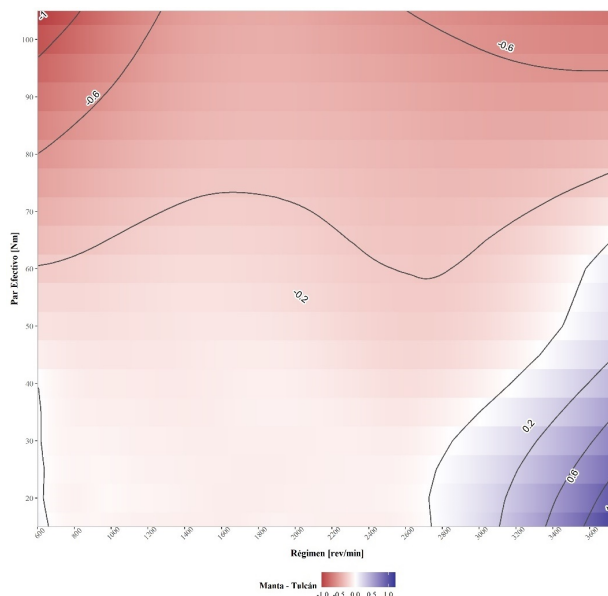


Figura 102. Diferencia de consumo (g/s) entre Tulcán (2980 msnm) y Manta (6 msnm)
(Autoría propia)

Lo mencionado anteriormente se refuerza con la Figura 102: el consumo de combustible es mayor en zonas costeras. Sin embargo, tal aumento se concentra en zonas de operación más comunes, con regímenes medios y cargas elevadas. En caso de operar a revoluciones medias y baja carga (caso poco probable) el consumo es mayor en altura. Esto refleja la capacidad del motor de generar mayores potencias al inyectar más combustible. Además, hace muestra la mejora en eficiencia volumétrica debida a la elevada presión atmosférica presente en ciudades costeras.

4.3.2.2 Emisión Instantánea de CO₂

La Figura 103 muestra los mapas de motor de variación de emisión instantánea de CO₂ para todas las ciudades de estudio. Al igual que con la tasa de consumo de combustible, la tasa de emisión de CO₂ se representa mediante una escala de colores discreta y contornos. Estos mapas permiten identificar las zonas de mayor y menor emisión de este gas de efecto invernadero, aportando al análisis de consumo de combustible de la presente investigación.

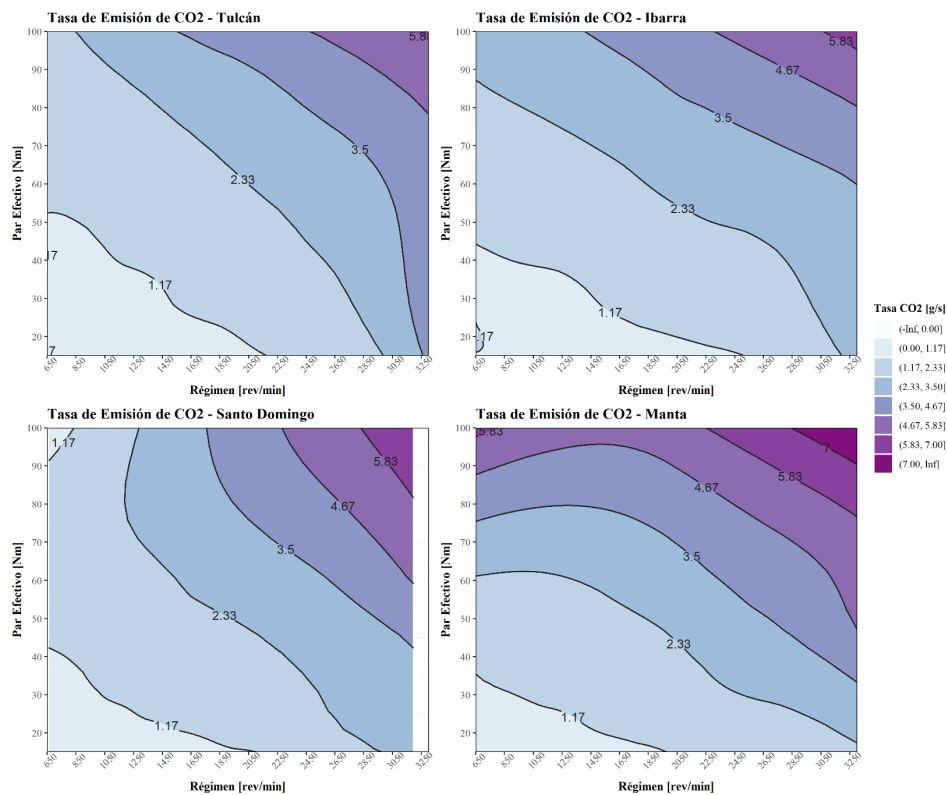


Figura 103. Mapas de tasas de emisión de CO_2 para todas las ciudades

(Autoría propia)

La Figura 103 indica un aumento progresivo en la emisión instantánea de CO_2 , lo cual está directamente relacionado con la cantidad de combustible quemado debido a la relación estequiométrica que maneja un MEP. En el caso de Tulcán, el rango de mayor valor presentado es el de 4,67 a 5,83 g/s. Tal rango aumenta gradualmente hasta valores mayores a 7 g/s en Manta. Este aumento en la tasa de emisión es consistente con los resultados de otras investigaciones (Arroyo Terán et al., 2021; Zervas, 2011), a pesar de que estas últimas se hayan desarrollado en condiciones de laboratorio.

Cabe aclarar que los valores de mayor emisión se concentran en regiones de alta carga y elevado régimen de giro, por lo que no necesariamente reflejan la tasa de emisión típica de un vehículo en condiciones de tráfico real. De hecho, al comparar los mapas de frecuencia con los de tasa de emisión de CO_2 , se observa que, en su mayoría, la emisión instantánea de este gas alcanza valores alrededor de los 1,17 g/s.

Por otro lado, si bien la altitud genera un impacto en las emisiones al alterar la cantidad de mezcla quemada (ello debido al cambio en la densidad del aire), existen otros factores que pueden influir en las condiciones de operación de motor en mayor o menor medida. La topografía, hábitos de conducción, resistencia aerodinámica y temperatura ambiente también pueden contribuir a las diferencias observadas (Wang et al., 2022). Sin embargo, a pesar de estas variaciones, la consistencia del aumento en emisiones de CO₂ con lo registrado en otros estudios en rutas reales (Wang et al., 2020) valida los hallazgos de esta investigación. Aun así, se reconoce que éstos pueden estar influenciados por los factores externos anteriormente mencionados.

Tomando en cuenta lo anterior, la Figura 104 muestra que la tasa promedio de emisión de CO₂ para todas las ciudades de estudio no cambia gradualmente. La variación máxima registrada, nuevamente, fue entre Manta e Ibarra (22%), mientras que la ciudad costera presentó 11% mayor cantidad de emisiones con respecto a la ciudad de altura. Ello es consistente con la variación en la tasa de consumo de combustible anteriormente analizada, reforzando la idea de que, si bien se espera una mayor cantidad de emisiones al aumentar la presión atmosférica, dichas emisiones no están únicamente influenciadas por la altitud.

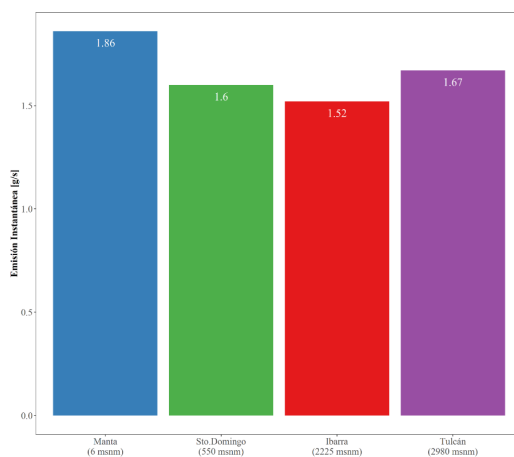


Figura 104. *Tasas promedio de emisión de CO₂*

(Autoría propia)

Por otro lado, la Figura 105 muestra un mapa de diferencia entre la tasa de emisión de CO₂ en Tulcán menos la tasa de emisión en Manta. Las zonas rojas representan una mayor tasa de emisión en Tulcán, mientras que las zonas azules corresponden a mayores emisiones en la ciudad de Manta.

El patrón observado es prácticamente idéntico al de diferencias en tasas de consumo de combustible, puesto que se utilizó una relación estequiométrica para calcular la cantidad de gas de efecto invernadero expulsado al ambiente. Ello implica que, debido a las zonas de mayor frecuencia de operación, generalmente se emitirá más CO_2 al tener mayor presión atmosférica disponible en la admisión. Además, la cantidad de CO_2 suele ser un indicador de calidad de combustión, por lo que el gráfico sugiere que, en revoluciones medias y bajas con cargas elevadas, esta es mejor cuando la altitud disminuye.

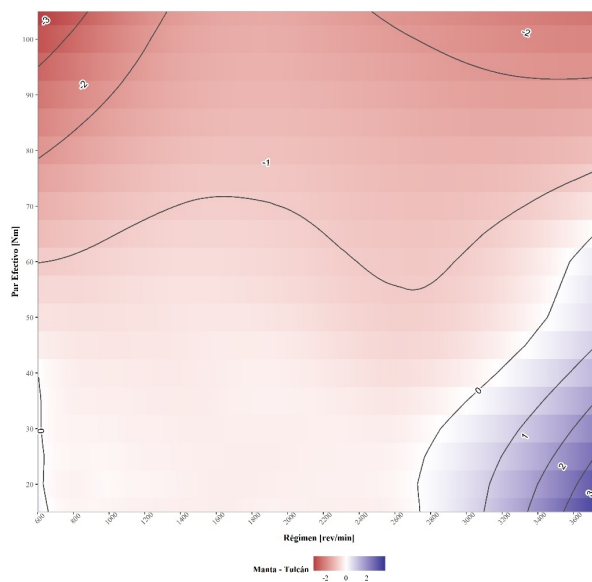


Figura 105. Diferencia de emisión de CO_2 (g/s) entre Tulcán (2980 msnm) y Manta (6 msnm)
(Autoría propia)

4.4 Factores de Emisión y Consumo

En esta sección, se analizan los factores de emisión y consumo obtenidos para todas las ciudades de estudio. Además, se discuten los resultados comparándolos con otros estudios similares a nivel global. Los factores de emisión a nivel de vehículo se expresan en función de la distancia recorrida (g/km) al igual que los factores de consumo de combustible. Por otro lado, los factores a nivel de motor se expresan con respecto a la energía generada (g/kWh).

4.4.1 Factores de Emisión y Consumo por Ciudad

Los valores promedio de los factores de emisión a nivel de vehículo y motor se muestran en la Tabla 28. En ella, se diferencian los valores por ciudad y tipo de tramo. El factor de emisión por

energía generada mayor se presentó en Manta, ubicada a nivel del mar, con un valor de 1031,07 g/kWh. Además, fue 34% mayor al presentado en la ciudad de mayor altitud, Tulcán, con un factor de emisión de 770,66 g/kWh. Por otro lado, todas las ciudades presentaron factores de emisión en términos de energía generada mayores en el tramo urbano, indicando que la energía desperdiciada, probablemente por los períodos a ralentí, es mayor.

Por otro lado, las tasas promedio de consumo de combustible y emisión de CO₂ disminuyeron al aumentar la altitud, alcanzando sus valores mínimos a 2980 msnm (Tulcán). La tasa de consumo menor fue de 0,54 g/s, mientras que la de CO₂ de 1,67 g/s. Estas son 10% menores a las mayores tasas registradas, correspondientes a las de altitud a nivel del mar (Manta, a 6 msnm). Además, los valores promedio mayores se presentan en los tramos de carretera, resultado de las cargas y regímenes de giro más elevados y prolongados durante este tipo de tramo.

Tabla 28. *Valores promedio de eficiencia y factores de emisión y consumo*

Ciudad	Tramo	Valor Promedio (%)	Factores de Emisión por Energía Generada (g/kWh)		Tasas Promedio (g/s)		Factores de Emisión por Distancia Recorrida (g/km)	
		<i>BTE</i>	<i>BSFC</i>	<i>CO₂</i>	<i>FC</i>	<i>CO₂</i>	<i>FC</i>	<i>CO₂</i>
Tulcán	Urbano	26,17	371,55	918,97	0,33	1,03	103,94	320,94
	Suburbano	33,97	277,24	711,12	0,69	2,15	65,16	201,19
	Carretera	36,12	260,29	693,44	1,02	3,18	61,70	190,50
	Total	29,52	333,07	770,66	0,54	1,67	74,17	229,00
Ibarra	Urbano	23,83	422,29	1056,98	0,30	0,93	94,69	292,36
	Suburbano	31,14	319,62	770,55	0,64	1,99	55,04	169,96
	Carretera	34,08	284,23	720,50	0,81	2,51	55,38	171,01
	Total	27,70	369,77	822,42	0,49	1,52	65,17	201,23
Sto. Domingo	Urbano	21,68	467,93	1104,37	0,41	1,25	77,55	239,47
	Suburbano	27,61	361,35	909,48	0,76	2,34	56,31	173,87
	Carretera	27,66	365,16	905,87	0,80	2,48	48,99	151,29
	Total	23,48	436,29	1005,08	0,52	1,60	63,51	196,09
Manta	Urbano	20,98	462,88	1160,53	0,43	1,34	82,75	255,52
	Suburbano	26,31	359,83	945,93	0,77	2,36	23,93	73,88
	Carretera	28,77	331,11	921,29	1,20	3,71	56,03	172,99
	Total	23,04	425,88	1031,07	0,60	1,86	49,67	153,36

(Autoría propia)

Por último, los valores de factores de emisión en términos de distancia recorrida mostrados en la Tabla 28 muestran una tendencia inversa a la esperada: los valores máximos corresponden a la ciudad de mayor altitud, Tulcán, mientras que los mínimos a la ciudad de Manta, ubicada a nivel del mar. A nivel del mar, los factores de consumo y emisión promedio son de 49,7 y 153,6 g/km, siendo 33% menores a los presentados a elevada altitud. Por otro lado, los valores máximos de estos factores en cada ciudad corresponden a los tramos de ciudad. Nuevamente, esto se debe a los elevados períodos a ralenti en los que se consume combustible, aunque el vehículo permanezca inmóvil, y a los estados transitorios de operación de motor.

4.4.2 Discusión de Resultados

En la Figura 106 se muestran los factores promedio de emisión a nivel de vehículo y a nivel de motor, junto con los factores de consumo de combustible. Estos gráficos contribuyen al análisis de consumo de combustible al brindar otro enfoque acerca de la eficiencia del motor y el comportamiento del vehículo a diferentes altitudes.

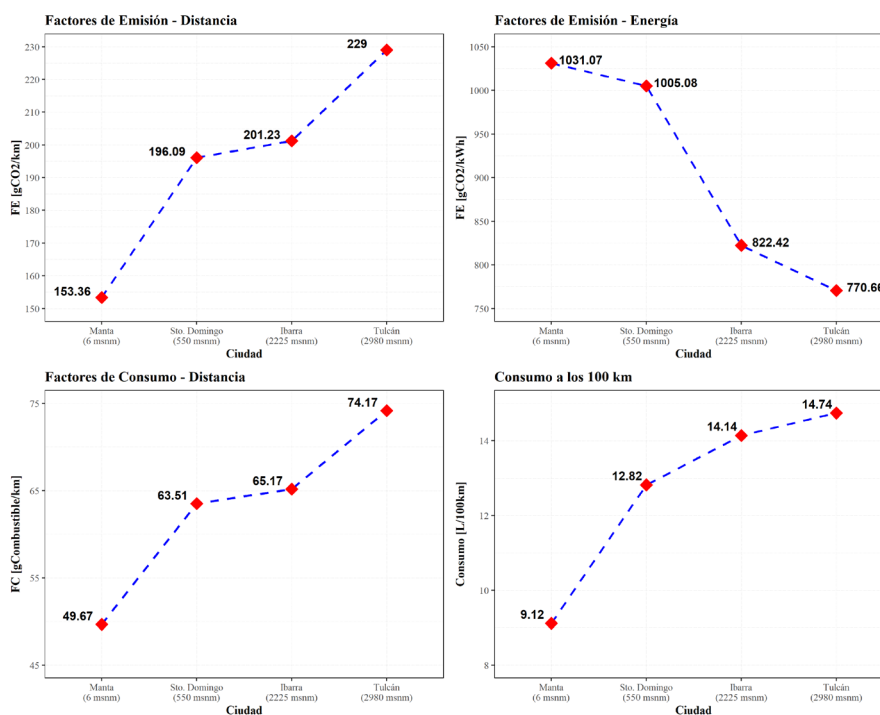


Figura 106. Factores de emisión y consumo para cada ciudad de estudio

(Autoría propia)

En primer lugar, los valores registrados en Manta (ciudad costera) fueron 37% menores a los registrados en otro estudio realizado en Münster, Alemania (40 msnm), que utilizó software especializado y sensores remotos (Peitzmeier et al., 2017). Tal discrepancia podría deberse a las diferencias en las metodologías utilizadas. Si bien ambos estudios analizaron el factor de emisión en condiciones de tráfico real, el modelo alemán podría subestimar el CO₂ emitido al no medir directamente las emisiones.

Por otro lado, los valores para Sto. Domingo son 15% menores que los presentados en un estudio realizado en Delhi, India (225 msnm), llevado a cabo en condiciones de tráfico real con un Sistema de Medición de Emisiones de Aerosol (AEMS), pero con una resolución de muestra de 1 minuto (Jaiprakash & Habib, 2018). Esta diferencia, aunque no tan significativa, puede atribuirse a que en esta investigación el CO₂ es estimado y no medido directamente, excluyendo posibles incrementos instantáneos de emisiones debidos a una mezcla de combustible más rica.

Para Ibarra, los valores registrados son un 6% mayores con respecto a los obtenidos en otro estudio que empleó datos proveídos por OBD – II (Rosero Obando et al., 2024). Ello es de esperarse ya que la metodología de estimación de dióxido de carbono es la misma. Sin embargo, el consumo registrado con los sensores es ligeramente mayor al reportado por OBD – II, resultando en un incremento en las emisiones.

En cuanto a la ciudad de mayor altitud, Tulcán, su valor de factor de emisión es significativamente mayor al reportado en estudios previos (Wang et al., 2020, 2022; Zervas, 2011). Ello podría indicar que la metodología de estimación del factor de emisión en términos de distancia no es adecuada para condiciones de alturas extremas. Es importante mencionar que los estudios mencionados se llevaron a cabo a altitudes menores o iguales a 2400 msnm. Sin embargo, sus resultados son consistentes entre ellos, por lo que puede existir un factor que no está siendo considerado en este análisis y que afecta considerablemente en el cálculo del factor de emisión.

Además, la Figura 106 muestra un aumento progresivo en las emisiones de dióxido de carbono por distancia con el incremento de altitud. Ello es totalmente opuesto a lo reportado por la literatura existente y a lo que se esperaría con los resultados de tasa de consumo de combustible obtenidos en esta investigación, donde el CO₂ tiende a disminuir a mayores altitudes (Wang et al., 2020, 2022; Zervas, 2011). Sin embargo, el incremento de CO₂ con la disminución de altitud ha

demostrado ser una relación inconsistente y puede tener un menor impacto con respecto a otros factores como las condiciones del terreno y el comportamiento al manejar (Wang et al., 2022), tal y como se analizó en la sección 4.2.5. A mayores altitudes el motor opera con cargas más elevadas durante períodos de tiempo prolongados, sugiriendo que, aunque la tasa de consumo de combustible es más elevada a menores altitudes, manejar en condiciones de altitud elevada requiere acelerar más el motor, resultando en regímenes y consumos instantáneos más altos en distancias similares.

Por último, los factores de emisión en función de la energía generada mostrados en la Figura 106 ofrecen un enfoque complementario: estos indican que al aumentar la altitud el CO₂ emitido por unidad de energía producida disminuye. Esto sugiere un mejor aprovechamiento de energía al operar más cerca de la zona óptima de funcionamiento del motor, desperdiciando menos energía. Se debe tener en cuenta que, a una carga determinada, se quema más combustible cuando hay mayor presión atmosférica (a menores altitudes), pero ello no siempre resulta en aumento de trabajo útil. Por ejemplo, en ralentí, la energía extra se pierde en forma de calor o en pérdidas por bombeo elevadas debidas a la alta resistencia del aire, explicando los valores de factores de emisión a nivel de vehículo y motor presentados.

Otro hallazgo representado en la Figura 106 es el aumento del consumo a los 100 km con la altitud. Este incremento alcanza hasta un 101,9% con respecto al indicado en el manual del fabricante del vehículo, reflejando condiciones de operación significativamente distintas con respecto a las del nivel del mar. Además, en la ciudad de Manta se registró un consumo de 9,12 L/100km, siendo 25% mayor al especificado por el fabricante. Este aumento, incluso a nivel del mar, es el resultado de operar en condiciones de tráfico real, las cuales difieren considerablemente de los escenarios controlados de laboratorio empleados para determinar el consumo y emisiones de los vehículos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La revisión bibliográfica profundizó en el efecto de la altitud sobre el desempeño de un vehículo equipado con un MEP naturalmente aspirado en condiciones de tráfico real, así como las metodologías ocupadas para estimar su rendimiento. La literatura señala una disminución del consumo de combustible y emisiones CO₂ al aumentar la altitud debido a la baja presión atmosférica. Sin embargo, la dinámica de operación en condiciones reales introduce variables no controladas (topografía, hábitos de conducción, condiciones climáticas variadas, etc.) que dificultan la comparación directa entre estudios. Por ello, se observan inconsistencias en los resultados en la relación entre cantidad de CO₂ emitido y altitud, especialmente al analizar diferentes ciclos de conducción (FTP – 75 y NEDC).
- Aunque los mapas de motor son ampliamente utilizados para estimar y presentar visualmente el desempeño de un motor, su aplicación en estudios regionales aún es limitada. La mayoría de presentan mapas discretizados y sin contornos que no abarcan el rango completo de régimen y carga del motor. Esto resaltó la necesidad de implementar una metodología que permita generar mapas representativos mediante interpolación y suavizado de datos para analizar el efecto de la altitud en el consumo de combustible.
- Las pruebas de comunicación permitieron configurar e integrar los tres sensores al registrador CANEdge2 y sincronizar sus datos con los de operación de motor proveídos por OBD – II a través del registrador ELM327. Además, los cambios de metodología mejoraron la precisión de los datos y calidad de los resultados. Esto se evidenció al comparar las tasas de emisión y consumo obtenidas con las reportadas en la bibliografía.
- Durante la campaña experimental realizada en cuatro ciudades del Ecuador con altitudes desde el nivel del mar hasta los 2980 msnm se grabaron exitosamente datos cinemáticos y de operación de motor mediante dos registradores de datos (ELM327 y CANEdge2) y tres sensores (flujómetros de combustible y módulo GNSS – inercial). La frecuencia de muestreo usada (1 Hz), igual a la de otros estudios estandarizados, permitió capturar variaciones operativas instantáneas del vehículo de prueba seleccionado y su motor. Esto

facilitó la caracterización de la operación a diferentes altitudes y en distintos tipos de tramo (urbano, suburbano y carretera).

- El uso de software estadístico de código abierto, como R y Asammdf (basado en Python), permitió decodificar y procesar los datos obtenidos con facilidad. Estas herramientas, junto con paquetes de libre acceso como Tydiverse, permitieron el uso de funciones especializadas, análisis de grandes volúmenes de datos y exportación de estos. Con ello, se garantiza la replicabilidad de la metodología para otros estudios similares.
- La creación de mapas de motor mediante el método de regresión local de datos (LOESS) permitió generar gráficos con contornos y datos interpolados que se asemejan a los encontrados en la literatura. Sin embargo, la validez de estos puede verse sesgada por el método de interpolación y el nivel de suavizado aplicado a los datos (20%).
- Se caracterizó exitosamente las de condiciones en tráfico real en cuanto a patrones de modos y frecuencia de operación del motor al mostrar elevados períodos a ralentí y baja carga. Sin embargo, la falta de estandarización de las rutas de estudio generó diferencias de hasta 47% en la duración y del 35% en los períodos de carga elevada. Esto último, influenciado no sólo por la densidad de aire, sino también por la topografía del terreno.
- La tasa de consumo de combustible promedio a nivel del mar (Manta) fue de 0,6 g/s, siendo 11% mayor a la reportada a 2980 msnm (Tulcán). Esta tendencia es consistente con otros estudios revisados. Sin embargo, el factor de emisión de CO₂ en términos de distancia mostró una tendencia distinta, reportando un valor mayor a elevadas altitudes (229 g/km en Tulcán). Esta tendencia, contraria a la reportada en la literatura, podría deberse a otros factores como la topografía y condiciones climáticas variadas que influyen en mayor medida sobre el consumo de combustible. Además, es posible que la computadora del motor no ajuste el consumo de combustible con respecto a la altitud de forma homogénea en todo el rango de operación de motor.
- La eficiencia térmica al freno (BTE) aumenta con la altitud. En Tulcán (2980 msnm) esta es un 28% mayor con respecto a la eficiencia calculada para la ciudad costera. Esto debido a la relación entre potencia térmica promedio, que aumenta con la presión atmosférica (a menores altitudes); y la potencia efectiva promedio que se mantiene constante debido a la operación a ralentí presente en todas las ciudades de estudio.

5.2 Recomendaciones

- El presente estudio no tomó en cuenta otros factores que pueden afectar el consumo de combustible de un vehículo. Por ello, se recomienda analizar el efecto de otros factores extrínsecos (aerodinámica, topografía, temperatura y humedad de ambiente, etc.) e intrínsecos (dosado, avance de encendido, relación de compresión real, etc.).
- Existen diferencias significativas en las rutas llevadas a cabo para cada ciudad, por lo que se recomienda utilizar un método de estandarización para estas con el fin de reducir las variables no controladas en próximos estudios.
- El error sistemático presentado por los flujómetros de combustible puede corregirse con mayor precisión al realizar el procedimiento de calibración a través de una prueba de derrame de control. Tal prueba está especificada en los manuales de DFM proveídos por Technoton y, aunque el volumen de control sugerido es 10 L, se recomienda que éste sea de al menos 5 L.
- La relación entre carga de motor estimada y par efectivo debe ser estudiada más a fondo ya que, según lo especificado en la norma SAE J1979, el uso de un dinamómetro no debería ser necesario. Además, se recomienda profundizar en métodos de expresión de carga de motor distintos a la carga estimada por OBD – II o el par efectivo.
- La regresión local de datos (LOESS) puede no ser el mejor método de interpolación de los datos de operación de motor obtenidos experimentalmente. Se recomienda considerar otros métodos de interpolación biarmónica que puedan reducir la incertidumbre al momento de suavizar los datos.
- Los resultados presentados en esta investigación pueden ser tomados en cuenta como referencia para futuras investigaciones. En ellas, se recomienda indagar analizar el consumo de combustible a varias altitudes utilizando otros métodos de estimación de consumo más robustos (como VSP), haciendo análisis estadísticos de correlación e incluso analizando vehículos representativos de otros sectores de transporte (como buses o camiones).

ANEXOS

ANEXO 1: CONFIGURACIÓN DE CANEDGE2 (DOS COLUMNAS)

```

{
  "general": {
    "device": {
      "meta": "DArias"
    },
    "security": {},
    "debug": {
      "syslog": 0
    }
  },
  "log": {
    "file": {
      "split_size": 50,
      "split_time_period": 0,
      "split_time_offset": 0,
      "cyclic": 1
    },
    "compression": {
      "level": 0
    },
    "encryption": {
      "state": 0
    },
    "error_frames": {
      "state": 0
    }
  },
  "rtc": {
    "sync": 3,
    "timezone": -5,
    "adjustment": 5,
    "tolerance": 15,
    "message": {
      "chn": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "2",
      "id_mask": "7FF"
    },
    "valid_signal": {
      "type": 0,
      "byteorder": 1,
      "bitpos": 1,
      "length": 1,
      "factor": 1,
      "offset": 0
    },
    "time_signal": {
      "type": 0,
      "byteorder": 1,
      "bitpos": 8,
      "length": 40,
      "factor": 0.001,
      "offset": 1577840400
    }
  },
  "secondaryport": {
    "power_schedule": [
      {
        "from": "00:00",
        "to": "00:00"
      }
    ]
  },
  "can_internal": {
    "general": {
      "rx_state": 1,
      "tx_state": 1
    },
    "filter": {
      "id": [
        {
          "state": 1,
          "type": 0,
          "id_format": 0,
          "method": 0,
          "f1": "0",
          "f2": "7FF",
          "prescaler_type": 0
        }
      ]
    }
  },
  "control": {
    "control_rx_state": 0,
    "control_tx_state": 0,
    "start": {
      "message": {
        "chn": 0,
        "id_format": 0,
        "id": "0",
        "id_mask": "7FF"
      },
      "signal": {
        "type": 0,
        "byteorder": 1,
        "bitpos": 0,
        "length": 0,
        "factor": 0,
        "offset": 0
      }
    }
  }
}

```

```

    },
    "trigger_high": 0,
    "trigger_low": 0
  },
  "stop": {
    "message": {
      "chn": 0,
      "id_format": 0,
      "id": "0",
      "id_mask": "7FF"
    },
    "signal": {
      "type": 0,
      "byteorder": 1,
      "bitpos": 0,
      "length": 0,
      "factor": 0,
      "offset": 0
    },
    "trigger_high": 0,
    "trigger_low": 0
  }
},
"can_1": {
  "general": {
    "rx_state": 1,
    "tx_state": 1
  },
  "phy": {
    "mode": 0,
    "retransmission": 1,
    "fd_spec": 1,
    "bit_rate_cfg_mode": 1,
    "bit_rate_std": 500000,
    "bit_rate_fd": 1000000
  },
  "filter": {
    "remote_frames": 0,
    "id": [
      {
        "name": "Ch1AllStandard",
        "state": 1,
        "type": 0,
        "id_format": 0,
        "method": 1,
        "f1": "7FF",
        "f2": "0",
        "prescaler_type": 0
      },
      {
        "name": "Ch1AllExtended",
        "state": 1,
        "type": 0,
        "id_format": 1,
        "method": 1,
        "f1": "1FFFFFFF",
        "f2": "0",
        "prescaler_type": 0
      }
    ]
  },
  "transmit": [],
  "heartbeat": {
    "state": 0,
    "id_format": 1,
    "id": "00435353"
  },
  "control": {
    "control_rx_state": 0,
    "control_tx_state": 0,
    "start": {
      "message": {
        "chn": 0,
        "id_format": 0,
        "id": "0",
        "id_mask": "7FF"
      },
      "signal": {
        "type": 0,
        "byteorder": 1,
        "bitpos": 0,
        "length": 0,
        "factor": 0,
        "offset": 0
      },
      "trigger_high": 0,
      "trigger_low": 0
    },
    "stop": {
      "message": {
        "chn": 0,
        "id_format": 0,
        "id": "0",
        "id_mask": "7FF"
      },
      "signal": {
        "type": 0,
        "byteorder": 1,
        "bitpos": 0,
        "length": 0,
        "factor": 0,
        "offset": 0
      },
      "trigger_high": 0,
      "trigger_low": 0
    }
  }
}

```

```

    }
  },
  "can_2": {
    "general": {
      "rx_state": 1,
      "tx_state": 1
    },
    "phy": {
      "mode": 0,
      "retransmission": 1,
      "fd_spec": 0,
      "bit_rate_cfg_mode": 1,
      "bit_rate_std": 250000,
      "bit_rate_fd": 1000000
    },
    "filter": {
      "remote_frames": 0,
      "id": [
        {
          "name": "Ch2AllStandard",
          "state": 1,
          "type": 0,
          "id_format": 0,
          "method": 1,
          "f1": "7FF",
          "f2": "0",
          "prescaler_type": 0
        },
        {
          "name": "Ch2AllExtended",
          "state": 1,
          "type": 0,
          "id_format": 1,
          "method": 1,
          "f1": "1FFFFFFF",
          "f2": "0",
          "prescaler_type": 0
        }
      ]
    },
    "transmit": [
      {
        "name": "IdleTotalCnsmptn",
        "state": 1,
        "id_format": 1,
        "frame_format": 0,
        "brs": 0,
        "log": 1,
        "period": 1000,
        "delay": 0,
        "id": "18EA00FF",
        "data": "DCFE00"
      }
    ]
  },
  "heartbeat": {
    "state": 0,
    "id_format": 1,
    "id": "00435353"
  },
  "control": {
    "control_rx_state": 0,
    "control_tx_state": 0,
    "start": {
      "message": {
        "chn": 0,
        "id_format": 0,
        "id": "0",
        "id_mask": "7FF"
      },
      "signal": {
        "type": 0,
        "byteorder": 1,
        "bitpos": 0,
        "length": 0,
        "factor": 0,
        "offset": 0
      },
      "trigger_high": 0,
      "trigger_low": 0
    },
    "stop": {
      "message": {
        "chn": 0,
        "id_format": 0,
        "id": "0",
        "id_mask": "7FF"
      },
      "signal": {
        "type": 0,
        "byteorder": 1,
        "bitpos": 0,
        "length": 0,
        "factor": 0,
        "offset": 0
      },
      "trigger_high": 0,
      "trigger_low": 0
    }
  },
  "lin_1": {
    "phy": {
      "mode": 0,
      "bit_rate": 19200
    }
  }
}

```

```
},  
"lin_2": {  
  "phy": {  
    "mode": 0,  
    "bit_rate": 19200  
  }  
},  
"connect": {  
  "wifi": {  
    "mode": 0,  
    "keyformat": 0,  
    "accesspoint": []  
  },  
  "s3": {
```

```
"sync": {  
  "ota": 600,  
  "heartbeat": 300,  
  "logfiles": 1  
},  
"server": {  
  "request_style": 0,  
  "keyformat": 0,  
  "signed_payload": 0  
}  
}  
}
```

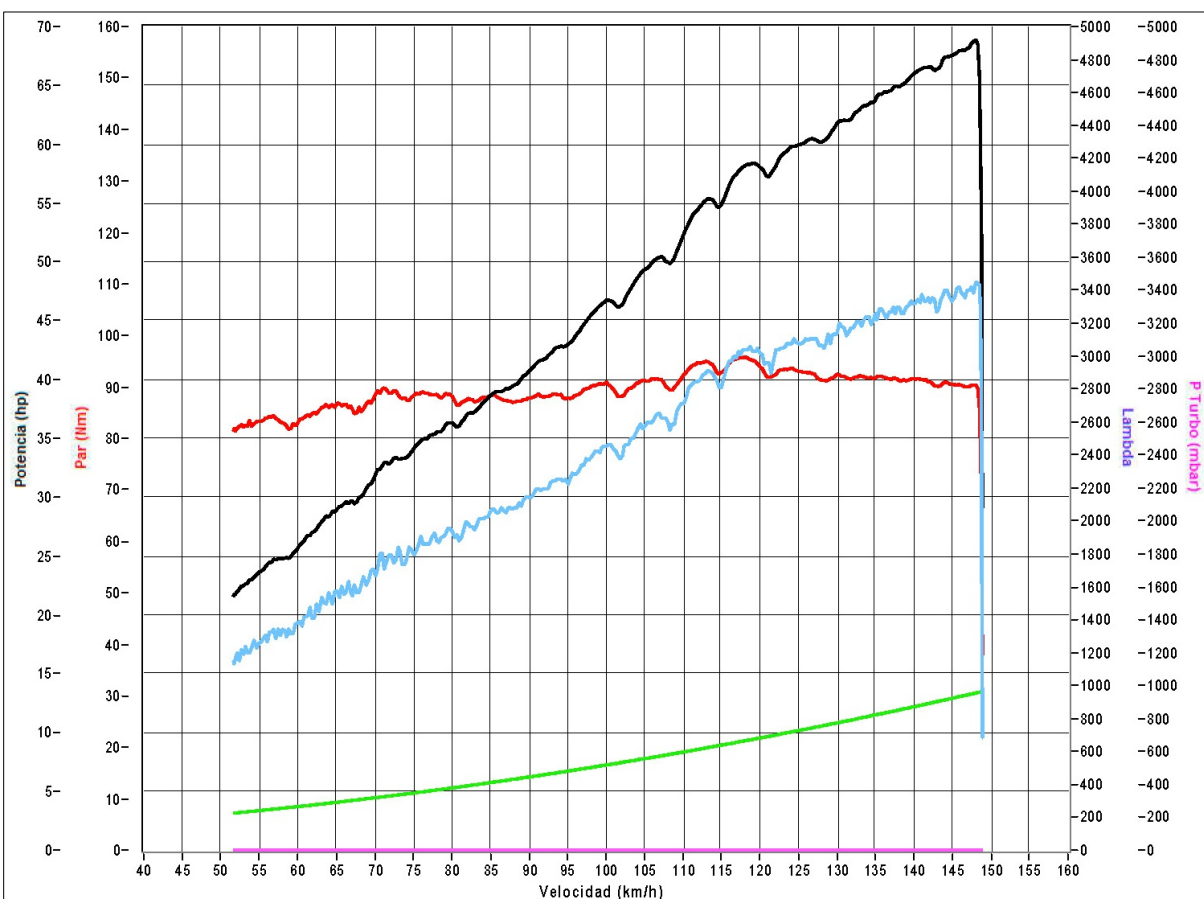
ANEXO 2: CONFIGURACIÓN DE CANMOD.GPS (DOS COLUMNAS)

```

{
  "phy": {
    "can": {
      "bit_rate_cfg_mode": 0,
      "bit_rate_std": 500000,
      "bit_rate_fd": 1000000
    }
  },
  "sensor": {
    "gnss": 5,
    "imu_mount_alignment": {
      "z": 0,
      "y": 0,
      "x": 0
    },
    "dyn_model": 4,
    "sensor_fusion": 1,
    "lever_arm": {
      "vrp_to_ant": {
        "leverarm_x": 51,
        "leverarm_y": 0,
        "leverarm_z": 16
      },
      "vrp_to_imu": {
        "leverarm_x": 196,
        "leverarm_y": 0,
        "leverarm_z": 44
      }
    }
  },
  "output": {
    "status": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "01",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "time": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "02",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "position": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "03",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "altitude": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "04",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "attitude": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "05",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "odo": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "06",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "speed": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "07",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "geofence": {
      "state": 0,
      "id_format": 0,
      "id": "08",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "imu": {
      "state": 0,
      "id_format": 0,
      "id": "09",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    }
  }
}

```

ANEXO 3: RESULTADOS DE PRUEBA 2 EN DINAMÓMETRO



Fecha prueba	08/11/24 - 11:34:18
Modelo vehículo	GREATWALL C30
Matrícula	TBG 3319
Cliente	DANIEL ARIAS
Operador	CESAR
Cilindrada	1500
Alimentación	Gasolina
Tipo motor	Aspirado
Cuentarrev	Automático
Tracción	Anterior
Temperatura (°C)	24
Presión (mbar)	883
Nombre archivo	241108_113418.dat
Note	

● Potencia al cigüeña	● Potencia a la rueda	● Potencia disipada
● Par motor	● Lambda	● Presion turbo

Potencia max motor	68,9	hp
Potencia max a correspondientes a	5430	rpm
corregido por	148	km/h
factor de corrección	ISO 1585	
Potencia max a la rueda	48,3	hp
Par máximo	96,0	Nm
Par máximo a correspondientes a	118	km/h
correspondientes a	4322	rpm
Presión turbo max	0	mbar
Presión turbo max a correspondientes a	51	km/h
correspondientes a	1886	rpm
Lambda max	0	
Lambda max a correspondientes a	51	km/h
correspondientes a	1886	rpm
Velocidad punta	149	km/h
Número de RPM máximas	5462	rpm

Notas: PRUEBA 2

ANEXO 4: VALORES Y PORCENTAJES DE MODOS DE OPERACIÓN POR CIUDAD Y RUTA

Modos de operación: Tulcán (2980 msnm)

	Tulcán							
	Ruta 1				Ruta 2			
	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total	Urbano	Suburbano	Carretera	Tramo total
Tiempo a Ralentí (s)	391,00	4,00	3,00	413,00	374,00	67,00	4,00	468,00
Porcentaje Ralentí	21,10	1,20	0,37	13,46	22,68	11,94	0,46	14,87
Aceleración Máxima (m/s²)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Aceleración Promedio (m/s²)	1,02	1,02	1,06	1,03	1,01	1,04	1,04	1,03
Tiempo en Aceleración (s)	297,00	57,00	145,00	513,00	197,00	89,00	143,00	443,00
Porcentaje en Aceleración	16,03	17,07	17,97	16,72	11,95	15,86	16,36	14,07
Desaceleración Máxima (m/s²)	-2,00	-2,00	-3,00	-3,00	-2,00	-3,00	-3,00	-3,00
Desaceleración Promedio (m/s²)	-1,04	-1,08	-1,13	-1,07	-1,04	-1,13	-1,09	-1,07
Tiempo en Desaceleración (s)	256,00	47,00	137,00	495,00	191,00	80,00	128,00	426,00
Porcentaje en Desaceleración	13,82	14,07	16,98	16,13	11,58	14,26	14,65	13,53
Tiempo en Crucero (s)	1261,00	228,00	525,00	595,00	1249,00	390,00	602,00	565,00
Porcentaje en Crucero	68,05	68,26	65,06	19,39	75,74	69,52	68,88	17,95

Modos de Operación: Ibarra (2225 msnm)

	Ibarra							
	<i>Ruta 1</i>				<i>Ruta 2</i>			
	<i>Urbano</i>	<i>Suburbano</i>	<i>Carretera</i>	<i>Tramo total</i>	<i>Urbano</i>	<i>Suburbano</i>	<i>Carretera</i>	<i>Tramo total</i>
Tiempo a Ralentí (s)	674,00	63,00	101,00	911,00	545,00	8,00	63,00	624,00
Porcentaje Ralentí	45,36	20,66	10,00	31,31	34,56	3,08	6,05	21,62
Aceleración Máxima (m/s²)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Aceleración Promedio (m/s²)	1,06	1,02	1,04	1,05	1,05	1,06	1,03	1,04
Tiempo en Aceleración (s)	175,00	48,00	175,00	432,00	161,00	49,00	144,00	391,00
Porcentaje en Aceleración	11,78	15,74	17,33	14,85	10,21	18,85	13,83	13,55
Desaceleración Máxima (m/s²)	-2,00	-2,00	-3,00	-3,00	-2,00	-3,00	-2,00	-3,00
Desaceleración Promedio (m/s²)	-1,16	-1,12	-1,16	-1,15	-1,03	-1,24	-1,10	-1,08
Tiempo en Desaceleración (s)	178,00	42,00	159,00	395,00	188,00	41,00	148,00	378,00
Porcentaje en Desaceleración	11,98	13,77	15,74	13,57	11,92	15,77	14,22	13,10
Tiempo en Crucero (s)	1116,00	210,00	671,00	605,00	1194,00	169,00	747,00	595,00
Porcentaje en Crucero	75,10	68,85	66,44	20,79	75,71	65,00	71,76	20,62

Modos de Operación: Sto. Domingo (550 msnm)

	Sto. Domingo							
	<i>Ruta 1</i>				<i>Ruta 2</i>			
	<i>Urbano</i>	<i>Suburbano</i>	<i>Carretera</i>	<i>Tramo total</i>	<i>Urbano</i>	<i>Suburbano</i>	<i>Carretera</i>	<i>Tramo total</i>
Tiempo a Ralentí (s)	321,00	15,00	26,00	446,00	435,00	17,00	1,00	528,00
Porcentaje Ralentí	21,27	3,73	6,16	18,18	37,21	6,27	0,29	24,21
Aceleración Máxima (m/s²)	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Aceleración Promedio (m/s²)	1,06	1,00	1,05	1,05	1,06	1,16	1,13	1,08
Tiempo en Aceleración (s)	232,00	50,00	86,00	392,00	195,00	89,00	62,00	440,00
Porcentaje en Aceleración	15,37	12,44	20,38	15,98	16,68	32,84	18,13	20,17
Desaceleración Máxima (m/s²)	-3,00	-1,00	-3,00	-3,00	-2,00	-3,00	-3,00	-3,00
Desaceleración Promedio (m/s²)	-1,10	-1,00	-1,29	-1,14	-1,11	-1,41	-1,25	-1,20
Tiempo en Desaceleración (s)	232,00	32,00	79,00	362,00	165,00	57,00	70,00	398,00
Porcentaje en Desaceleración	15,37	7,96	18,72	14,76	14,11	21,03	20,47	18,25
Tiempo en Crucero (s)	1030,00	319,00	257,00	396,00	784,00	124,00	209,00	336,00
Porcentaje en Crucero	68,26	79,35	60,90	16,14	67,07	45,76	61,11	15,41

Modos de Operación: Manta (6 msnm)

	Manta							
	<i>Ruta 1</i>				<i>Ruta 2</i>			
	<i>Urbano</i>	<i>Suburbano</i>	<i>Carretera</i>	<i>Tramo total</i>	<i>Urbano</i>	<i>Suburbano</i>	<i>Carretera</i>	<i>Tramo total</i>
Tiempo a Ralentí (s)	325,00	34,00	0,00	359,00	202,00	3,00	0,00	205,00
Porcentaje Ralentí	19,21	8,56	0,00	14,38	18,88	0,92	0,00	11,87
Aceleración Máxima (m/s²)	2,00	10,00	15,00	15,00	2,00	2,00	1,00	2,00
Aceleración Promedio (m/s²)	1,02	1,19	1,22	1,08	1,01	1,03	1,00	1,01
Tiempo en Aceleración (s)	238,00	56,00	64,00	369,00	164,00	68,00	44,00	282,00
Porcentaje en Aceleración	14,07	14,11	15,72	14,78	15,33	20,86	13,29	16,33
Desaceleración Máxima (m/s²)	-2,00	-2,00	-2,00	-2,00	-2,00	-5,00	-1,00	-5,00
Desaceleración Promedio (m/s²)	-1,04	-1,15	-1,09	-1,06	-1,10	-1,09	-1,00	-1,09
Tiempo en Desaceleración (s)	241,00	53,00	56,00	354,00	145,00	56,00	38,00	246,00
Porcentaje en Desaceleración	14,24	13,35	13,76	14,18	13,55	17,18	11,48	14,24
Tiempo en Crucero (s)	1200,00	286,00	287,00	483,00	751,00	200,00	249,00	391,00
Porcentaje en Crucero	70,92	72,04	70,52	19,35	70,19	61,35	75,23	22,64

REFERENCIAS

- AEADE. (2024). *Anuario 2023*. <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2024/03/AEADE-2023.pdf>
- Álvarez, J., Callejón, I., Forns, S., Balsells, D., Casanova, J., Oscar, B., Carrera, X., Carreras, R., Sánchez, D., Miret, S., Liesa, F., Isidro, L., Espada, I., Costa, R., Forcadell, C., Serrano, Á., Soldevila, X., & Villa, J. (2005). *Motores alternativos de combustión interna*. Edicions UPC. 84-8301-818-5 Carreras Planells, R. Álvarez Flórez, J. A. (II.) y Callejón Agramunt, I. (II.) (2015). Motores alternativos de combustión interna. Barcelona, Spain: Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/61423?page=4>.
- Arroyo Terán, E. S., Cevallos González, A. F., Imbaquingo Navarrete, R. P., & Melo Obando, J. L. (2021). Study of the effect of altitude on the emissions of exhaust gases in spark-ignition engines. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 148–162. <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.629.25>
- Barrionuevo, B., & Viera, J. (2021). *Análisis del impacto de la altitud sobre las emisiones contaminantes y el consumo de combustible en un vehículo con inyección electrónica* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15391>
- Belletiere, J., Berardi, V., & Estrada, S. (2016, julio). *Using 2D Contour Plots within {ggplot2} to Visualize Relationships between Three Variables*. <https://www.r-statistics.com/2016/07/using-2d-contour-plots-within-ggplot2-to-visualize-relationships-between-three-variables/#comment-67611>
- Carrera, M. (2019). *IDENTIFICACIÓN DE PAR MOTOR Y POTENCIA EN UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO EN FUNCIÓN DEL SISTEMA DE ESCAPE* [Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9575>
- Castillo, J. (2018a). *Eficiencia energética en vehículos livianos del sector transporte en Colombia* [Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/abb87336-8326-44b5-9231-6307d5834154/content>

- Castillo, J. (2018b). *Eficiencia energética en vehículos livianos del sector transporte en Colombia*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- CSS Electronics. (2024a). *CANedge2*. <https://www.csselectronics.com/products/can-bus-data-logger-wifi-canedge2>
- CSS Electronics. (2024b). *CANmod.gps*. <https://www.csselectronics.com/products/gps-to-can-bus-gnss-imu>
- CSS Electronics. (2025). *DBC Editor for CAN Bus Database Files*. <https://www.csselectronics.com/pages/dbc-editor-can-bus-database>
- Cuzco, L., & Espinosa, A. (2023). *Creación de Mapas de Emisiones de un Motor Gasolina de Inyección* [Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13907>
- Doulgeris, S., Dimaratos, A., Zacharof, N., Toumasatos, Z., Kolokotronis, D., & Samaras, Z. (2020). Real world fuel consumption prediction via a combined experimental and modeling technique. *Science of The Total Environment*, 734, 139254. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139254>
- Echeverri, C. (2022). *Control de la contaminación atmosférica*. Ediciones de la U. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9789587923674_A44165893/preview-9789587923674_A44165893.pdf
- Escudero, S., Rivas, J., Rodríguez, A., & Suárez, A. (2011). *Motores*. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/101844>
- European Environment Agency. (2016). *Explaining road transport emissions - A non-technical guide*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/https://data.europa.eu/doi/10.2800/71804>
- European Parliament and Council of the European Union. (2016). *Regulation (EU) No. 646/2016: Amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and*

commercial vehicles (Euro 6). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0646>

Fundación Española para la Ciencia y Tecnología. (2007). *Meteorología y Climatología*. Villena Artes Gráficas.

Genta, G., & Morello, L. (2020). *The Automotive Chassis*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35635-4>

Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers. <https://www.sae.org/publications/books/content/r-114/>

Grijalva, E., Acosta, J., & Mancheno, E. (2021). Influencia de la densidad del aire en el consumo de combustible en vehículos livianos. *Novasinerгия*, ISSN 2631-2654, 4(2), 140–151. <https://doi.org/10.37135/NS.01.08.09>

GWM. (2018). *Ficha Técnica C30*. https://www.gomotors.com.ec/wp-content/uploads/fichas/greatwall/fichas_tecnicas_2.pdf

Harrison, R. M., Allan, J., Carruthers, D., Heal, M. R., Lewis, A. C., Marnier, B., Murrells, T., & Williams, A. (2021). Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review. *Atmospheric Environment*, 262, 118592. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2021.118592>

Heywood, J. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2^a ed.). McGraw - Hill Education.

INEC. (2021). *Visualizador de Estadística de Transporte Ecuador*. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiN2FhOTIxNTktNDA1My00OTQ2LWI2YTItYTIyY2E3NjFiMGY0IiwidCI6ImYxNThhMmU4LWNhZWMTNDQwNi1iMGFiLWY1ZTI1OWJkYTExMiJ9>

INEC. (2023). *Anuario de Estadísticas de Transporte 2022*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web->

inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/ESTRA_2022/2022_PRIN
CIPALES_RESULTADOS_ESTRA.pdf

INEN. (2008). *RTE INEN 017: CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES DE FUENTES MÓVILES TERRESTRES.*

<https://drive.google.com/file/d/1zRdLU7o8nnvL8TlstoZIPVHxEPX3zK5b/view>

INEN. (2017). *NTE INEN 2204/2017: GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES QUE EMPLEAN GASOLINA.*

<https://drive.google.com/file/d/10VbpDAJgscvHonci3I0yU2ti8KRskXYT/view>

Instituto de Investigación Geológico y Energético - IIGE. (2022). *Balance Energético Nacional 2021.*

Jaiprakash, & Habib, G. (2018). On-road assessment of light duty vehicles in Delhi city: Emission factors of CO, CO₂ and NO_x. *Atmospheric Environment*, 174, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.039>

Jiang, Z., Wu, L., Niu, H., Jia, Z., Qi, Z., Liu, Y., Zhang, Q., Wang, T., Peng, J., & Mao, H. (2024). Investigating the impact of high-altitude on vehicle carbon emissions: A comprehensive on-road driving study. *Science of The Total Environment*, 918, 170671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170671>

Jijón, D., Constante, J., Villacreses, G., & Guerrero, T. (2018). Estimación del rendimiento de aerogeneradores de 2 MW en el Ecuador: Potencial Eolo-Eléctrico. *Revista Técnica “Energía”*, 15(1). <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v15.n1.2018.324>

Komnos, D., Tsiakmakis, S., Pavlovic, J., Ntziachristos, L., & Fontaras, G. (2022). Analysing the real-world fuel and energy consumption of conventional and electric cars in Europe. *Energy Conversion and Management*, 270, 116161. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116161>

Lapuerta, M., Armas, O., Agudelo, J., & Sánchez, C. (2006). Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento.

- Información Tecnológica*, 17(5), 21–29.
https://www.researchgate.net/publication/285966603_Study_of_the_altitude_effect_on_internal_combustion_engine_operation_Part_1_Performance
- Leguísamo Milla, J. C., Llanes Cedeño, E., & Rocha Hoyos, J. (2020). Impacto del Ecodriving sobre las emisiones y consumo de combustible en una ruta de Quito. *Enfoque UTE*, 11(1), 68–83. <https://doi.org/10.29019/ENFOQUE.V11N1.500>
- Li, J., Ge, Y., Wang, X., & Zhang, M. (2022). Evaporative emission characteristics of high-mileage gasoline vehicles. *Environmental Pollution*, 303, 119127. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119127>
- López, J. C., Castillo, J. C., Serrato, D. A., Tibaquirá, J. E., & Carvajal, S. A. (2020). Development of a fuel consumption measurement methodology for light duty vehicles in Colombia, based on metrology principles. *DYNA*, 87(212), 47–56. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78899>
- Malik, M., & Nandal, R. (2023). A framework on driving behavior and pattern using On-Board diagnostics (OBD-II) tool. *Materials Today: Proceedings*, 80, 3762–3768. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.07.376>
- Mata, C., de Oliveira Leite, W., Moreno, R., Agudelo, J. R., & Armas, O. (2016). Prediction of NOx Emissions and Fuel Consumption of a City Bus under Real Operating Conditions by Means of Biharmonic Maps. *Journal of Energy Engineering*, 142(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000363](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000363)
- Microsoft. (2025). *Microsoft Excel*. <https://www.microsoft.com/es/microsoft-365/excel?market=bz>
- Minitab. (2025). *Minitab Statistical Software*. <https://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/#byt5lkf8vb-tab-2>
- Murillo, F., & Usca, H. (2021a). *Evaluación de la economía de combustible de vehículos de transporte público a gasolina en condiciones reales de tráfico en una ruta periférica en la*

- provincia de Chimborazo* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15466>
- Murillo, F., & Usca, H. (2021b). *Evaluación de la economía de combustible de vehículos de transporte público a gasolina en condiciones reales de tráfico en una ruta periférica en la provincia de Chimborazo* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15466>
- Murillo, F., & Usca, H. (2021c). *Evaluación de la Economía de Combustible de Vehículos de Transporte Público a Gasolina en Condiciones Reales de Tráfico en una Ruta Periférica en la Provincia de Chimborazo* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15466>
- Narváez, K., & Narváez, A. (2023). *Desarrollo de una ruta de ensayo RDE en el cantón Ibarra*. Universidad Técnica del Norte.
- Natarajan, J., Kantipudi, M. B., Yang, C.-H., & Shiao, Y. (2023). *The Future of Road Transportation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003354901>
- Noroña Merchan, M. V., Puente Moromenacho, E. G., Leguisamo Milla, J. C., & Celi Ortega, S. F. (2018). Estudio de emisiones contaminantes producidas por un motor MEP con transmisión automática y transmisión manual. *INNOVA Research Journal*, 120–128.
<https://doi.org/10.33890/INNOVA.V3.N4.2018.644>
- Nylund, N.-O., Erkkilä, K., Clark, N., & Rideout, G. (2007). *Evaluation of duty cycles for heavy - duty urban vehicles*. https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_29.pdf
- Payri, F., & Desantes, J. (2011). *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Editorial Universitat Politècnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/70998>
- Peitzmeier, C., Loschke, C., Wiedenhau, H., & Klemm, O. (2017). Real-world vehicle emissions as measured by in situ analysis of exhaust plumes. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 23279–23289. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9941-1>

- Python Software Foundation. (2025). *Applications for Python*.
<https://www.python.org/about/apps/>
- Rajamani, R. (2012). *Vehicle Dynamics and Control*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>
- Rosero, F. (2021). *Understanding the effects of traffic congestion on emissions from urban buses. An integrated approach incorporating real-world emissions, naturalistic driving profiles, and city traffic sensor data* [Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales].
<https://oa.upm.es/67390/>
- Rosero, F., Fonseca, N., López, J. M., & Casanova, J. (2020a). Real-world fuel efficiency and emissions from an urban diesel bus engine under transient operating conditions. *Applied Energy*, 261, 114442. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114442>
- Rosero, F., Fonseca, N., López, J.-M., & Casanova, J. (2020b). Real-world fuel efficiency and emissions from an urban diesel bus engine under transient operating conditions. *Applied Energy*, 261, 114442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114442>
- Rosero Obando, F., Rosero, X., & Mera, Z. (2024). Developing Fuel Efficiency and CO2 Emission Maps of a Vehicle Engine Based on the On-Board Diagnostic (OBD) Approach. *Enfoque UTE*, 15(1), 7–15. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1002>
- Rovira, A., & Muñoz, M. (2015). *Motores de Combustión Interna* (1ª ed.). Universidad Nacional de Educación a Distancia. 978-84-362-7086-0 de Antonio, A. R. y Muñoz Domínguez, M. (2016). Motores de combustión interna. Madrid, Spain: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/48846?page=3>.
- SAE International. (2017). *SAE J1979*. https://doi.org/https://doi.org/10.4271/J1979_201702
- SAS Institute Inc. (2025). *SAS: Data and AI Solutions*. https://www.sas.com/en_us/home.html
- Shah, I. H., Manzoor, M. A., Jinhui, W., Li, X., Hameed, M. K., Rehaman, A., Li, P., Zhang, Y., Niu, Q., & Chang, L. (2024). Comprehensive review: Effects of climate change and greenhouse gases emission relevance to environmental stress on horticultural crops and

- management. *Journal of Environmental Management*, 351, 119978. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119978>
- StataCorp. (2025). *Stata*. <https://www.stata.com>
- Technoton. (2024). *Fuel flow meter*.
- Technoton. (2025). *Technoton S6 Database*. <https://s6.jv-technoton.com/en/profile?view=login>
- The MathWorks Inc. (2025). *MATLAB*. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- The R Foundation. (2024). *The R Project for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org>
- Tipanluisa, L. E., Remache, A. P., Ayabaca, C. R., & Reina, S. W. (2017). Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades. *Información tecnológica*, 28(1), 03–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000100002>
- Toalombo, B., & León, M. (2022). *Análisis comparativo basado en el rendimiento de tres vehículos segmento B con y sin aditivos en la mezcla de combustible extra de 87 octanos [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/16580/1/65T00446.pdf>
- Tu, R., Xu, J., Wang, A., Zhang, M., Zhai, Z., & Hatzopoulou, M. (2022). Real-world emissions and fuel consumption of gasoline and hybrid light duty vehicles under local and regulatory drive cycles. *Science of The Total Environment*, 805, 150407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150407>
- UNECE. (2013). *Regulation No. 101/2013: Uniform provisions concerning the approval of passenger cars powered by an internal combustion engine only, or powered by a hybrid electric power train with regard to the measurement of the emission of carbon dioxide and fuel consumption and/or the measurement of electric energy consumption and electric range, and of categories M1 and N1 vehicles powered by an electric power train only with regard to the measurement of electric energy consumption and electric range*. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3e.pdf>

- UNECE. (2015). *Regulation No. 83/2015: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements*. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R083r5e.pdf>
- UNECE. (2024). *Regulation No. 168/2024: Uniform Provisions Concerning the Approval of light duty passenger and commercial vehicles with regards to real driving emissions (RDE)*. <https://unece.org/sites/default/files/2024-07/R168e.pdf>
- Vamag. (2025). *Car Benches*. <https://www.vamag.com/en/pages/1644-car-benches>
- Vera, C., Aparicio, F., & Díaz, V. (2016). *Teoría de los vehículos automóviles* (2^a ed.). Dextra. <https://bibliotecadigital.utn.edu.ec/s/inicio/item/14199>
- Wang, Y., Feng, X., Zhao, H., Hao, C., Hao, L., Tan, J., Wang, X., Yin, H., Wang, J., Ge, Y., & Zhang, H. (2022). Experimental study of CO₂ and pollutant emission at various altitudes: Inconsistent results and reason analysis. *Fuel*, 307, 121801. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121801>
- Wang, Y., Ge, Y., Wang, J., Wang, X., Yin, H., Hao, L., & Tan, J. (2020). Impact of altitude on the real driving emission (RDE) results calculated in accordance to moving averaging window (MAW) method. *Fuel*, 277, 117929. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117929>
- Wu, T., Han, X., Zheng, M. M., Ou, X., Sun, H., & Zhang, X. (2020). Impact factors of the real-world fuel consumption rate of light duty vehicles in China. *Energy*, 190, 116388. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116388>
- Xu, H., Zhang, L., Chang, H., Han, J., Wu, D., Gong, X., & Fu, M. (2023). Measuring the route topography impact on real driving emissions based on neural network models. *Environmental Research*, 231, 116072. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116072>
- Yi, S., Raza Abbasi, K., Hussain, K., Albaker, A., & Alvarado, R. (2023). Environmental concerns in the United States: Can renewable energy, fossil fuel energy, and natural resources depletion help? *Gondwana Research*, 117, 41–55. <https://doi.org/10.1016/J.GR.2022.12.021>

- Yue, Z., & Som, S. (2021). Fuel property effects on knock propensity and thermal efficiency in a direct-injection spark-ignition engine. *Applied Energy*, 281, 114221. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114221>
- Yupanqui, D. (2020a). *Determinación del rendimiento de combustible de una flota de taxis de 1400 centímetros cúbicos en la ciudad de Cuenca mediante parámetros de conducción normal* [Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10159/1/15789.pdf>
- Yupanqui, D. (2020b). *Determinación del rendimiento de combustible de una flota de taxis de 1400 centímetros cúbicos en la ciudad de Cuenca mediante parámetros de conducción normal* [Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10159/1/15789.pdf>
- Zervas, E. (2011). Impact of altitude on fuel consumption of a gasoline passenger car. *Fuel*, 90(6), 2340–2342. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.02.004>
- Zhou, B., He, L., Zhang, S., Wang, R., Zhang, L., Li, M., Liu, Y., Zhang, S., Wu, Y., & Hao, J. (2023). Variability of fuel consumption and CO₂ emissions of a gasoline passenger car under multiple in-laboratory and on-road testing conditions. *Journal of Environmental Sciences*, 125, 266–276. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2021.12.042>